DEPARTAMENTO DE PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS

TÍTULO DE TESIS:

DESARROLLO DE LAS GRANDES LUCES EN LA ARQUITECTURA ACTUAL.

Influencia de la evolución técnica en la producción e interpretación del reto gravitatorio de la arquitectura contemporánea.

TOMO I

AUTOR: ALBERTO HUMANES CISNAL

DIRECTORES DE TESIS:

D. ANTONIO JOSÉ MAS-GUINDAL LAFARGA

D. ANTONIO GONZÁLEZ CAPITEL

AÑO 2017

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr Rector de la Universidad Politécnica de Madrid,
el día de de 2017.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2017, en la
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

ÍNDICE

TOMO I

RESUMEN	p. 10
I. INTRODUCCIÓN	p. 14
1. Relevancia del análisis histórico para la concepción actual de las grandes luces	p. 18
2. Delimitación temporal del ámbito del estudio evolutivo de las grandes luces	p. 29
3. Implicaciones ligadas al análisis histórico y contemporáneo de las grandes luces	p. 45
II. ÁMBITOS HISTÓRICOS CLAVE SOBRE LOS QUE SE FUNDAMENTA EL PANORAMA ACTUAL DE LAS GRANDES LUCES	p. 54
1. El avance técnico. Material y sistema resistente, como definidores del marco dimensional y formal de actuación	p. 58
2. El avance en el análisis. Conocimiento resistente como apriorismo dimensional y limitador formal	p. 74
3. Cuadro resumen del marco condicionante de la producción arquitectónica	p. 77
III. LAS GRANDES LUCES COMO PARTE DE LA CONTEMPORANEIDAD PROYECTUAL	p. 80
1. Los requerimientos proyectuales. Las grandes luces como respuesta a exigencias previas y generadas	p. 94
2. Ámbitos del conocimiento que inciden sobre la concepción proyectual	p. 116
2.1. Técnica. Los sistemas resolutivos como condicionantes formales	p. 120
2.2. Medios de cálculo. La capacitación y medios resolutivos, como definidores del marco de actuación	p. 140
2.3. Exégesis. Influencia de la lectura de la obra en su concepción	p. 150
2.4. Materiales. Gestación de marcos limitativos y condicionantes, derivados de la ciencia de materiales	p. 184
2.5. Medios de representación. Cambios conceptuales ligados a los avances informáticos	p. 202
3. Taxonomía proyectual ligada a los proyectos de grandes luces	p. 210
3.1. Volumen exterior. La arquitectura como configuración de volúmenes bajo la luz	p. 212
3.1.a. Volumen suspendido	p. 214
- Ligereza	p. 218
- Masividad	p. 228

3.1.b. Volumen puente	p. 250
- Puerta	p. 255
- Nexo	p. 261
3.1.c. Volumen en voladizo	p. 266
- Aislado	p. 270
- Asociado	p. 274
3.2. Volumen interior. Generación de entornos controlados	p. 278
3.2.a. Mallas de soportes	p. 280
- Irregular	p. 282
- Modular	p. 287
3.2.b. Espacio unitario	p. 300
- Cobijo	p. 303
- Firmamento	p. 310
- Microcosmos	p. 315
4. Conformación visual. Lectura enfática de la obra	p. 320
4.1. Representatividad. Lectura singularizada de la obra como ente simbólico y personificador	p. 324
- Cultural	p. 326
- Comercial	p. 331
4.2. Exaltación técnica. Resolución técnica como medio de expresión visual	p. 342
4.3. Gesto. Libertad expresiva como principio estructurante del proyecto	p. 350
5. Límites dimensionales. Procedimiento para la determinación del marco dimensional	p. 360
- El peso propio	p. 369
- El análisis numérico	p. 376
- El conocimiento científico	p. 381
IV. LAS GRANDES LUCES, UNA FORMA DE CONCEBIR LA ARQUITECTURA	p. 392
1. Influencia de los condicionantes resolutivos en los márgenes dimensionales y limitaciones a la materialización arquitectónica	p. 400
2. Influencia de las capacidades resolutivas en la proyección arquitectónica	p. 414
3. Conclusiones	p. 424
V. BIBLIOGRAFÍA	p. 444

TOMO II – ANEXO: EVOLUCIÓN ARQUITECTÓNICA PRODUCIDA EN FUNCIÓN DE LOS AVANCES DE LA TÉCNICA Y EL CÁLCULO

I. EL AVANCE TÉCNICO. MATERIAL Y SISTEMA RESISTENTE, COMO DEFINIDORES DEL MARCO DIMENSIONAL Y FORMAL DE ACTUACIÓN

p. 6

1. El hierro y el acero. El material como origen del cambio conceptual del siglo XIX

p. 12

1.1. Incorporación de las estructuras metálicas como elemento formal p. 20

1.2. Límite dimensional. Los puentes como tipología de referencia p. 28

- Puentes viga p. 33

- Puentes ménsula p. 42

- Puentes en arco p. 50

- Puentes colgantes o suspendidos p. 56

- Puentes atirantados p. 85

1.3. Uniones. Roblones, tornillos y soldaduras como instrumentos de continuidad p. 102

1.4. Estaciones de ferrocarril. Tipología original del siglo XIX, como mecanismo de aceptación de los avances técnicos y espaciales p. 112

2. Hormigón armado y pretensado. Economía resolutive como medio de adaptación en el siglo XX

p. 132

2.1. Sistemas y patentes. Implantación del hormigón armado en el cambio de siglo p. 132

2.2. Orígenes normativos del hormigón armado p. 148

2.3. Hormigón pretensado. Imposición del hombre sobre la materia p. 152

2.4. Evolución del hormigón armado y pretensado en el panorama español. Los tres ingenieros que marcaron época p. 166

- Eduardo Torroja Miret (1899-1961) p. 170

- Félix Candela Outeriño (1910-1997) p. 188

- Javier Manterola Armisen (nacido en 1936) p. 206

2.5. Panorama actual. Papel de los sistemas estructurales basados en hormigón armado y pretensado p. 218

- Estructuras laminares. Desaparición motivada por la desarticulación con las exigencias propias del marco temporal actual p. 220

- Sistemas prefabricados. Opción constructiva y tipológica que enlaza el siglo XX y el XXI p. 231

II. EL AVANCE EN EL ANÁLISIS. CONOCIMIENTO RESISTENTE COMO APRIORISMO DIMENSIONAL Y LIMITADOR FORMAL

p. 254

1. Evolución de los medios de análisis estructural p. 256

2. Cantidad de estructura p. 280

III. CUADRO RESUMEN DEL MARCO CONDICIONANTE DE LA PRODUCCIÓN ARQUITECTÓNICA

p. 288

IV. BIBLIOGRAFÍA

p. 292

La presente tesis ha sido el fruto de mucho tiempo y esfuerzo, pero no solo mío, así quiero agradecer a mis tutores su dedicación. Además sin el apoyo de mis padres jamás hubiera sido posible, así como el cálido recuerdo de mis abuelos.

RESUMEN

Esta tesis nace de un interés personal por la comprensión del panorama arquitectónico actual, desde las capacidades técnicas y la influencia de éstas en los procesos de proyectación. Hoy un gran número de proyectos retan los límites formales y dimensionales previamente establecidos, haciendo de este gesto, parte vital de la lingüística arquitectónica. Este hecho solo resulta explicable desde la lectura de las capacidades resolutorias, que definen el ámbito en el que arquitectos e ingenieros desarrollan su actividad. Así, los proyectos de grandes luces resultan clave para el entendimiento del panorama arquitectónico, como marco extremo de la expresión y la técnica. Entendida como arquitectura de grandes luces, aquella que supera los márgenes habituales, materializando el reto gravitatorio, más allá de un valor numérico, condicionado al marco temporal. Si tuviera que establecer un marco dimensional de referencia en la actualidad, podrían considerarse aquellas obras que superan los 30 metros de luz o los 10 metros en voladizo.

Para acometer dicha labor reflexiva, primeramente es necesario el establecimiento de un contexto histórico, que clarifique la evolución que ha sufrido la técnica y la arquitectura de grandes luces. Para ser plenamente conscientes del presente, ha de conocerse el pasado y en estos momentos, esta visión técnica de la evolución arquitectónica se encuentra dispersa, sin un compendio suficiente, que permita una visión clara de conjunto, siendo uno de los objetivos de la tesis, la estructuración de una *“historia de la evolución de las soluciones y su impacto sobre los márgenes dimensionales y libertades constructivas”*. Desde el presente estudio se plantea una visión alternativa a la canónica historia de la arquitectura, sugiriendo una visión de ésta, desde el marco capacitivo en el que se desarrolla.

El hombre a lo largo de la historia ha actuado con libertad, solo dentro de los márgenes que la técnica le ha permitido. Precisamente por ello es imprescindible tener presente las capacidades del marco técnico en cada momento, como configuradoras del ámbito proyectual y condicionantes básicos que permiten el entendimiento de la obra, más allá de los factores tratados clásicamente en la lectura histórica de la arquitectura.

El conocimiento no puede ser desaprendido y por eso mismo, modifica irreversiblemente nuestra visión del mundo y nuestra forma de concebirlo y proyectarlo. Este hecho condiciona nuestra lectura del entorno, por lo que la interpretación de las obras existentes, ha de estar ligada a dicho conocimiento del marco técnico que posibilitó y condicionó su realización.

Con las bases doctrinales establecidas, se acomete el análisis de la situación actual, desde el punto de vista de la influencia de la capacidad resolutoria en la producción e interpretación del reto gravitatorio de la arquitectura contemporánea. Se busca la definición del papel de las soluciones de grandes luces en la producción arquitectónica actual. Para ello se establece un análisis taxonómico de la producción arquitectónica, para clarificar las particularidades de cada tipo de solución y el impacto que produce.

Las grandes luces son un recurso lingüístico imprescindible en la producción arquitectónica presente, como énfasis expresivo, por lo que el estudio, tanto de las opciones disponibles, como el impacto que logran, es de relevancia, tanto para la comprensión del panorama actual, como para encarar más eficientemente las obras que usarán este recurso en un futuro.

ABSTRACT

This thesis is born of a personal interest in the understanding of the current architectural outlook, based on the technical capabilities and their influence in the planning processes. Today a large number of projects challenge the formal and dimensional limits previously established, making this gesture a vital part of architectural linguistics. This fact can only be explained from the reading of the technical and calculation capabilities, which both define the work field of architects and engineers. Thus, projects of large spans are part of the key to understand the present architecture, as they form an extreme frame of expression and technique. The architecture of large spans helps us surpass the habitual dimensional margins, materializing the gravitational challenge, beyond a numerical value conditioned to the time frame. Today this dimensional frame can include those constructions that exceed 30 meters between pillars or 10 meters in cantilever.

In order to undertake this reflective work, first it is necessary to establish an historical context, to explain the evolution of the technique and the architecture of large spans. To understand the present it is necessary to know about the past, but at the present time, this technical vision of architectural evolution is dispersed, impeding a global vision. Thus, one of the objectives of the thesis is to create a "history of the evolution of solutions and their impact on dimensional frames and constructive freedoms". The present study shows an alternative vision to the canonical history of the architecture, arranging a vision of it from the capacitive framework in which it is developed.

Man throughout history has acted with freedom, only within the bounds that the technique has allowed him. For this reason it is essential to keep in mind the capabilities of the technical framework in every moment of history, which define the project scope and are basic determinants that allow the understanding of the work, providing an alternative vision to the classic history of architecture.

The knowledge can not be unlearned and therefore it irreversibly modifies our understanding of the world and our ways of conceiving and projecting it. This fact conditions our view of the environment, thus the interpretation of the existing works must be linked to the knowledge of the technical frameworks that made them possible and conditioned their realization.

With the doctrinal basis established, the analysis of the current situation is carried out from the point of view of the influence of the resolute capability in the production and interpretation of the gravitational challenge of the contemporary architecture. The determination of the role of solutions of large spans in the current architectural production is our goal. A taxonomic analysis of the architectural production is performed to clarify the particularities of each type of solution and the impact it achieves.

Large spans are an indispensable linguistic resource in the present architectural production as an expressive emphasis. So the study of all available options and the impact they achieve is relevant for the understanding of the current architectural outlook, to handle more efficiently this resource in future works.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando andamos hoy por cualquier ciudad, habitamos espacios de características muy variadas, siendo gran número de ellos, un prodigio de la técnica, solo entendible a través del proceso evolutivo que las ha dado como resultado. En un comercio o en un simple aparcamiento, encontramos en infinitud de situaciones vigas pretensadas, que permiten salvar luces considerables con elementos horizontales. Partiendo de este pensamiento, llegamos a obras que retan nuestra comprensión de los medios de sustentación y nos sorprenden hasta el punto de retar el concepto de gravedad, base de nuestra lectura del medio que nos rodea. Un claro ejemplo de esta lectura intuitiva del mundo, es el campanario de la catedral de Pisa, en el que la lectura de sus 4° de inclinación es suficiente para transmitir una sensación de inestabilidad en el observador. Por este mismo proceso, la contemplación de grandes espacios cubiertos lleva a una lectura íntegramente relacionada con nuestro sentido de la gravedad, transmitiendo desequilibrio, ingravidez o una sensación compresiva, entre otras muchas.

Para entender estas herramientas de proyectación y su influencia sobre la propia concepción actual de la arquitectura, es preciso realizar un profundo análisis de la evolución de los medios que han llevado a la configuración actual de la técnica. Pero la forma en que se realiza dicha lectura de los acontecimientos históricos, resulta incluso más relevante que los datos puramente cronológicos, para el entendimiento sustancial de los procesos evolutivos. *“Una agrupación de las estructuras por cronología o periodos históricos, resultaría naturalmente fácil, aunque sin ninguna solidez de fondo y completamente inútil para el establecimiento de sus principios de estabilidad; pero además de estos inconvenientes, resultaría otro por entero inadmisibles, cual es el de una exposición confusa y un desorden acabado de los verdaderos principios estructurales, principios esencialmente mecánicos e inamovibles que encontramos manifestados en estructuras cuyas edades discrepan en miles de años”*¹. Por ello se estructura el análisis desde dos puntos de vista claramente diferenciados:

- *Avances técnicos*: esta visión nos acerca a los cambios sobre los materiales, los cuales son *la base para la técnica*, desarrollando sistemas constructivos específicos a las capacidades estructurales de la materia, generalmente partiendo de otros nacidos de construcciones con materiales más primitivos. Definiendo en el proceso los límites resistentes y con ellos los espacios realizables. Una búsqueda análoga por la superación de los límites la encontramos en Santa María del Fiore, donde se retaba a superar el canónico espacio del Panteón de Roma, paradigma de las estructuras durante más de un milenio, tiempo durante el cual nadie logró acercarse a las luces alcanzadas en él. Este reto llevó a una sorprendente solución técnica, fundamentada en los conocimientos adquiridos en la arquitectura gótica, aligerando la cúpula, al estructurarse en una serie de 24 nervios resistentes, configurando un esqueleto estructural que permitía alcanzar el horizonte perseguido por generaciones. Nuestro análisis no se remontará a épocas tan remotas, ya que si queremos encontrar las claves del desarrollo técnico actual, es suficiente con el estudio de los últimos dos siglos, ya que en este periodo de la historia, gracias a la

¹ Fragmento de la reflexión realizada por Félix Cardellach en su libro *“Filosofía de las estructura”* (p.10), al argumentar su clasificación particular de las estructuras desde un punto de vista puramente mecánico, como formas birresistentes o unirresistentes.

revolución industrial y la mejora de los medios de transportes, el proceso evolutivo se acelera, pasando el desarrollo de la técnica a ser una cuestión global, surgida del entrecruzamiento de ideas surgidas en lugares distantes.

Este recorrido por los avances de la técnica durante los dos últimos siglos, se leerá desde el punto de vista de los mariales, en un proceso que los enlaza, dándose el relevo los unos a los otros en la carrera por la superación de los límites espaciales. A lo largo de este análisis se irán dibujando los márgenes de lo posible, como un diagrama de las capacidades constructivas inherentes a cada material, en función de los sistemas constructivos y progreso en sus propias características intrínsecas. En conjunto, un mapa de posibilidades dentro del que se inscribe toda la producción arquitectónica de los dos últimos siglos, explicando porque unas obras se han producido en un determinado momento de la historia y no unos años o décadas antes. Una comprensión de la obra entendida desde la técnica que la hizo posible.

- *Distinción tipológica*: una vez han sido marcadas las limitaciones y su evolución en el tiempo a lo que resulta realizable, es hora de establecer la traducción espacial de la técnica, puesto que precisamente en este ámbito es en el que surge el interés por la superación y da paso al progreso en el campo arquitectónico. Por ello este recorrido por los espacios del hombre se estructura partiendo de una diferenciación tipológica, ya que cada una de éstas lleva asociada unas características proyectuales y espaciales, dentro de las que surge el germen de las grandes luces por diferentes razones. Esta selección podría resultar inconmensurable, dada la variedad de espacios que han surgido de las necesidades espaciales del hombre, pero para que la comprensión de las claves que han configurado nuestra visión actual de la arquitectura, se ha procedido a limitar el campo de análisis, estudiando aquellas tipologías que se encuentran intrínsecamente ligadas al concepto de las grandes luces o en las que se encuentren ejemplos especialmente explicativos de las claves que dan lugar a la amplia gama de espacios que habitamos a diario.

Una vez tenemos dibujado el marco en el que se desarrolla nuestra actividad y comprendidos los procesos y factores que han determinado no solo los márgenes de actuación, sino nuestra propia visión del mundo, se está en disposición de establecer una taxonomía que clarifique los procesos de proyectación que dan lugar a categorías espaciales, no basadas ya en las técnicas o materiales, ni siquiera en las tipologías proyectuales, sino en el ámbito de la ideación arquitectónica, desde el germen que da origen a su producción, centrando el análisis en aquellas obras solo entendibles espacialmente por el empleo de grandes luces como herramienta de diseño, definiendo unas *tipologías proyectuales*², en lugar de las *funcionales* que se suelen emplear para la lectura habitual de una obra.

² Al referirse a *tipología proyectual*, se hace alusión a la clasificación de la producción arquitectónica en función de las características del germen que la produjo, delimitando las reglas para la configuración espacial del proyecto. Mientras que la *tipología funcional*, hace referencia al sistema clásico de clasificación de los proyectos y sus espacios, en función de los usos a los que se encuentran destinados, de forma ajena a cualquier valoración distinta de los cometidos prácticos.

1. Relevancia del análisis histórico para la concepción actual de las grandes luces

Las grandes luces pueden surgir del material o de la forma. Con esta perspectiva podemos ser ciertamente más conscientes de las herramientas de proyectación con que contamos, partiendo de los orígenes conceptuales de la arquitectura, como un primer paso hacia el entendimiento del funcionamiento estructural del medio conformador del espacio. Si recapacitamos sobre este punto, nos percatamos que precisamente los esfuerzos internos y la manera de abordarlos es el verdadero origen de la forma. Los momentos flectores son el tipo de sollicitaciones que peor resisten los materiales pétreos, que durante siglos han dominado la producción arquitectónica, siendo la rotura a estos esfuerzos considerablemente más fácil de producirse que a cortante o compresión³. Por lo tanto a lo largo de toda la historia podemos ver como se ha producido un esfuerzo ímprobo por hacer estructuras en las que no aparezcan momentos flectores, fundamentándose en esfuerzos de compresión. Por su parte los elementos traccionados serán escasos, resolviéndose mediante materiales capaces de resistir estos esfuerzos, tales como la madera y las barras de hierro. Pero el uso de estos elementos será mínimo, hasta la aparición de un material capaz de trabajar bien ante él, así como unos elementos estructurales apropiados. Durante la mayor parte de la historia, los materiales empleados, desde la piedra a fábricas de ladrillo y antiguos hormigones, han funcionado a compresión, por lo que los esfuerzos del hombre han ido durante ese tiempo orientados al diseño de sistemas compresivos. De aquí el origen de los arcos en sustitución de los dinteles de piedra⁴.

El concepto de la estructura como origen de la conformación espacial de la arquitectura y por consiguiente, básico en toda reflexión proyectual, es el punto central para el estudio del diseño de los espacios de grandes luces y su evolución a lo largo de los años, conforme a la evolución técnica. Esta realidad inseparable entre los conceptos de arquitectura y estructura lo expone claramente Myron Goldsmith cuando dice: *“The idea of architecture coming out of the structure is a very old one, and it has persisted throughout architectural history. Perhaps the greatest period of the structure being so intertwined with the architectural that they are inseparable is the Gothic. Of course there are other ideas about architecture, and there was an*

³ Precisamente por las características resistentes de los materiales pétreos, se han buscado medios para que las estructuras trabajen exclusivamente a compresión, sin la presencia de las tracciones tan dañinas para estos. Cuando nos encontramos roturas en soportes de piedra, uno de los principales factores que intervienen es el pandeo, que no es otra cosa que la aparición de un momento flector debido a una excentricidad en la aplicación de las cargas. A efectos prácticos la resistencia a tracción de estos materiales resulta mínima, por lo que a la hora del diseño y cálculo de las estructuras se toma ésta como nula.

⁴ En la arquitectura egipcia podemos ver cómo han llegado hasta hoy templos con grandes salas hipóstilas, llenas de altas columnas que sustentaban dinteles de piedra sobre los que se encontraba la desaparecida techumbre. De dichos dinteles hoy pocos se encuentran en pie, ya que la piedra no resiste tracciones y es solo cuestión de tiempo que sucumba ante ellas y se produzca el desplome.

equally great period in the Renaissance where great artists did buildings. That is another way to approach building, but our approach, and we think it appropriate for today, is the structural one."⁵

La arquitectura romana fundamenta su arquitectura en un sistema de arcos, bóvedas y cúpulas, que en conjunto resuelven las problemáticas que se pudieran presentar para la transmisión de las cargas al terreno, apareciendo solo esfuerzos de compresión. Pero las cargas que debe sustentar una edificación varían a lo largo del tiempo, modificando el antifunicular correspondiente a las cargas, que debe discurrir por el interior de la estructura, si queremos que ésta trabaje a compresión, ya que si no aparecerían momentos flectores y por tanto tracciones. Este hecho condiciona las dimensiones de los elementos constructivos, ya que éstas deben de ser suficientes para contener todos los posibles antifuniculares de cargas que se puedan presentar a lo largo de la vida del edificio, por este mismo hecho vemos la gran masividad de los arcos romanos, como medio efectivo de cerciorar el funcionamiento compresivo de dichas estructuras⁶. La importancia del antifunicular de las cargas la vemos con claridad cuando analizamos la arquitectura gótica, en la que frente al sobredimensionado, se ajustan las magnitudes y el diseño a la optimización estructural, en busca de un menor

Figura 1. Trasmisión de los empujes horizontales hasta el terreno, en una sección gótica.

⁵ BULLINGTON, P. y GOLDSMITH, Myron, *"Technique and Aesthetics in the Design of Tall Buildings"*, Estados Unidos, Institute for the Study of the High-Rise Habitat, 1986, p.17

⁶ Los arcos romanos son en su mayoría gruesos y con anchos muros en sus laterales, esto permite que discurra por su interior cualquier funicular de cargas posible. Además al tener un gran peso propio, se reduce la relevancia de la parte variable, siendo menor su influencia sobre el recorrido de las cargas hasta el terreno. Este sobredimensionado ha permitido que muchas de estas obras arquitectónicas lleguen hasta nuestros días, como puentes, que gracias a las consideraciones mencionadas, han asumido los distintos usos que han tenido hasta el momento.

consumo de material y el aumento de las dimensiones alcanzables. En la sección de una catedral gótica se percibe claramente la función estructural de todos los elementos que la conforman, distinguiéndose el trazado antifuncular por el que discurren las cargas hasta el terreno, estableciendo un recorrido óptimo (Figura 1). Esta claridad del estilo gótico en el entendimiento de las reglas básicas del funcionamiento estructural, aun fundamentadas sobre un sistema geométrico y de proporciones, en la que los límites eran determinados por los desplomes, se lo debemos a la búsqueda de una economía de medios y una carrera a lo largo de los siglos por aumentar altura y luces, con el fin de confeccionar espacios sorprendentes y grandiosos, que ensalzaran a su vez la simbología religiosa a ellos relacionada. Así durante siglos se explotarán todas las posibilidades de un material tan fecundo como la piedra, hasta la aparición en el siglo XVIII, en el mundo de la construcción, del hierro, un material que permitió superar los logros alcanzados hasta el momento en el ámbito espacial y sustituir en la práctica a la madera⁷, ya que de ésta heredarán esquemas estructurales básicos como la triangulación. Este nuevo material, capaz de resistir tracciones, sustituyó a la madera en elementos como dinteles, vigas y cerchas, estas últimas son un esquema complejo, generado nuevamente en la búsqueda de sistemas capaces de evitar la aparición de momentos flectores, haciendo trabajar en este caso a todos los elementos que lo conforman a tracción o a compresión, hecho que determinó que éste fuera el principal recurso empleado a la hora de confeccionar estructuras metálicas. Así la triangulación, las cerchas y los arcos se convertirán en los principales esquemas formales empleados para la optimización estructural y el aprovechamiento de las capacidades resistentes del material. Una de las ventajas de las cerchas, es que pueden realizarse con la forma que la idea y concepción proyectual requieran, trabajando bajo los mismos principios, aunque se vaya en contra de la lógica formal, desde el punto de vista estrictamente estructural. Así se emplearán en innumerables casos las cerchas planas, desde sus mismos comienzos, tanto por el factor económico a la hora de su realización, como por la norma que rige nuestro mundo, para el hombre el eje que importa es el vertical desde el centro de la tierra y los planos perpendiculares a éste, como expresa claramente Rudolf Arnheim: *“El hombre experimenta el espacio en el que vive como asimétrico. Entre las infinitas direcciones del espacio tridimensional en las que puede moverse en teoría, una dirección se distingue por la fuerza de gravedad: la vertical. La vertical actúa como eje y sistema de referencia para todas las demás direcciones. (...) En nuestro sistema espacial, la dirección vertical define el plano horizontal como el único para el cual la vertical sirve como eje de simetría. Es el plano en el que podemos movernos libremente...”*⁸. Pero esta misma idea, la manifiesta Christian Norberg-Schulz quien escribió que *“las direcciones horizontales representan el mundo concreto de acción del hombre. En cierto sentido, todas las direcciones horizontales son iguales y forman un plano de extensión infinita. El modelo más simple de espacio existencial del hombre, es, por tanto, un plano horizontal atravesado por un eje*

⁷ El hierro desde el siglo XVIII ha venido a sustituir a la madera como material al que recurrir cuando es necesario resistir tracciones. Antes de esas fechas ya existía el hierro, pero los avances iniciados en ese siglo harán posible su implantación como base para la construcción de estructuras completas.

⁸ ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977, p.30,32

*vertical*⁹. Esta verdad universal condiciona la búsqueda del hombre de configurar planos horizontales, en su labor transformadora del medio, hacia un entorno más propicio para su existencia. Cuando se trabaja con cerchas hay que tener clara la importancia de la triangulación, ya que como sistema de barras que es, debe constituirse como una unidad indeformable¹⁰. La triangulación la encontramos tanto en estructuras de madera, como de hierro y acero, en aquellas en las que la forma común de presentarse el material es como elemento lineal y por tanto en los que la consecución de elementos estructurales de gran tamaño se realiza como adición de barras, ya sean troncos o perfiles laminados. En estos casos difícilmente se pueden considerar los nudos como rígidos, por lo que basar el diseño en una forma indeformable como el triángulo, es un recurso básico sin el que no se podrían constituir estas estructuras. Por ello en el momento en que no empleamos este tipo de geometrías es imprescindible la conformación de nudos rígidos, con la complejidad que ello lleva asociada, un ejemplo de ello son las vigas Vierendeel, que tanto han gustado a los arquitectos desde sus comienzos a finales del siglo XIX, un modelo estructural con el que poder cubrir grandes luces, con una serie de ventajas de diseño considerables. La primera de ellas es la posibilidad de conformar un volumen habitable sobre un espacio de grandes luces, aprovechando para ello el canto de la propia viga y la segunda ventaja es que al estar conformada solo mediante elementos horizontales y verticales, sin diagonales, no se producen grandes interferencias con el diseño del espacio habitable que se puede configurar en su interior, entendida prácticamente como una malla de pilares. Estas ventajas espaciales, obviamente no son un hecho gratuito, ya que exigen una considerable cantidad de material extra frente a una solución triangulada. Con la aparición del hierro y el acero por primera vez en la historia aparece esa línea de intervención que se aleja de las formas óptimas para la transmisión de cargas en proyectos de grandes luces, entrando el factor de diseño como contrapunto asumible gracias a los nuevos márgenes que nos permite el material.

Las grandes luces son el punto extremo en el que se experimenta con los límites de lo realizable, en la constante búsqueda del hombre de superar las barreras que les vienen impuestas por el material, la técnica y el panorama social. Esta situación de límites es la que nos permite conocer los condicionantes básicos que delimitan el campo de la proyectación, así como los márgenes y reglas dentro de las que ésta se desarrolla. Como hemos visto, el hierro y posteriormente el acero, han permitido retar a la forma antifunicular¹¹, pero no por ello se niega, ya que esta se emplea con gran frecuencia cuando es necesario configurar grandes

⁹ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977, p.32)

¹⁰ Al referirnos a indeformable, se habla de un conjunto de barras en una disposición tal que no conformen un mecanismo, constituyendo una estructura ya sea isostática o hiperestática. Para ello es necesario fundamentar cualquier diseño sobre el concepto de la triangulación, siempre y cuando los nudos conceptualmente se tomen como rótulas.

¹¹ La forma del antifunicular de las cargas es el trazado ideal de la estructura para su problemática particular. Cuando se trabaja con arcos, estos deben tener el espesor suficiente como para que el antifunicular correspondiente pueda inscribirse en su interior, con el fin de que la estructura trabaje a compresión.

espacios sin soportes, como en el caso de las estaciones de ferrocarril, una tipología proyectual nueva, diseñada para dar cobijo al prodigio tecnológico del siglo XIX, la locomotora de vapor. Estos espacios debían tener una gran altura para solucionar el problema de los gases, pero las grandes luces surgen más de una necesidad de representación que una problemática técnica. Estos espacios por termino general se configuran mediante arcos triarticulados, conformados mediante cerchas trianguladas de hierro, de esta manera se configura un sistema mixto, en el que como se ha dicho todas las barras funcionan a compresión o a tracción, optimizando la magnitud de los esfuerzos mediante la forma global de la estructura. Este esquema ha permitido ampliar considerablemente el horizonte de luces realizables en arquitectura, como ejemplifica el edificio de la Halle des Machines, (Galería de Máquinas), de la Exposición Universal de París de 1889, en la que se configuraba una inmensa sala de 422,49 metros de largo por 114,38 de ancho, en la que se expusieron los elementos punteros de la tecnología de la época, demostrando que la arquitectura está a la altura y que como *“máquina de habitar”*¹², también está condicionada por los avances de la técnica y los materiales, surgiendo de ellos la verdadera libertad formal y de diseño, que nos permitirá elaborar una nueva definición espacial del mundo.

Ya antes de terminar el siglo XIX quedan definidas la mayor parte de las soluciones estructurales para la consecución de grandes luces con hierro y acero, incluidos los sistemas de cables, tan representativos en el campo de los puentes como referente de las grandes luces. Como se ha dicho, las grandes luces es uno de los puntos candentes de experimentación arquitectónica, pero precisamente por las características de este tipo de estructuras, la mayor parte que las obras que sirven de referencia de los límites técnicos, las encontramos en el ámbito de la ingeniería civil, donde alcanzar un rango de luces elevado en muchos casos es la única opción viable, hecho que impulsa la superación de las barreras que nos vienen impuestas ampliando obra tras obra los márgenes de lo realizable, dentro de los que nos desenvolvemos. Estos límites raramente son alcanzados por las edificaciones fuera del ámbito de la ingeniería civil, ya que en éste llevan asociadas problemáticas diversas, que fundamentalmente condicional el rango de luces necesarias. Así en el campo de la arquitectura, los márgenes dimensionales empleados se encuentran mayormente condicionados por factores de tipo formal y funcional, atendiendo más a unos límites de lo razonable, que de lo realizable. Precisamente en ese punto es en el que se encuentra la problemática proyectual, en una situación como la actual en la que casi cualquier luz que deseemos emplear en un proyecto es posible, debiendo actuar con la prudencia y consideración de lo procedente y realizable desde el marco económico y social en el que nos encontremos. La realidad social hoy es la que establece los límites realizables con una cierta técnica y función final, siendo estos raramente cercanos a los máximos posibles con las técnicas a nuestra disposición.

Si a finales del XIX ya estaban establecidas unas sólidas bases de la arquitectura de hierro y acero, a finales de ese siglo y principios del XX entrará en escena otro material, vital en la historia del hombre, el hormigón armado. Éste surge como evolución del hormigón en masa,

¹² El término *“máquina de habitar”* lo acuñó Le Corbusier a la hora de poner un énfasis especial en el factor funcional de la vivienda, así como una referencia a su interés por los barcos, automóviles y aviones, máquinas que mostraban los avances tecnológicos y como de forma pareja debía responder la arquitectura a la hora de dar respuesta a los requerimientos de la sociedad del momento.

presente de forma arcaica a lo largo de toda la historia del hombre y especialmente en la arquitectura romana. Este material fue valorado por su capacidad de conformar piedras artificiales, lo que la arquitectura romana empleó sabiamente, conformando muros en los que el ladrillo o la piedra presente al exterior hacían las veces de encofrado perdido para el mortero de cal. Además las estructuras desarrolladas por estos eran arcos, bóvedas y cúpulas, sistemas que basan su funcionamiento en esfuerzos de compresión. La gran problemática presente en éste material, es que al igual que en las piedras naturales o los muros de fábrica, carece de resistencia a tracción, pero tras el desarrollo producido a lo largo del siglo XIX en la producción de hierro y acero, nos encontramos ante la oportunidad de resolver esta problemática. A los hormigones desarrollados a lo largo del siglo XIX se les introducirá en el interior barras de acero, con el fin de conferir al conjunto la resistencia a tracción de la que carecía el hormigón en masa. El sistema empleado para realizar estructuras de hormigón armado no será ni mucho menos única, apareciendo un buen número de patentes a este respecto, aunque entre ellas hay algunas que resuenan con especial fuerza por la amplia difusión que tuvieron, como las de Joseph Monier o la de François Hennebique (Figura 2), entre muchas otras. El hormigón armado se establecía como material económico capaz de resistir momentos flectores, realizando vigas de hasta un rango de unos 15 metros con unos costes razonables y un uso de hierro y acero considerablemente inferior al de las estructuras metálicas, lo que favoreció su implantación en los periodos correspondientes a la Primera y Segunda Guerra Mundial, ya que durante éstas, los productos de la siderurgia eran destinados en su mayor parte para la industria bélica, quedando una ínfima parte para la construcción. Como hemos dicho el hormigón armado al construirse mediante moldes, puede asumir la forma que deseemos, ya sean vigas horizontales o formas más racionales desde el punto de vista resistente, como las ya conocidas, (arcos, bóvedas y cúpulas), o las láminas, que surgen de la particularidad de este material de resistir tracciones. Las estructuras laminares basan su funcionamiento por completo en la forma, constituyendo finas cáscaras indeformables o *“superficies no desarrollables”*, en las que al igual que en los esquemas triangulados se busca la reducción de los esfuerzos soportados por la estructura, tanto a compresión como particularmente a tracción. La idea de este esquema estructural consistía en construir una superficie que funcione a compresión, pero que dado su escaso espesor, es inevitable que con la variación de las cargas presente puntos en los que haya tracciones, que este material es capaz de resistir gracias al armado. Precisamente esta consideración, de que la lámina pueda soportar tracciones, es la que establece la gran diferencia frente a arcos, bóvedas y cúpulas, ya que ahora el plano estructural es capaz de resistir ambos esfuerzos. Las estructuras laminares de hormigón armado, constituyen un campo de experimentación de grandes luces especialmente fecundo, en el que encontramos figuras de especial

Figura 2. Imagen publicitaria de la patente de François Hennebique, exponiendo las virtudes del sistema.

renombre como los españoles Eduardo Torroja y su alumno Félix Candela. Hoy esta tipología estructural se encuentra prácticamente en desuso, por varias razones: la primera es la limitación climática, que restringe las áreas geográficas en las que se pueden realizar, manteniendo la calidad higrotérmica del espacio interior, por lo que respecta a la segunda, se centra en el ámbito socioeconómico, limitando su empleo a zonas en las que aun la mano de obra es barata, ya este sistema que requiere de un buen número de trabajadores para levantar una de estas estructuras. Por las anteriores razones, su uso se ha relegado casi en exclusiva a países donde tanto el clima como la mano de obra barata las posibilitan, aunque encontramos algunos ejemplos que se escapan de estas reglas y conciben la estructura como un elemento con una belleza estética inherente que vale el esfuerzo económico que ello supone. Este tipo de soluciones, dada la complejidad de sus formas, se emplean para cubiertas, obteniendo luces considerables gracias al estudio de la forma.

Cuando tratamos con elementos horizontales, como vigas planas o de canto, de hormigón armado, nos encontramos ante una limitación técnica a tener en cuenta, la fisuración. Éstas se producen de forma cotidiana en el hormigón armado, ya que para que las barras de armado que recorren su interior trabajen, es necesario que se fisure el hormigón. Lo realmente relevante no es la presencia de fisuras, que resulta inevitable, sino las dimensiones de éstas, ya que cuando son demasiado grandes permiten el paso del agua y con ello degradación del armado y el colapso de la estructura con el tiempo. Por ello este tipo de soluciones no van mucho más allá de los 15 metros. Precisamente este desacuerdo entre el hormigón y el acero es lo que logra solventar el hormigón pretensado.

El hormigón pretensado se constituye como el gran avance en el siglo XX, en el campo de los materiales de construcción, ya que se centra en el correcto tensado de las barras de acero, con el fin de que el hormigón se encuentre precomprimido en su totalidad, reduciendo dicha compresión según se establece un esfuerzo tracción en el acero, sin que el hormigón se encuentre en ningún momento sometido a tracciones. La ventaja de tener barras de acero pretraccionadas en el interior del hormigón, consiste que al encontrarse éste precomprimido se evitan fisuraciones, ayudando tanto a la longevidad del elemento estructural, como a la superación de los límites espaciales, alcanzando luces sorprendentes incluso con elementos horizontales, que como ya hemos reiterado, son los menos apropiados para la consecución de grandes luces, ya que no hacen uso de la forma como herramienta estructural, para la optimización de la trayectoria de las cargas en su camino hacia el terreno. El pretensado se establece como un medio para el control de las sollicitaciones internas de la estructura, explotando a nuestra conveniencia las características intrínsecas del material.

Aunque encontremos intentos anteriores de introducir tensiones al armado, previas al fraguado, podemos considerar como padre de esta técnica y pionero en este campo, en la lucha por las grandes luces y el control sobre el comportamiento de la materia, a Eugène Freyssinet, quien arriesgó todo en la vida en pro del conocimiento, defendiendo una idea que cambiaría la humanidad y las concepciones espaciales. Los principios estructurales sobre los que trabaja, son aplicables a todas las escalas y situaciones, haciendo posible la adecuación de la estructura a los requerimientos proyectuales, como medio liberador de la estructura como conformadora del espacio.

Figura 3. Hangares gemelos del aeropuerto de Orly (Francia), obra de Eugène Freyssinet (1921-1923).

Una gran obra de Freyssinet, son los Hangares gemelos del Aeropuerto de Orly (1921-1923) (Figura 3), en los que los dirigibles que debía contener, definían las dimensiones y favorecían la utilización de una solución de hormigón armado, por resultar incombustible y de mejor comportamiento en caso de incendios. La cubierta de estos edificios estaba concebida como una lámina plegada, hecho que le permitía obtener canto suficiente para contener el antifunicular de las cargas, hecho también posible por la forma antifunicular de la sección de estos grandes espacios. Uno de los aspectos más sorprendentes de esta obra, es la gran delgadez de la lámina, cubriendo una sala de 86 metros de ancho, 60 de alto y 300 de largo con tan solo 9 centímetros de espesor, lo que en términos comparativos resultaría una relación espesor/luz menor de 1/1000, diez veces menor que en un huevo de gallina, que es 1/100. Así podemos ver como una obra de esta categoría solo es concebible teniendo en cuenta dos factores, la adaptación de la forma al esquema de cargas, al asumir la sección una forma antifunicular y desde el punto de vista del material. Al mismo tiempo emplea elementos de encofrado reutilizables, lo que optimizaba el proceso constructivo.

Una de las mayores ventajas del pretensado desde el punto de vista práctico, es la posibilidad de construir elementos horizontales de grandes luces sin problemas de fisuración, lo que amplía las posibilidades de diseño proyectual en el ámbito de la horizontalidad, las grandes luces a partir de este punto no son exclusivas de estructuras de cubiertas¹³, pudiendo soportar sobre ellas espacios habitables e incluso grandes edificaciones. Pero este control ejercido sobre las solicitaciones internas de la estructura, llevan asociado un dominio sobre las deformaciones, que es de vital importancia en obras tales como el Caixa Forum de Madrid (Figura 4). El empleo de grandes luces siempre ha supuesto un reto y el avance técnico en este campo un hecho liberador para el proyectista, que cuenta con más herramientas con las que plasmar físicamente las ideas espaciales. Así los avances surgen como hechos liberadores de las cadenas del pasado, abriendo nuevos horizontes a la creatividad y a la propiedad espacial, como adaptación a un conjunto de necesidades sociales.

El pretensado es un sistema que como hemos visto, busca controlar la forma de trabajar del material y por tanto como concepto universal, no se inscribe únicamente su empleo a elementos de hormigón, aunque resulte el caso más habitual. Estos principios podemos verlos en estructuras de madera, acero... Un ejemplo actual de ello serían algunas de las cubiertas ligeras de acero y vidrio realizadas por Schlaich Bergermann und Partner, como la Cubierta del Patio del Museo de Historia de Hamburgo (Figura 5), Alemania de 1989, en la que se disponen como radios de bicicleta cables que gracias a un tensado previo, garantizan el mantenimiento de la forma de la fina lámina de la cubierta, ya que sin este recurso, la fuerza del viento o cualquier variación del esquema de cargas, supondrían la deformación de la superficie y con ello el desplome de la estructura. Por su parte las construcciones de madera a semejanza de las de hormigón, gozan de una resistencia a tracción considerablemente inferior a la del acero, aunque en este caso si resistan perfectamente por sí mismas este tipo de esfuerzos. Por ello en escasas situaciones se suele utilizar esta solución como recurso de diseño, para que el elemento estructural de madera trabaje exclusivamente a compresión y elementos como las vigas de madera laminada trabajen en condiciones de seguridad, cuando las luces son de

Figura 4. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron y NB35 ingeniería (2002-2008).

¹³ Hasta la aparición del pretensado en su mayor parte, las estructuras de grandes luces no soportaban sobre ellas espacios habitables de consideración, exceptuando las soluciones de cerchas metálicas, que hacían posible que incluso en el interior de edificios en altura se generaran grandes espacios, tales como teatros.

dimensiones tales que no sean posibles sin la consideración de este tipo de esquemas de trabajo.

La ciencia de los materiales, es algo intrínsecamente ligado a toda actividad humana y por tanto todo avance sobre ella repercute, tanto en el conjunto de la sociedad, como en su percepción del medio. *“Difícilmente se encontrará una actividad humana donde los materiales no tengan un cierto protagonismo (...), los materiales nos facilitan la vivienda, la energía, el transporte, las comunicaciones, la salud y el bienestar.”*¹⁴ Por ello resulta de vital importancia el estudio de la ciencia de materiales, como principal factor involucrado en la evolución de las limitaciones técnicas que determinan el ámbito de lo realizable en arquitectura.

En la tabla anterior (Figura 6) vemos los materiales que han marcado un periodo en la historia de la humanidad¹⁵, discerniendo como con el paso de los siglos se ha pasado de la selección de materiales naturales, para su adaptación y empleo en la modificación del medio, evolucionando, gracias al conocimiento, en una transformación de las materias que nos proporciona la naturaleza, en otras que nos resultan más propicias. Dicho proceso ha sido considerablemente más patente desde el siglo XIX, gracias al fácil acceso a fuentes de energía abundantes que lo hacían posible. Ya durante el siglo XX, esta transformación de las materias primas ha llegado a un nuevo nivel, donde los materiales surgen de la investigación en la ciencia de materiales. Que mejor ejemplo que cuantos avances han surgido del silicio en la segunda mitad del siglo, dando lugar a una edad de oro, en la que el desarrollo informático ha posibilitado el acercamiento al análisis matemático preciso, el diseño virtual y la información y comunicación de conocimientos de forma casi instantánea, entre otros. Siempre resulta

Figura 5. Cubierta del Patio del Museo de Historia de Hamburgo (Alemania), obra de por Schlaich Bergermann und Partner (1989).

¹⁴ Fragmento del artículo de ELICES CALAFAT, Manuel *“De las cuerdas de cáñamo a los hilos de araña. La Ciencia e ingeniería de los materiales”*, Real Academia de Ciencias.

¹⁵ La tabla de las edades de la humanidad según los materiales, está basada en la desarrollada por Manuel Elices Calafat, ingeniero y físico español, además de profesor universitario de Ciencia de Materiales en la Universidad Politécnica de Madrid, aunque adaptada según mis criterios y conocimientos al campo de la arquitectura, al cual corresponde el presente estudio. En esta tabla se busca el entendimiento básico de los periodos del hombre según la ciencia de materiales. Por ello, las fechas no son exactamente en las que se descubrieron los materiales, sino en las que estos ejercen una influencia sobre el conjunto de la sociedad.

enriquecedora la búsqueda de la mariposa que originó los vientos de cambio, que nos han conducido hasta el panorama en el que nos encontramos. En ella no encontraremos verdades absolutas, pero sí pinceladas de un panorama que nos permitirá entender de dónde venimos y con suerte un ligero reflejo de lo que está por llegar.

Figura 6. Tabla de las edades de la humanidad según los materiales.

2. Delimitación temporal del ámbito de estudio del estudio evolutivo de las grandes luces

Cuando nos planteamos la necesidad de conocer las claves de la evolución de las grandes luces y por tanto de las técnicas constructivas y materiales que determinan el margen de lo materializable, es indudable la relevancia de los dos últimos siglos, durante los cuales los acontecimientos se han concentrado y desarrollado con una celeridad como en ningún otro momento de la historia. Por ello en la búsqueda de las claves que nos permitan comprender el camino seguido hasta la actualidad, que ha posibilitado el inigualable caldo de cultivo de las últimas décadas, el estudio se centrará principalmente en los siglos XIX y XX, aunque obviamente en algunos puntos es necesario remontarse a épocas más tempranas para encontrar las raíces de sistemas constructivos, técnicas o materiales, que es imprescindible conocer para entender de forma clara los procesos evolutivos, como redibujado continuo de los parámetros que interviene sobre la libertad de actuación del hombre, como limitación de lo posible en un lugar y un momento concreto de la historia. Pero antes de iniciar nuestro recorrido, es necesario entender la razón primigenia que justifica que en estos dos últimos siglos la humanidad haya podido evolucionar a un ritmo tan frenético. Esta razón es la presencia de los combustibles fósiles, como fuente de energía accesible y abundante, a la par que durante el siglo XX los subproductos de éste han adquirido una relevancia innegable, los plásticos hoy dominan nuestra vida, omnipresentes allá por donde vayamos, como una parte indisoluble de nuestro modo actual de vivir. Hoy en día damos los logros tecnológicos y el estado actual de la sociedad como un hecho lógico y propio de la evolución humana, como si residiera únicamente en su naturaleza, desatendiendo a la innegable influencia que el medio y nuestro conocimiento del mismo ejercen sobre nuestra evolución como marco único, en el que es comprensible nuestra sociedad, tal y como está constituida.

Para comprender la influencia de los combustibles fósiles en el estado actual de la arquitectura y la sociedad en su conjunto, debemos remontarnos a los orígenes de su influencia sobre la evolución tecnológica de nuestra especie. A lo largo de los siglos los logros técnicos han ido produciéndose a un ritmo lento. Un ejemplo de ello es el descubrimiento de los morteros de cal, como hecho fortuito, surgido en torno a las hogueras que hacía el hombre. En éstas se disponían círculos de piedra, rodeando las llamas. Muchas de estas piedras eran calizas, que al calcinarlas se deshacían en un polvo blanco, que al llover se endurecía nuevamente, hecho que con el tiempo condujo a la búsqueda de aplicaciones prácticas para este material. Pero pasó mucho tiempo hasta que en torno al año 5000 a.C., en la zona de Mesopotamia, en la ciudad de Catal Hüyük¹⁶, se empleara por primera vez en el campo de la construcción. No será hasta Egipto que realmente se use este material mezclado con áridos, para formar una masa que podamos llamar hormigón, empleando como aglutinante mortero de cal.

¹⁶La ciudad de Catal Hüyük hoy es conocida como Warka. En ella se encuentran los restos arqueológicos más antiguos encontrados del empleo de morteros de cal aplicados a la edificación.

Figura 7. Bajorrelieves de la tumba de Rekmire, 1435 a.C.

Un grandioso ejemplo del empleo del hormigón es la Gran Pirámide de Guiza¹⁷, ordenada construir por el faraón Keops, de la cuarta dinastía, materializándola el arquitecto Hemiunu en torno al 2750 a.C., en ese momento lo que interesaba de este primitivo hormigón era su capacidad para configurar grandes bloques de piedra artificial, siendo fáciles de transportar las materias primas, hasta la obra. Así los estudios de Guy Demortier no solo han demostrado este hecho, sino además el lugar de procedencia de algunos de los materiales, desde una zona cercana llamada Wadi Natrum, lo que explicaría que se pudieran cumplir los plazos que los historiadores han determinado que fueron empleados en su construcción, comprendidos en un margen de 20 a 30 años. Si bien a este respecto hay muchos escépticos, me gustaría recordarles que se han encontrado bajorrelieves en la tumba de Rekmire (Figura 7), que ilustran con total claridad el proceso de encofrado para la realización de bloques de hormigón¹⁸.

¹⁷ Los estudios realizados por Guy Demortier, vienen a demostrar con datos objetivos que los bloques de piedra caliza que conforman la Gran Pirámide, en realidad son de origen artificial, entre otros factores por el contenido en agua, estructura de las partículas, análisis químicos... Todos estos resultados se encuentran publicados en el artículo *"PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza"*.

¹⁸ A estas pinturas se le ha denominado *"Instrucciones de Rejmira"* y son consideradas uno de los primeros escritos de construcción de la historia. Clásicamente se ha interpretado esta pintura como un manual de construcción en adobe, pero resulta más lógica su interpretación como representación del proceso productivo de los bloques de hormigón, ya que aparece claramente el fuego en el proceso, no

Quien ha visto las pirámides en algún momento se ha planteado como se subieron los materiales para la construcción, Jean-Pierre Houdin ha dedicado su vida a responder esta pregunta y tras esa incesante labor parece haber llegado a una solución que corroboran las pruebas realizadas. Dicha hipótesis supone la construcción de una rampa helicoidal (Figura 8), que discurre por el interior de la pirámide, ajustándose a su perímetro¹⁹ y un sistema de contrapesos para alzar las inmensas moles de las piedras de granito de la cámara del rey y cámaras

Figura 8. Rampa interior de la gran pirámide, según las investigaciones de Jean-Pierre Houdin.

de descarga. Éste es indudablemente un gran logro técnico, pero a estas alturas prácticamente con lo único que se cuenta como fuente combustible es la madera y el carbón vegetal²⁰, continuando así por muchos años. Eso no impedirá que ya en el siglo II a.C., el Imperio Romano cimentara sus bases arquitectónicas sobre el empleo de muros, arcos, bóvedas y cúpulas, todas ellas realizadas en mortero de cal, aunque éste no quedaba directamente a la vista, sino que se empleaba piedra o ladrillo para conformar la piel de los paramentos²¹, funcionando a modo de encofrado perdido. Con estos medios se lograron realizar grandes obras, siendo de referencia el Panteón de Roma (Figura 9) del siglo II d.C.²², levantándose sobre sus grandes muros aligerados, una gran cúpula de 43,3 metros de diámetro, con un óculo de 9 metros en el centro. Esta obra fue el objetivo a superar durante milenios, como indican los múltiples

presente de la forma en que se muestra en la producción de ladrillos de adobe, mientras que es algo necesario en la obtención de la cal. Un ejemplo de aplicación de este material en esa época, son los techos de la Pirámide de Ounas, en los que hay huellas claras del desmoldeo entre bloques.

¹⁹Jean-Pierre Houdin en su teoría supone que por la rampa perimetral se subían grandes bloques de piedra, que se giraban en las esquinas, para continuar su ascenso por los corredores inclinados, pero como hemos visto, las pruebas recopiladas por Guy Demortier nos orientan a pensar que realmente no ascendían grandes bloques, sino ingentes cantidades de gente acarreando las materias primas para realizar los bloques de hormigón in situ, a excepción de los puntos singulares realizados en bloques de granito, que empleaban un sistema propio para su disposición definitiva.

²⁰Además existía el aceite empleado en lámparas, pero no podemos considerarlo una fuente energética en los términos que buscamos de influencia sobre el desarrollo tecnológico. Por su parte ya se conocía el petróleo, pero con aplicaciones prácticas que no le consideraban aun como fuente energética.

²¹Dependiendo de la disposición y papel estético jugado por la piedra y el ladrillo en la conformación de las superficies de los muros romanos, se pueden distinguir tres tipos: Opus Intertum, Opus Reticulatum y Opus Testaceum.

²²El primer Panteón fue realizado en el año 27 a.C., siendo destruido en el 80 d.C. y reconstruido entre el año 118 y 125 d.C. por Apolodoro de Damasco, conservando su denominación como Panteón de Agripa.

intentos posteriores, que no alcanzarían a rozar estas luces hasta la construcción de la cúpula de Santa María del Fiore (Figura 10) de Florencia en 1420. No debemos olvidar, que no será hasta el siglo XVIII cuando se inicie el consumo de carbón de coque, en sustitución del carbón vegetal, visto que el aumento de la demanda de éste resultaba insostenible y conducía irremediablemente a un proceso de deforestación masiva. En este momento se inicia el consumo de combustibles fósiles, como base para el desarrollo humano, siendo vital para alcanzar los avances logrados a lo largo del siglo XIX y XX así como el frenético ritmo de los mismos, que se han producido con mayor celeridad que en cualquier otro momento de la historia.

Figura 9. Panteón de Roma o Panteón de Agripa (Italia), siglo II d.C.

Figura 10. Santa María del Fiore, Florencia (Italia), obra de Filippo Brunelleschi (1420).

El consumo de carbón vegetal lo encontrábamos tanto en el uso doméstico, como en el industrial, englobándose dentro de este último el sector siderúrgico. Cuando Abraham Darby I, en 1713, sustituyó éste por el coque, por las causas ya comentadas, dio lugar a un nuevo tipo de hierro, empleado durante la Revolución Industrial. A este hierro al sucederse las décadas, se le fueron introduciendo avances, iniciándose además la producción de acero a nivel industrial, con Benjamin Huntsman, en 1740, que conocedor de los entresijos de la producción de acero, confeccionó su propio método, que aumentaba la producción a 34 kg por crisol y mejoraba su dureza. Así se sientan las bases para la Revolución industrial antes de llegar al meridiano del siglo XVIII, iniciándose una cadena de acontecimientos, que impulsaron la transformación social de finales de siglo y la producción seriada, lo que a principios del siglo XIX había introducido las estructuras metálicas, como una opción constructiva viable y una dirección en la que aunar esfuerzos para la superación de los límites espaciales del hombre. Durante el siglo XIX, se sucederán uno tras otros avances que incidirán en la mejora de las capacidades del hierro y el acero mejorando sus propiedades y métodos de producción, permitiendo que a comienzos del siglo XX los ritmos de fabricación resultaran vertiginosos. Así el hierro se configura como el motor del cambio a lo largo de todo el siglo XIX, haciendo posible la aparición de máquinas tan sorprendentes como las locomotoras, tan revolucionarias como el ascensor o impresionantes como los puentes suspendidos.

Si nos paramos por un momento en el ámbito de los puentes suspendidos, podemos ver como a lo largo del siglo XIX se producen una serie de saltos cualitativos de gran relevancia, que permitirían superar los rudimentarios puentes de cadenas, empleados en China desde fechas anteriores a 1667, cuando Anastasio Kircher los dio a conocer a occidente a través de sus dibujos (Figura 11). Este sistema permitía cubrir luces de unos 21 metros, límite superado ampliamente en 1808 por James Finley que empleando un sistema de cadenas que patenta

Figura 11. Dibujo de un puente de cadenas en China.

ese mismo año, logra salvar 93,26 metros, en el puente sobre las cataratas de Schuylkill, en Pensilvania (Estados Unidos). Un logro debido en buena parte a la calidad del material y los procesos de producción.

El siguiente salto de importancia se produce cuando se transforman los eslabones en barras, que unidas las unas a las otras conforman las catenarias de las que se descuelga el tablero. Esta reducción del número de elementos, permitió a la vez incrementar su resistencia y por tanto el rango de luces alcanzables, como en el caso del puente de Menai (Inglaterra), de Thomas Telford, que en fechas tan tempranas como 1815-26 logra configurar un vano central de 176,47 metros. Las implicaciones de este salto cualitativo van más allá del propio logro, permitiendo la conexión de una isla accesible hasta ese momento solo por barco. Ya estos puentes reflejaban las bases conceptuales del sistema constructivo, pero no será hasta la aparición de los cables formados por alambres trefilados, cuando se desvele el auténtico potencial de este esquema estructural. Así una máquina como la trefiladora, capaz que producir cables a partir de alambres de distintos diámetros, logra influir en el campo de la

Figura 12. Gran Puente de Akashi-Kaikyō (Japón, 1998).

arquitectura y de la ingeniería civil, ampliando los límites de lo realizable. Una de las figuras más representativas en este ámbito fue John Augustus Roebling, desde su trabajo innovando en la producción de cables. Éste tras un desgraciado accidente decidió dedicar su vida a la construcción de puentes. Una obra suya que todos conocemos hoy en día, es el Puente de Brooklyn, realizado en 1883, que logra construir un vano central de 483,31 metros, con un sistema de cables que descuelgan de una gran catenaria y parten de dos grandes pilas de piedra. Una proeza técnica que conducirá a muchas otras y que avance tras avance, hará posible que hoy en día tengamos obras tan sorprendentes como el Gran Puente de Akashi-Kaikyō (Japón, 1998) (Figura 12), que logra salvar un vano de 1.991 metros. Como vemos, las barreras espaciales de lo posible se han ampliado hasta márgenes que hoy hacen viable la materialización de prácticamente cualquier espacio imaginable.

Cuando centramos nuestra mirada en la espacialidad de la arquitectura, hay ejemplos que marcan un antes y un después en la sociedad. Este es el caso de la *Halle des Machines* (Figura 13), realizada por Louis Dutert en la Exposición Universal de París de 1889. Esta obra a finales del siglo XIX y sin emplear aun acero, constituida en su totalidad por piezas de hierro, logra materializar un espacio de unas dimensiones nunca vistas hasta ese momento, 116 metros de ancho, 420 de largo y 45 de alto, en cuyo interior las grandes maquinarias expuestas, representación de la tecnología punta del momento, se encontraban en un espacio a la altura de las circunstancias, mostrando las capacidades de los nuevos materiales y sistemas estructurales, como generadores de una nueva concepción espacial, cuyas limitaciones se encontraban en un escalafón superior a la de los sistemas estructurales clásicamente

Figura 13. Halle des Machines (Exposición Universal de París de 1889).

empleados. Esta sala de exposiciones sigue un esquema sobradamente conocido en aquellas fechas, el de las estaciones de ferrocarril, con una sucesión de arcos triarticulados, contruidos como cerchas trianguladas, formadas por barras de hierro, apoyando sobre éstas la cubrición, opaca en los laterales, dejando traslúcida la parte central, para la iluminación de la sala. Esta solución tipológica, probablemente sea la que mejor represente los tiempos de cambio y la introducción de nuevos elementos tecnológicos en la trama urbana y la consciencia social. A la influencia que esta obra tuvo sobre el panorama arquitectónico en cuanto a las posibilidades de la técnica para lograr espacios de grandes luces, hay que sumar que en esa misma exposición se realizó la Torre Eiffel, que ha perdurado hasta nuestros días y demostrado las capacidades resistentes de este material para la edificación en altura, con sus 300,65 metros de elevación²³. Así desde el ámbito más puramente técnico, se traduce en una acotación de los límites de lo posible y la determinación de una mayor libertad proyectual.

Como hemos podido ver, otro de los grandes avances en el siglo XIX que ha permitido cambiar en muchos aspectos nuestra visión del mundo, son los cables, cuyo origen se remonta a los trenes mineros, en la búsqueda de un mejor sistema para tirar de estos, de donde rápido dieron el salto a los tranvías y otras muchas aplicaciones, como puentes suspendidos, que superaban por mucho las luces alcanzables por sus antecesores. Otra de las aplicaciones de los cables fueron los ascensores, siendo estos un elemento que trascendería de sí mismo para cambiar la concepción de las ciudades, invirtiendo la valoración que se tenía de éstas, posibilitando el crecimiento en altura y la densificación de las urbes, frente a esquemas más extensivos. Esto demuestra que un pequeño cambio puede suponer un impulso transformador imparable, que modifique por completo nuestra percepción, como así ha ocurrido durante estos últimos siglos, más que en toda la historia anterior.

Todo lo visto hasta este punto, es posible solo gracias a la fuente energética de los combustibles fósiles y a los avances que lleva asociados en los medios de producción, tanto del propio material, como de los elementos con él contruidos. Uno de estos avances es el horno Martín-Siemens, que en 1864 revoluciona el mundo de la siderurgia, convirtiéndose rápidamente en el medio más común de fabricación de acero en Gran Bretaña y Estados Unidos en la última mitad del siglo. Éste podía alimentarse de aceite, gas de coquería, gas de gasógenos o una mezcla de gas de alto horno y de coquería, siendo la capacidad de estos hornos de hasta 500 toneladas. No será hasta 1900 que aparezcan los hornos eléctricos, que permitían la obtención de unos aceros de una pureza y dosificación perfectas, erradicando la presencia de impurezas, tales como el fósforo o el azufre. Además estos nuevos hornos hacían posible una perfecta dosificación de aditivos, para lograr aleaciones de acero. Estos avances tienen inexorablemente una amplia repercusión en el conjunto de la sociedad, influyendo desde los ámbitos productivos y la creación de nuevas máquinas, como los automóviles con motor de explosión²⁴, hasta la posibilidad de construir espacios de mayores dimensiones. Si bien es cierto, que la arquitectura no ha logrado alcanzar en la mayoría de los casos dichos

²³ La altura de la Torre Eiffel son 300,65 metros hasta la azotea, pero posteriormente se le añadió una antena con la que alcanza los 324 metros.

²⁴ Los vehículos movidos mediante motor de explosión ya empleaban como fuente energética subproductos del petróleo, tales como la gasolina y el gasoil.

límites espaciales determinados por la técnica, en el ámbito de la ingeniería civil sí se ha trabajado en el campo de la frontera de lo posible, ya que precisamente se ha caracterizado por encontrarse obras que, año tras año, buscan sobrepasar el límite de lo realizable, dibujando las nuevas líneas que definen lo que la materia y la técnica pueden ofrecernos para la resolución de los espacios que habitamos, arañando en cada obra hasta lo último que la materia puede brindarnos.

Si durante el siglo XIX el principal protagonista fue el carbón, durante el siglo XX y hasta la actualidad, lo es el petróleo. Esta sustancia era ya conocida desde tiempos remotos y sus aplicaciones han sido diversas, comenzando en Asiria y Babilonia como elemento para pegar ladrillos y piedras. Asimismo se empleaba para otros usos como calafatear barcos e incluso con fines medicinales. Ya desde el siglo IX se conocen gracias a Al-Razi métodos para procesar el petróleo, extrayendo subproductos útiles. En el siglo XVII se empiezan a perfeccionar los métodos de refinado, que llevan a aumentar el número de subproductos derivados de esta materia, encontrándose amplias aplicaciones en la creciente demanda de sustancias como aceites, requeridos por las máquinas de la nueva era, mejorándose a lo largo del siglo XIX todos estos procesos. En la segunda mitad del siglo XIX, se comenzaron a perforar pozos petrolíferos, como el realizado por Edwin Drake en Pensilvania²⁵, iniciándose en este punto la explotación masiva de este recurso finito, que pese a la consciencia de que resultaba agotable, se trató prácticamente como si fuera ilimitado hasta la década de los 70, momento en el que se supo que la producción nacional de Estados Unidos había tocado su techo, lo que llevó a una concienciación global de que dichos límites no solo eran reales, sino cercanos en el tiempo, lo que exigía que las presentes generaciones dieran una respuesta. Un esquema de crecimiento ilimitado como el establecido como base del sistema capitalista imperante, se vio que tenía fecha de caducidad. Aun hoy nos encontramos en esta era de los combustible fósiles, que a lo largo del siglo XX ha sido un caldo de cultivo extraordinario para la humanidad, en la cual el fácil acceso a múltiples fuentes de energía y productos derivados del petróleo, han permitido al hombre trabajar con gran número de materiales, que se han ido refinando y optimizando a lo largo de los años. Algunos de estos materiales son: los perfiles laminados de acero, el hormigón armado, el hormigón pretensado... o en cualquier otra de las numerosas presentaciones en las que la industria los emplea. Pero la situación actual resultaría inconcebible sin la presencia de los plásticos, un conjunto de materiales, subproductos del petróleo, surgidos de los esfuerzos investigadores realizados en las indagaciones de la industria armamentística, durante la Segunda Guerra Mundial. Sin los plásticos, resultarían inconcebibles buena parte de los objetos con los que convivimos a diario y aunque como material base para estructuras, no ha calado dadas sus capacidades resistentes, limitándose a piezas auxiliares de indudable valor funcional, como elastómeros, impermeabilizantes, pinturas..., entre otras aplicaciones presentes, que se hacen patentes en las diferentes partes que constituyen la edificación.

²⁵ El pozo petrolífero realizado por Edwin Drake en Pensilvania, en 1859, fue el primero perforado en los Estados Unidos.

En el mundo actual, nos encontramos con que la mayor parte de los elementos con los que convivimos son derivados del petróleo, estando introducidos en todos los campos de acción del hombre, ejerciendo una presencia global sobre la sociedad, influyendo sobre sus costumbres y forma de concebir el mundo. Pero si hoy la presencia de estos materiales resulta de gran relevancia, las investigaciones iniciadas durante la década de los 70, llevaron a la producción de fibras de carbono a partir de una brea surgida como subproducto del petróleo. Este nuevo material goza de una excelente resistencia a flexión, que lo configura como un camino de investigación hacia la aplicación práctica de los subproductos del petróleo, como materiales resistentes, aplicables en innumerables campos, entre ellos la edificación. A día de hoy algunos de estos nuevos materiales son las fibras de carbono²⁶, keblar, aramidas, grafeno, que aunque de forma tímida, se han introducido en la concepción cotidiana de la arquitectura como una solución más, con capacidades considerablemente superiores a las de los materiales que hoy empleamos, aunque de elevado coste y con algunas problemáticas particulares asociadas. Sin lugar a duda, estos elementos permitirán un significativo avance en el ámbito de las grandes luces, ya sea por la reducción de las cargas de peso propio o por las capacidades resistentes, que posibilitarán ampliar nuestros horizontes espaciales. Un ejemplo de ello es la

Figura 14. Fluid Vehicle Bus Station, Hoofddorp (Holanda), obra de NIO Architecten (2003).

²⁶ Las fibras son materiales compuestos, que presentan fibra (aporta la resistencia mecánica, rigidez y dureza) y matriz, pudiendo sumarse a estos dos, aditivos que den características particulares al elemento resultante. Las fibras pueden ser de origen mineral: como en el caso de las cerámicas (Carburo de Silicio, Aramida), las metálicas y las fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro). Además podemos encontrarlas de origen orgánico, como en el caso de la Aramida y Polietileno.

Fluid Vehicle Bus Station (Figura 14), realizada en 2003 por NIO architecten, una edificación completamente realizada con poliestireno y poliéster, siendo la estructura más grande realizada hasta la fecha completamente con materiales sintéticos derivados del petróleo. Esta obra demuestra las capacidades del material y la técnica, para moldear formas no desarrollables, con gran virtuosismo y capacidades resistentes, logrando unos resultados impactantes, que sorprenden al usuario. Si bien todos estos logros hacen augurar el inicio de nuevos tiempos en el campo de la arquitectura, estos cambios parecen orientarnos hacia una mayor dependencia del petróleo y sus subproductos, hecho poco deseable, dado que según indican algunos estudios, en pocas décadas la escasez de este recurso, hará cuando menos poco competitivos los elementos más dependientes de esta sustancia. Por lo tanto, debemos ver la arquitectura que está por llegar con los ojos de la sostenibilidad y la reducción de la energía neta necesaria para la realización de una obra, hecho en gran medida hoy desconocido, dado que la evaluación empleada es la monetaria y no el balance energético necesario para realizar los elementos constituyentes de un edificio. Ese punto será en unos años el que mida realmente la eficiencia de una actuación, conjuntamente con los consumos energéticos previstos a lo largo de su vida útil.

A día de hoy nuestra dependencia de los derivados del petróleo y en especial de los plásticos es absoluta, ya que se encuentran presentes en todos los sectores de la sociedad actual y sin ninguna sustancia conocida capaz de sustituirla de forma global. Sin duda cuando la producción mundial de petróleo decaiga, previsiblemente en las próximas décadas, el precio de los productos realizados en estas sustancias subirá y el reciclaje será de vital importancia para su uso continuado durante un periodo prolongado.

Ya hay muchos estudios que redundan en que la era de los combustibles fósiles se encuentra próxima a su fin, si bien como se ha dicho, el caso de Estados Unidos²⁷ en la década de los 70, fue la corroboración de la teoría del “*cénit petrolero*”, de Marion King Hubbert (1903-1989), quien a finales de 1949 realizó los cálculos, profetizando que Estados Unidos llegaría a ese

Figura 15. Diagrama del “*cénit petrolero*” de Estados Unidos, según el estudio de Marion King Hubbert en 1956.

²⁷ Estados Unidos sirve de referente mundial, ya que fue una de las primeras naciones en explotar de forma masiva las reservas de crudo.

punto entre 1965 y 1970²⁸ (Figura 15). En ese momento, cuando los Estados Unidos se percatan de la realidad de la situación, es cuando aparecen los primeros indicios de la necesidad de una reducción del consumo y la búsqueda de fuentes energéticas alternativas, surgiendo con impulso los paneles solares, sumada a clásicos como la eólica, hidroeléctrica y la geotérmica. Quedó claro que la tendencia de crecimiento ilimitado es insostenible en el tiempo, como así está ocurriendo con la población mundial, que durante estos dos últimos siglos, está creciendo sin control de forma exponencial, hasta el punto de percibirse claramente que los medios disponibles en el planeta son insuficientes para albergar una población mundial muy superior a la que de forma natural podría sustentar, explicándose la asunción de este exceso solo gracias a la presencia de los combustibles fósiles, que permiten entre otras cosas, una mayor productividad de los cultivos.

En 2008 la IEA (International Energy Agency) admitió que ya habíamos pasado el pico máximo de producción mundial de petróleo, encontrándonos en el periodo de caída, que avisa del inminente fin de un recurso escaso como el petróleo, en tan solo unas décadas (Figura 16). Este hecho nos debe animar a promover las energías renovables, como la hidroeléctrica, eólica, solar y geotérmica, como alternativas, que si hoy ya están plenamente establecidas, no representan más que un pequeño porcentaje del total²⁹. Por otra parte los nuevos materiales

Figura 16. Gráfico de la brecha creciente entre descubrimiento de yacimientos petrolíferos y la producción.

²⁸ Marion King Hubbert pronosticó que Estados Unidos llegaría al máximo de su producción en 1970, llegando realmente este punto en 1971, lo que llevó a la concienciación de que su teoría era acertada. Dicha teoría establecía una gráfica de la explotación petrolífera, siguiendo el esquema de una campana de Gauss, en la que se tarda por lo general 40 años en llegar a la producción máxima y otros tantos años hasta su total desaparición.

²⁹ Ejemplo de ello es que en el año 2010 en España el 13,8% de la energía consumida procedía de fuentes renovables, teniendo como objetivo alcanzar el 20% para 2020. Pero Suecia en el año 2010 ya había alcanzado el 49,1% de energía procedente de fuentes renovables. La tendencia actual va en la línea de la sostenibilidad de la producción energética, mientras que la independencia de los subproductos del petróleo se augura más difícil, optándose por el reciclaje de estas sustancias. Todos estos datos se encuentran publicados en el Informe de la Comisión Europea, realizado en Bruselas en el año 2013: *"Informe de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Informe de situación sobre la energía renovable"*.

derivados del petróleo, dependerán en buena medida del reciclaje y la conservación de los recursos, rigiendo sobre todo, un uso responsable de las materias primas. El punto de inflexión que está por llegar en la sociedad, no tiene que significar tanto la ruptura con cuanto conocemos, sino un cambio de la concepción social, de nosotros mismos y nuestro papel en la tierra. Pasar de comportarnos como parásitos de nuestro medio, a una simbiosis real. Así el tope del consumo no debe asociarse ya a la demanda, sino a las capacidades productivas del medio, balanceando las distintas producciones hasta alcanzar un equilibrio sustentable en el tiempo.

Un hecho curioso, que el tiempo ha demostrado una realidad inexorable en nuestra sociedad, es que cuando nos dicen que gastemos menos y nos orientan a consumir productos más eficientes, pongamos por ejemplo los coches híbridos, (como ha venido sucediendo durante la última década), esto no supone un efecto real sobre la conservación de los recursos, como ya demostró en el siglo XIX el economista inglés William Stanley Jevons (1835-1882), quien cayó en la cuenta de que las máquinas de vapor más eficientes no llevaron a una reducción del consumo de este recurso, sino por el contrario a su mayor utilización, dado que lo hacían

Figura 17. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog& De Meuron (2002).

más económico y competitivo frente al resto de alternativas, favoreciendo su empleo. Por esto mismo hay que buscar nuevos caminos, que contemplen un alejamiento del empleo de estas sustancias finitas y no meramente ajustes sobre los existentes, que se centran en disminuir el consumo de algo que es cuestión de tiempo que deje de ser accesible con tales fines.

Si bien hemos logrado materializar grandes espacios, que retan la gravedad y parecen a los ojos del espectador casi ingravidos, llegando otros a parecer firmamentos artificiales, no debemos olvidar que todo ello es posible por la presencia de los combustibles fósiles. Obras tan impresionantes como el Caixa Forum de Madrid (Figura 17), en las que se retan los conceptos tradicionales del equilibrio ante los ojos del espectador, solo son posibles gracias a los medios de cálculo y diseño de los que hoy disponemos, sumando a todo ello las técnicas constructivas como el pretensado, que permiten el control de las sollicitaciones internas de los elementos estructurales, así como las deformaciones de los mismos, conocimientos y valores que van más allá de la dependencia de una sustancia para su realización y que auguran su continuidad en el tiempo, por caminos que permitan la independencia de estos de los combustibles fósiles. Pero el mayor interés se encuentra en los conocimientos que hemos adquirido, y que nos permiten comprender las leyes que rigen en el interior de las estructuras, siendo en estos donde se encuentra la respuesta de cualquier arquitectura que esté por venir, más allá de los materiales y sustancias que intervengan en su conformación. Podríamos decir que: *“La energía ha determinado el desarrollo y la supervivencia o muerte de las civilizaciones. La civilización industrial se ha construido gracias a los combustibles fósiles y, en especial, al petróleo, por tener una alta densidad energética, ser fácilmente extraíble, manejable y transportable. Las guerras del siglo XX han sido movidas en gran medida por el control del petróleo y las perdieron aquellos países que no pudieron asegurar un flujo suficiente del mismo...”*³⁰

Desde los años 70 se ha ido produciendo una concienciación global, sobre la relevancia de los combustibles fósiles en nuestra forma actual de habitar y concebir el mundo, acuciándose en mayor medida durante estos últimos años, marcados por una crisis generalizada del modelo económico mundial y aumento continuo del precio de los carburantes. Indudablemente hoy ya existen alternativas al modelo social basado en los combustibles fósiles, aunque aún está por determinar el camino hacia la independencia de estos, que a día de hoy se augura más cercano al reciclaje y reutilización de los derivados del petróleo, que a una alternativa real. Por lo que respecta al campo de la construcción, gracias a esta época dorada de la energía barata y accesible, ha sido posible realizar unos avances sustanciales, que han llevado el horizonte de lo realizable a unas dimensiones nunca vistas. Un ejemplo de este avance continuo de los dos últimos siglos, lo encontramos en las luces máximas alcanzadas por los puentes suspendidos, que pasando de las cadenas a las barras y después a los cables, han aumentado en 200 años de luces de 20 metros a luces cercanas a los 2000 metros³¹. Se han multiplicado por 100 las luces alcanzadas en un sector (Figura 18), el de la ingeniería civil, que siempre ha representado el

³⁰ Cita sacada del artículo de Roberto Bermejo Gómez de Segura, *“El fin de la era de los combustibles fósiles. Sus consecuencias”*.

³¹ Nos referimos al Gran Puente de Akashi-Kaikyō (Japón, 1998), que dispone de un vano central de casi dos kilómetros, (1.991 metros).

reto por transformar el mundo, en infinitud de momentos rozando, por unas u otras causas, el límite de lo realizable. Sin duda, se proseguirá en la búsqueda de ampliar nuestras opciones constructivas, para la superación del reto a la gravedad, como en el citado Caixa Forum de Madrid, en el que la edificación levita, como en los sueños del arquitecto que lo ideó. Y materiales como la fibra de carbono, el grafeno, las aramidas, el keblar... supondrán el caldo de cultivo de los espacios del siglo XXI, pero vistas con los ojos de la sostenibilidad y la conciencia global de nuestra situación, que tanto se ha echado en falta en décadas anteriores de excesos. Nos corresponde a todos hacer un esfuerzo de responsabilidad y reflexión, en la búsqueda de aquellas opciones que redunden en un consumo responsable de los recursos que nos da la tierra, con vistas al futuro que está por llegar y el convencimiento de que la anterior era de excesos ha pasado. El mañana pertenece a aquellas arquitecturas que basadas en la razón, otorguen sentido a cada acción y optimicen los esfuerzos proyectuales hacia una nueva visión del espacio, más pura y cargada de significaciones, como decía Ludwig Mies van der Rohe *"menos es más"*.

A lo largo de las siguientes páginas, se pretende realizar un acercamiento a las claves técnicas que han definido la evolución del margen de lo realizable durante los dos últimos siglos, en la búsqueda de los principios técnicos y proyectuales que justifican el panorama actual de la

Figura 18. Tabla de la evolución de las luces máximas alcanzadas en puentes suspendidos durante el siglo XIX y XX.

construcción, así como las claves de aquellas vías que se abren ante nosotros y que con la perspectiva de la historia, podemos atisbar como claves de la arquitectura del siglo XXI.

3. Implicaciones ligadas al análisis histórico y contemporáneo de las grandes luces

El presente estudio parte de un interés personal por el entendimiento de los entresijos que hacen posible la materialización de los grandes espacios de la arquitectura, que retan a nuestro sentido del equilibrio, estableciendo un claro desafío gravitatorio. Para poder comprender cuanto hoy en día acontece, es imprescindible conocer la historia y el recorrido de técnicas, materiales y conocimientos, que nos han permitido alcanzar el punto en el que nos encontramos, como parte de un sendero que continúa hacia el futuro, con cambios que hoy ya se dejan intuir. Por consiguiente, el primer punto establecido como objetivo de la tesis, es la organización de conocimientos hoy dispersos, en una línea temporal que permita enlazar hitos de especial interés, ya sean descubrimientos, obras... que marquen aquellos puntos en los que la técnica ha posibilitado un incremento de las luces alcanzables. Todo ello, en aras de lograr un mayor entendimiento de la producción arquitectónica actual, enmarcada en el ámbito de las grandes luces y un intento por definir las pautas que requieren su aplicación, tanto con procedencia, como con una mayor eficacia, que permitan establecer el marco de la espacialidad arquitectónica propia del siglo XXI.

La contemporaneidad de una obra, se mide por su implicación con los márgenes en los que se desarrolla y por ello, el estudio de las grandes luces como herramienta proyectual, es vital para entender la concepción de la espacialidad propia de este tiempo, donde la libertad de los márgenes de actuación ha sufrido un impactante crecimiento en las últimas décadas.

Como dijo Albert Einstein, *“Aquel que alcanza la alegría del entendimiento ha ganado un amigo infalible para la vida. El pensar es al hombre lo que volar a los pájaros. No sigan el ejemplo de las gallinas cuando podrían ser una alondra”*³². Así el conocimiento de los condicionantes técnicos y la concepción de la espacialidad de los proyectos de grandes luces, se convierten en una herramienta para la propia concepción de la arquitectura futura y una vía para la reflexión arquitectónica.

³² Carta enviada por Albert Einstein, dirigida a estudiantes brasileños del Colegio Anchieta el 24 de junio de 1951. Texto original:

“Wer die Freude um Begreifen kennen gelernt hat, der hat einen nie versagenden Freund fürs Leben gewonnen.

Das Denken ist für den Menschen, was das Fliegen für die Vögel. Nimm Dir von diesen nicht das Huhn zum Vorbild, wenn eine Lerche aus Dir werden kann.” (Für die Studenten von Anchieta College, Brasilien).

Marco temporal del estudio y estado del arte

Como ya se ha mencionado con anterioridad, para desarrollar este discurso es imprescindible el establecimiento de un margen temporal, que por diversas causas se delimita en los siglos XIX, XX y XXI, ya que en este periodo la concentración de los avances que han establecido un cambio en el entendimiento espacial, ha sido la mayor de la historia.

Con anterioridad al siglo XIX encontramos diversos hechos y obras de gran interés en esta materia, tales como el Panteón de Roma, como logro espacial sin parangón. Obras como ésta, sirvieron de aliciente para la superación de las barreras dimensionales impuestas por la materia y la técnica.

Por su parte, la arquitectura gótica es un referente en la búsqueda del entendimiento de las reglas que regulan el funcionamiento estructural. La arquitectura gótica, aún sin medios suficientes para explicar el comportamiento resistente de las estructuras, basándose en los conocimientos adquiridos por la experiencia colectiva de las construcciones anteriores, tanto exitosas, como fallidas, busca el establecimiento de unas reglas. Los tratados de construcción son un claro intento de demarcar los límites dimensionales alcanzables y las reglas que permiten mantenerse dentro de dicha demarcación con unas ciertas garantías de estabilidad.

La arquitectura gótica busca la optimización del uso del material, estableciendo los límites dimensionales alcanzables. Pero pese a la existencia de obras y hechos sumamente interesantes, todos ellos se basan en sistemas compresivos, única opción con un material como la piedra, muros de fábrica u hormigón en masa. Surgiendo a finales del siglo XVIII el hierro como material estructural capaz de resistir tracciones³³, lo que modifica por completo las reglas del diseño empleadas hasta ese momento. Así la aparición de un material capaz de soportar esfuerzos tractivos es el detonante del cambio, estableciendo el siglo XIX como el comienzo de una sucesión de transformaciones que revolucionan el panorama arquitectónico, ampliando sobremanera los márgenes de lo posible. Este hecho supone una modificación radical en la concepción espacial, lo que claramente influye en la proyección arquitectónica, marcando el comienzo del campo de estudio de la presente tesis.

Los avances en los materiales, la técnica y el cálculo, suponen la esperanza para la superación de las barreras dimensionales y por tanto para los avances en la concepción espacial de la producción arquitectónica. Por más que se han ampliado los rangos de luces alcanzables, se ha demostrado que siempre queda un horizonte más lejano, que alienta a continuar el esfuerzo experimental. Por amplia que hoy resulte nuestra capacidad y control sobre la materia en la concepción de grandes luces, aún queda por delante un largo camino, ligado, en gran medida, a los materiales que hoy se encuentran en una fase experimental.

Ha de ser objeto de estudio, cuanta influencia han supuesto los avances en los comentados campos, a la hora de la concepción espacial de la arquitectura. Por lo tanto, es necesario un

³³ Anteriormente estaba la madera, empleada tanto en vigas que funcionaban a flexión y cerchas en cubiertas. Pero como material natural que es, está limitado a las dimensiones de los troncos disponibles, lo que en el caso de vigas horizontales establecía unos márgenes de unos 10 a 11 metros, siendo superiores las luces alcanzadas con las cerchas.

análisis histórico de la evolución de las grandes luces en función de factores como: el material, la técnica y el cálculo.

Para acometer el estudio histórico es imprescindible hacer referencia a algunos de los grandes historiadores que han sabido reflejar el panorama arquitectónico de los últimos siglos, como son: Peter Reyner Banham, Sigfried Giedion, Bruno Zevi, Heinrich Wölfflin, Wilhelm Worringer, entre otros. Así su labor sirve de referencia para el presente estudio, pero se busca al tiempo una visión alternativa a estos, centrando la atención en la influencia de las capacidades materiales, técnicas y de cálculo sobre la producción arquitectónica, tanto en referencia a los márgenes dimensionales, como a la libertad de actuación que incide sobre los procesos de proyectación. Figuras como Rafael Guastavino Moreno, Antonio Gaudí, Eduardo Torroja Miret, Luis Moya Blanco y Félix Candela Outeriño, muestran la evolución de la espacialidad arquitectónica en base al aprovechamiento de los conceptos técnicos, que permiten la conformación de grandes luces durante los dos últimos siglos. La espacialidad arquitectónica y su evolución se encuentran intrínsecamente ligados a los medios resolutivos, es una realidad innegable cuyo estudio resulta ineludible para la comprensión del panorama actual. Así, resulta explicable la trascendencia de la colaboración entre arquitectos e ingenieros en el panorama actual cuando se trata de lograr obras que trascienden la cotidianidad.

Razones que justifican la presente investigación

Con el paso de los años se han ido ampliando los rangos dimensionales disponibles a la hora de la producción arquitectónica. Este hecho es de vital importancia a la hora de entender el diseño de un amplio rango de arquitecturas, algo que el tiempo y la variación de los condicionantes ha hecho sumamente variable, resultando imprescindible para comprender el proceso de ideación del proyecto.

Siendo el objeto de la presente tesis el análisis de la concepción de las arquitecturas de grandes luces en el marco arquitectónico actual, haciéndose imprescindible extender el análisis al margen temporal citado anteriormente. Esto permite adquirir conciencia del camino recorrido, que ha conducido hasta el estadio actual, desvelando algunas de las claves para su comprensión. Ha de entenderse toda arquitectura como respuesta a un tiempo y los condicionantes que a él se asocian. Así se puede acometer el estudio de la influencia de la capacitación técnica en la producción e interpretación del reto gravitatorio en la arquitectura representativa contemporánea. Un estudio que busca entender el papel de las grandes luces en la arquitectura actual, tanto como reto espacial, así como recurso expresivo que pone un énfasis en la obra.

La arquitectura y su espacialidad como reflejo de un tiempo, es un concepto vital a la hora de comprender y más en las últimas décadas, arquitecturas que tan solo unos años antes hubieran resultado impensables. Así mismo, otras anteriores pueden percibirse claramente como resultado directo de las limitaciones que llevan impuestas, solo concebibles desde la libertad de diseño actual, como resultado de las circunstancias que las rodearon y con ello como respuesta a un marco concreto. Este campo de investigación no ha sido tratado con

anterioridad con suficiente profundidad, por lo que resulta de interés su estudio desde varios puntos de vista:

- Primeramente ha de establecerse un contexto histórico, que clarifique la evolución que ha sufrido la técnica y la arquitectura de grandes luces. Esto es primordial, ya que para ser plenamente conscientes del presente, ha de conocerse el pasado y en estos momentos esta visión técnica de la evolución arquitectónica se encuentra dispersa, sin un compendio suficiente, que permita una visión clara de conjunto. Por ende, éste es uno de los objetivos de la tesis, reflejando una *“historia de la evolución de las soluciones y su impacto sobre los márgenes dimensionales y libertades constructivas”*. Si bien la amplitud del campo de estudio hace inviable abarcar la totalidad de los acontecimientos que resultan de interés para el estudio, si se tratarán aquellos puntos de mayor relevancia y ejemplos ilustrativos para el entendimiento de los condicionantes históricos y las capacidades de la creación del hombre en momentos concretos. Dentro de esta línea de investigación tienen especial relevancia las producciones en hierro, acero, hormigón armado y hormigón pretensado. En el estudio de la evolución de los límites dimensionales, se percibe cómo en el siglo XIX los límites de la técnica residen en el ámbito de la ingeniería civil, alejándose cada vez más de los rangos dimensionales justificadamente empleados en arquitectura. Así en arquitectura, en el siglo XIX, se sustituyen los *“límites técnicos”*, por *“límites funcionales”*, ampliándose paulatinamente el número de opciones resolutorias y el marco dimensional alcanzable con cada una de ellas. Por ello, los puentes son un ámbito de análisis vital, ya que es donde los diversos materiales y técnicas ven su límite dimensional superior y se establecen referencias resolutorias extrapolables a la arquitectura, que responde a problemáticas más complejas.
- En segundo lugar, se contempla el análisis de la situación actual, desde el punto de vista de la influencia de la capacitación técnica en la producción e interpretación del reto gravitatorio en la arquitectura representativa contemporánea. Se busca la definición del papel de las soluciones de grandes luces en la producción arquitectónica actual. Para ello ha de establecerse un análisis taxonómico de la producción arquitectónica, para clarificar las particularidades de cada tipo de solución y el impacto que produce. Así este análisis se basa en consideraciones geométricas, tanto desde la percepción exterior de la edificación, como desde el interior, ya que precisamente la lectura de la obra y sus particularidades son el principal tema de discusión. Hoy el panorama técnico permite prácticamente cualquier tipo de resolución, por lo que es necesario un acto reflexivo sobre la procedencia y alcance de las decisiones proyectuales. Así el estudio de las grandes luces como recurso expresivo en la producción arquitectónica actual, es uno de los principales objetivos del estudio.

La presente tesis pretende ser el germen que dé fruto a otras líneas de investigación, que partiendo de los conocimientos que en ésta se estructuran, amplíen los conceptos expuestos y planteen un nuevo campo de investigación centrado en la *“evolución arquitectónica producida en función de los avances de la técnica”*, como contraposición a la clásica visión de la evolución histórica de la arquitectura ligada a cambios estéticos. Ambas visiones nos ofrecen una percepción más exacta de la historia, que hoy aparece incompleta por la falta de consideración

de los factores técnicos. Este hecho se vislumbra claramente en los programas docentes de la enseñanza de la arquitectura, que centran el análisis histórico de ésta en términos estéticos, dejando el campo de las estructuras, reducido a los medios de cálculo aplicables en la actualidad, sin un contexto histórico que permita ver la relevancia de los avances en este campo, que sin lugar a dudas han sido el principal factor revolucionario de las concepciones espaciales.

En términos globales, el objetivo de la tesis, así como el pensamiento que me condujo a su realización, es la puesta en valor del marco capacitivo, definido por los materiales, la técnica y los medios de cálculo, tanto en la producción arquitectónica actual, como a lo largo de la historia. El presente estudio busca suscitar un interés que conduzca a que ésta no sea una tesis cerrada, sino el comienzo de una línea de investigación cuya atención es necesaria, no solo desde un esfuerzo individual, sino desde el conjunto del mundo docente, que le otorgue a esta rama del conocimiento el lugar que se merece dentro del ámbito académico.

Objeto del estudio

El presente estudio, requiere primeramente el establecimiento de una teoría de la *“evolución arquitectónica producida en función de los avances de la técnica”*, con la extensión precisa para la determinación de aquellos factores principales para la comprensión de dicha problemática, la cual se plasma en el Tomo II (Anexo). Dada la extensión conceptual del campo de estudio, no pretende ser en ningún momento un repertorio completo de las obras y hechos de relevancia, sino un cuerpo doctrinal que pueda servir para la estructuración de posteriores estudios que vengan a completar temas, que en muchos casos serán meramente citados en el presente texto. Así este estudio nace, tanto con un interés por clarificar la evolución de la espacialidad arquitectónica desde las estructuras, como en un ámbito propositivo, constituirse como el germen de un campo del conocimiento histórico, relegado habitualmente a un segundo plano.

A lo largo de toda la historia, el factor dimensional de las edificaciones ha simbolizado el reto ante la naturaleza y la capacidad previa del hombre, este pensamiento ha conducido a la producción de obras sorprendentes y un incremento paulatino del conocimiento resistente, hasta el siglo XIX. En este punto, con la incorporación del hierro como material estructural, la producción arquitectónica sufre un salto cualitativo, superando los márgenes dimensionales realizables mediante los materiales naturales. El hierro, el acero, el hormigón armado y el hormigón pretensado, todos materiales artificiales y en constante evolución, han marcado estos dos últimos siglos y con ello las líneas evolutivas que han influido en la concepción proyectual. Así, el hombre a lo largo de toda la historia, solo ha actuado con libertad dentro de los márgenes que el marco capacitivo le ha permitido. Desde esta perspectiva, se leen las obras a través de la capacidad resolutive. Este proceder permite entender la producción arquitectónica actual desde un nuevo punto de vista, así muchas obras contemporáneas, hace escasas décadas, estarían más allá de la frontera de lo realizable.

Una de las principales vías de estudio, es el discernimiento de la influencia de los materiales y la técnica, así como los medios de análisis, en la evolución conceptual de las grandes luces, como paso necesario para el estudio del panorama actual de este tipo de arquitectura. Solo desde la consciencia del conocimiento adquirido a través de los siglos, en los distintos ámbitos

que condicionan la labor reflexiva de la proyectación, se puede lograr una comprensión de las leyes que recaen bajo las decisiones adoptadas. El conocimiento no puede ser desaprendido y por eso mismo, modifica irreversiblemente nuestra visión del mundo y nuestra forma de concebirlo y “proyectarlo”. Este hecho condiciona nuestra lectura del entorno, por lo que la interpretación de las obras existentes, ha de estar ligada a dicho conocimiento del marco técnico que posibilitó y condicionó su realización.

Con la base doctrinal y la perspectiva del estudio histórico, se puede establecer una taxonomía proyectual de la producción arquitectónica de grandes luces en el panorama actual, dentro del ámbito de lo que se podría considerar, arquitectura representativa contemporánea. Los factores determinantes de la diferenciación taxonómica no han de ser funcionales o atendiendo a soluciones técnicas concretas, sino en base a las decisiones relacionadas con el proceso de concepción y particularmente con el impacto que la obra produce sobre los usuarios. En este proceso se distinguen múltiples líneas de actuación, con finalidades y medios resolutivos claramente diferenciados, que pueden clarificar los condicionantes derivados de las decisiones adoptadas de partida. Este esfuerzo está destinado a clarificar consideraciones, que presentes en el ámbito de la ideación proyectual, no se han estimado globalmente, evaluando el abanico de posibilidades y el impacto de cada una de las opciones.

La actividad del arquitecto se caracteriza por un nivel de complejidad, que hace inviable una sistematización, como la producida en otros sectores de la ciencia. Los tipos definidos desde el análisis taxonómico, no son nunca modelos cerrados e inconexos, apareciendo habitualmente en un mismo proyecto varios de ellos, coordinados para la configuración de la obra.

El título de la presente tesis es *“El desarrollo de las grandes luces en la arquitectura actual: Influencia de la evolución técnica en la producción e interpretación del reto gravitatorio de la arquitectura contemporánea”*, no es un título fortuito, sino la muestra de un profundo interés por la contemporaneidad y la comprensión del margen en el que se desarrolla la actividad del arquitecto en la actualidad. Esto requiere primeramente el citado estudio histórico, que establezca el margen para la comprensión de la producción arquitectónica actual. Pero al mismo tiempo exige una profunda reflexión sobre la taxonomía de los proyectos de grandes luces en la actualidad, no desde un punto de vista material o dimensional, sino desde factores relativos a su propia concepción. Este hecho permite el discernimiento de los procesos de pensamiento asociados a la proyección de espacios de grandes luces, definidas éstas como aquellas que más allá de un valor numérico, materialicen en sus distintas versiones el reto gravitatorio. Así, una obra como la Casa de Burdeos de Rem Koolhaas, de pequeñas dimensiones, entra dentro de esta catalogación, pero en términos generales se analizarán obras de mayores dimensiones³⁴, tales como aeropuertos, estadios deportivos y diversas tipologías edificatorias, que emplean el reto gravitatorio como forma de expresión.

³⁴ Aunque la definición del ámbito de las grandes luces, tal y como se trata en la presente tesis, no se puede coartar a unos límites dimensionales concretos, si hubiera de establecerse un marco dimensional de referencia en la actualidad, podrían considerarse aquellas obras que superan los 30 metros entre medios de sustentación o los 10 metros en voladizo.

Asociado a esta reflexión de la situación actual, indisociablemente ha de ir el análisis de algunos proyectos que vengan a ejemplificar varios puntos:

- Que toda obra que se considere “*contemporánea*” está por definición ligada al marco técnico que la ha dado lugar. Esto enlaza la arquitectura con el tiempo y permite que ambos resulten indisociables a la hora de su comprensión.
- Las grandes luces son la punta de lanza de la experimentación técnica y espacial y por ello son el mejor reflejo del estadio arquitectónico asociado a un tiempo.
- Las grandes luces, no solo son una herramienta ligada a la producción de espacios como respuesta a una problemática funcional, sino una parte vital del lenguaje arquitectónico. Un lenguaje que juega con metáforas gravitatorias y la percepción del usuario, buscando generar una respuesta de una intensidad, como pocos factores arquitectónicos logran suscitar. Por ello las referencias “*históricas*”, así como la ausencia de éstas, son de vital importancia a la hora de evaluar la lectura proyectual.

Así mismo la reflexión sobre las implicaciones de las grandes luces en la actualidad, lleva ligada la meditación sobre el papel de éstas dentro de la producción arquitectónica contemporánea. El papel de este tipo de obras dentro de la lingüística arquitectónica actual, es resultado del camino recorrido y la base para el entendimiento de la arquitectura futura, como parte de un panorama en incesante cambio, pero que sigue unas pautas reconocibles, que hacen factible ver las líneas de trabajo que mejor se adaptan a los tiempos y por ello serán de mayor relevancia a medio plazo.

Si bien como se ha comentado, este trabajo nace con la intención de suscitar mayores estudios del ámbito arquitectónico desde un punto de vista técnico y estructural, se propone dar una nueva visión sobre los procesos implícitos en la asunción de los cambios técnicos en el sector de la construcción. Todo ello en aras de afrontar con mayor eficacia y conocimiento de causa, la incorporación de las innovaciones implícitas en el cambio de siglo, aprovechando en mayor medida las posibilidades que brindan.

Otro punto clave ligado al margen temporal actual, son las consecuencias de la mayor libertad de la que se goza para la producción arquitectónica. Este hecho modifica la limitación física al diseño, por una reflexión ligada a la procedencia de los medios empleados. Hoy la crisis del sector ha puesto de manifiesto que el factor económico, si siempre fue de vital importancia para el entendimiento del proceder constructivo, hoy es una auténtica labor moral. En definitiva “*hacer más con menos*”, aunque sin dejar de lado las herramientas de diseño espacial y recursos ligados a la contemporaneidad, de no ser así pasaríamos a construir edificios de tiempos pasados, que si bien son mayoría, no suelen suponer un aporte a la concepción espacial y el entendimiento de la arquitectura del siglo XXI, en los términos que proceden.

El conocimiento del panorama actual de las arquitecturas de grandes luces es vital, teniendo en cuenta que es el grupo resolutivo más intrínsecamente ligado a la contemporaneidad. Este conocimiento ha de enfocarse, tanto desde la historia evolutiva, como desde el análisis y catalogación de la producción arquitectónica actual. Se ofrece así, una visión esclarecida del

panorama contemporáneo, haciendo posible acometer desde el conocimiento y la consciencia, este tipo de resolución arquitectónica, puesto que un mayor conocimiento del pasado y el presente, nos permite forjar un mejor futuro. Así hoy, ya se vislumbran algunas de las posibles líneas que tejerán la arquitectura propia del siglo XXI, que al igual que ha ocurrido en los dos siglos anteriores, encuentran sus raíces en el siglo que los precede.

Implicaciones del análisis contemporáneo

Cuando realizamos un estudio histórico, el tiempo transcurrido nos otorga perspectiva y criterio para la determinación del valor de las obras y su impacto en el panorama arquitectónico. Pero el análisis de obras de reciente producción no goza de tales ventajas, por lo que los criterios de mayor aplicación son, tanto el impacto de la intervención a nivel social, como las características técnicas y funcionales, que nos permiten poner en valor cuestiones proyectuales ligadas a los procesos de pensamiento que las dieron lugar. Así mismo, como se ha comentado, hoy los límites espaciales se encuentran condicionados en mayor medida por la racionalidad constructiva y proyectual y el factor económico como parámetro que define las soluciones viables.

El estudio de obras recientes no cuenta con las ventajas que otorga el paso del tiempo para su estudio, pero sí con la cercanía a las circunstancias que rodean su producción y por lo tanto, a la implicación de estas obras con un tiempo y los aportes que pueden ofrecer dentro del panorama arquitectónico. Factores vitales para poner sobre la mesa los valores puestos de manifiesto en la espacialidad arquitectónica actual y las líneas que se abren para la producción de la espacialidad propia del siglo XXI, siendo un atisbo del siglo que hoy empezamos a construir, aún con las herramientas heredadas, pero que pronto demostrará tener las suyas propias.

II. ÁMBITOS HISTÓRICOS CLAVE SOBRE LOS QUE SE FUNDAMENTA EL PANORAMA ACTUAL DE LAS GRANDES LUCES

A lo largo de toda la historia el condicionamiento técnico ha marcado los márgenes de actuación del hombre, dentro de los cuales ha establecido su posicionamiento espacial, estético y conceptual. Obras como el Panteón de Agripa, marcaron hitos en la producción del hombre, que le indujeron a superar las barreras previamente establecidas. En este caso concreto, con un impacto que mantuvo al hombre durante siglos intentando recrear nuevamente tal gesta dimensional. Las formas góticas son ante cualquier consideración estética, una adaptación resistente de la forma a la transmisión de las cargas. Hoy comprendemos que tal adaptación, responde a la aproximación al antifunicular de las cargas, para evitar la aparición de las tracciones que las estructuras de fábrica son incapaces de soportar, pero en ese momento el mejor recurso de que se disponía era la experiencia acumulada de las construcciones previas. A este respecto, en los dos últimos siglos se ha pasado de un conocimiento empírico del comportamiento resistente de las estructuras, a un conocimiento científico, lo que como veremos más allá de la capacitación que otorgan tales medios para resolver estructuras antes inconcebibles, transforma el proceso de concepción de las edificaciones, limitando lo construible, a lo calculable.

A la hora de delimitar cronológicamente el ámbito de estudio, se ha determinado como marco de la presente investigación los siglos XIX, XX y XXI, ya que en este periodo encontramos las claves que han forjado el presente y nuestra actual percepción de la arquitectura y su proyección. Pero en el siglo XVIII se encuentran muchos los orígenes científicos de los cambios que marcarían los siglos posteriores. El hombre hasta el siglo XVIII buscó la *“optimización formal”*, como vía para la realización de estructuras compresivas de grandes dimensiones, evitando la aparición de esfuerzos tractores, que únicamente podía resistir la madera. Sólo la incorporación en el siglo XIX del hierro al panorama constructivo, un material capaz de resistir tracciones, modificó todo el ámbito arquitectónico, rompiendo las barreras dimensionales y resolutivas, que durante siglos parecieron inmutables. Hasta ese momento el hombre se había visto limitado a los esquemas compresivos, llegando hasta su máximo perfeccionamiento con el empleo de formas eficientes surgidas del *“conocimiento empírico”* de las obras previas y principalmente los derrumbes, que marcaban de forma abrupta los límites de lo realizable, en un momento en el que la arquitectura trabajaba con un coeficiente de seguridad 1. Este proceder no cambiaría hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX, cuando los medios de cálculo, como se ha comentado, permitieran establecer mediante el conocimiento científico, el dimensionado de las estructuras y con ello, marcar unos coeficientes de seguridad que garantizaran el funcionamiento de la estructura bajo cualquier circunstancia previsible en la vida útil de la edificación.

El salto cualitativo en los espacios a partir de este momento, viene dictado principalmente por la evolución de los materiales. Se ha pasado del empleo de materiales basados en un proceso de *“selección”* de elementos naturales, a un *“diseño empírico”* de los materiales, que durante el siglo XX, ha dado lugar al *“diseño basado en la ciencia e ingeniería de materiales”*. Pero ante todo el salto producido en el siglo XIX y la incorporación del hierro, es la capacidad para asumir las estructuras esfuerzos tractores, lo que trajo asociada una notable ampliación de las opciones resolutivas empleables. Ejemplo de ello son las cerchas, que no siendo un descubrimiento de este periodo, ven su florecimiento en este momento gracias a un material capaz de posicionarlas como una opción económica para la cubrición de grandes luces. Este hecho a su vez, lleva a otra consideración trascendental, las grandes luces pasan de ser una

opción asociada al poder y la divinidad, a un tipo resolutivo adoptable como solución funcional asumible en un amplio rango de situaciones y tipologías. A este respecto en el siglo XIX el mejor exponente de este hecho son las estaciones de ferrocarril, que por consideraciones ajenas a las exigencias puramente funcionales emplean las grandes luces, como forma de simbolizar la nueva puerta de acceso a las ciudades del siglo XIX, siendo en parte una representación de la urbe en la que se emplazan.

Mediante el análisis histórico de la producción arquitectónica, se evidencia que **el hombre solo ha actuado con libertad, dentro de los márgenes que la técnica le ha permitido**. Este hecho incuestionable, hace imprescindible una reflexión sobre la evolución de los márgenes capacitivos, tanto desde los límites dimensionales, como desde el repertorio resolutivo del que se dispone en el proceso de concepción proyectual. Sin esta perspectiva del marco técnico, cualquier interpretación de la producción arquitectónica queda incompleta. Ejemplo de ello serían las cubiertas laminares de hormigón armado, como las realizadas por Félix Candela, justificables como opción económica de resolver grandes luces en un panorama en el que primaba más la economía de materiales, que la mano de obra. Con hormigón armado, solo es posible cubrir luces superiores a los 15 metros haciendo uso del factor de forma. Las formas empleadas en las cubiertas laminares estaban limitadas a aquellas representables mediante ecuaciones resolubles con el cálculo manual. Este tipo de interpretación de la problemática proyectual, confiere una visión de conjunto que permite entender la obra, no solo como una suma de elecciones, sino como una respuesta a un tiempo y un lugar.

Como se ha dicho, los factores de los que depende en mayor medida la capacitación resolutiva, son la evolución de los materiales, soluciones técnicas y medios de cálculo. El estudio de las dos primeras viene inexorablemente enlazado, dado que las soluciones técnicas son las opciones ideadas para el aprovechamiento y adaptación a las cualidades que ofrece el material. Por ello este estudio, desarrollado en el Tomo II (anexo), establece tal distinción capitular:

- Avances técnicos. Material y sistema resistente, como definidores del marco dimensional y forma de actuación.
- Avances en los medios de cálculo. Conocimiento resistente como apriorismo dimensional y limitador formal.

Así en el presente apartado, de forma congruente, se expondrán los principales conceptos presentes en el análisis realizado, que ayuden en el establecimiento de un cuerpo doctrinal base de la visión del panorama actual, como resultado de un proceso que es necesario comprender.

1. Avances técnicos. Material y sistema resistente, como definidores del marco dimensional y formal de actuación.

Como se ha comentado, el gran salto cualitativo en el ámbito constructivo se produce en el siglo XIX, con la incorporación generalizada del hierro como material para la resolución global de la estructura. Este proceso comienza en el siglo anterior, con los avances productivos en el material, que conducirían a la producción a gran escala de éste, para la incipiente fabricación industrial. Así la arquitectura es beneficiaria de descubrimientos que impulsados desde otros sectores, son capaces de transformar por completo el panorama resolutivo. Así mismo algunos de los primeros ejemplos de la incorporación de vigas y pilares de hierro en la construcción, son una respuesta al gran número de incendios producidos en las nuevas fábricas, por lo que el empleo de un material incombustible como el hierro, en lugar de la madera, parecía ventajoso y una opción asumible, que permitió en algunos casos el crecimiento en altura de estas edificaciones. Una incorporación paulatina que condujo a nuevas formas de optimizar su empleo, recurriendo a la triangulación y la conformación de celosías, un tipo resolutivo que ya aparece en el primer puente resuelto en este material, el puente de Coalbrookdale (Inglaterra) (Figura 19) realizado en 1775. Este puente realizado en hierro fundido, recurre a una forma resistente bien conocida, el arco, pero con un material que permitía una desmaterialización de la estructura sorprendente, que vista desde los ojos del momento pudo ser todo un impacto y una muestra de las capacidades de cambio, aun teñida del ornamento, pero reinterpretado e integrado en la forma resistente.

Siempre que surge un nuevo material, éste suele emplear sistemas constructivos heredados de uno anterior, realizando una traslación más o menos directa de lo que se venía haciendo con los materiales de que se disponía hasta ese momento. Así, *"(...) cuando el arco de sillería alcanza su perfección, la naturaleza nos gasta una de sus favoritas e irónicas jugadas. Por primera vez en la historia, al final del siglo XVIII, se cuestiona la primacía de la piedra como material de construcción, con la introducción de un nuevo material estructural –el hierro–*

Figura 19. Puente de Coalbrookdale (Inglaterra), obra de T.F. Pritchard (1775).

*destinado a un fantástico desarrollo. Y, además, el empleo exclusivo del arco era amenazado por la introducción de un nuevo principio constructivo: la celosía*³⁵. Los puentes de hierro, inicialmente toman como referencia los tipos resolutivos empleados en piedra, realizando sucesiones de arcos, combinados con soluciones en celosía, con finos nervios metálicos, dando una sensación de liviandad desconocida hasta ese momento, los comienzos de un cambio que permitiría llamar al siglo XIX *“el siglo del hierro”*.

Este material en sus comienzos, visto como un recurso sumamente práctico y ventajoso, no fue así en términos estéticos, ocultando su presencia en aquellas obras que requerían una cuidada representatividad o una lectura social. En parte a causa de dicho rechazo, su imagen quedó asociada al ámbito fabril, donde permanecía desnuda o en las grandes obras de ingeniería como los puentes³⁶ en las que igualmente era este material parte de la definición visual de la obra. Originalmente son contados los casos en los que adquiere un papel visualmente relevante en arquitectura, uno de ellos el Royal Pavilion de Brighton (1787-1823), donde solo se muestra en la escalera y en los soportes de la cocina, claramente marcados por el factor estético, empleando un capitel, que simulaba las hojas de una palma mediante láminas de cobre, como si todo el elemento estructural pudiera percibirse como una representación de un elemento vegetal. Esta es una buena muestra de la difícil integración de este material en la estética arquitectónica del siglo XIX.

Pero en el siglo XIX entre el sinnúmero de cambios acontecidos en la sociedad, la aparición del ferrocarril y su universalización, fue un hecho de vital importancia, tanto por la reducción de los tiempos que permitió una mejor conexión y comercio con territorios lejanos, así como desde el punto de vista académico una mayor interrelación entre los descubrimientos, lo que condujo, en buena parte, a la frenética sucesión de avances acontecidos en este siglo. Pero así mismo, el tren condujo a la necesidad de realizar estaciones de ferrocarril, un nuevo tipo de espacios, que debían ser al tiempo una respuesta funcional al flujo de viajeros y una conformación simbólica de la nueva puerta a las urbes. Un ámbito proyectual en el que el hierro y posteriormente el acero, encontraron su ámbito de expresión arquitectónica, sin referencias previas que mantener.

En este tipo de proyectos, es necesario tener en cuenta que era imprescindible una correcta iluminación y ventilación, tanto por los viajeros, como por los gases que expulsaban las locomotoras. Pero entre todas las exigencias no se encontraba el empleo de grandes luces, ya que con ser superior al ancho de los convoyes era desde el punto de vista funcional, suficiente. Así la configuración de grandes salas como la de la Estación de Atocha (Figura 20), en Madrid

³⁵ BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979, p. 126.

³⁶ Es necesario recordar que la interpretación visual de los puentes y su integración, pese a su papel secundario frente a las consideraciones técnicas, está siempre presente. En muchos casos debido a ello, los pilares u otros elementos resueltos en hierro o acero se cubrían con piedra, para redibujar la imagen global de la obra. Este es el caso del Puente George Washington en Nueva York (Estados Unidos, 1927-1931), en él, proyectualmente se contemplaba la cubrición con piedra de los pilares metálicos, algo que no llegó a ocurrir por cuestiones económicas.

(España), obra de Alberto Palacio (1892), es una respuesta a la necesidad representativa de la urbe y no una exigencia impuesta desde la función. En este tipo de proyectos se alcanzaron luces en torno a los 50 metros, lo que suponía superar espacios tan icónicos como el Panteón de Agripa o la Basílica de San Pedro, en obras no ligadas al poder o una deidad, sino a la propia ciudad, como ente necesitado de una imagen pública para quienes llegan a ella por la red férrea.

En este caso, nuevamente se recurre al factor de forma y los esquemas resistentes conocidos, organizando una sucesión de arcos. Frente a los arcos macizos de piedra, estos se conforman como celosías trianguladas, que han de ser isostáticas, dada la imposibilidad de resolver en ese momento soluciones hiperestáticas. Esta es la razón por la que se emplea una sucesión de arcos triarticulados, en lugar de completar el arco de una forma coincidente con la tradición resolutive. Como más adelante veremos, a estas alturas solo se construía aquello que resultaba calculable, condicionando lo construible a lo calculable.

Figura 20. Estación de Atocha, en Madrid (España), obra de Alberto Palacio (1892).

Figura 21. Halle des Machines, en la Exposición Universal de París de 1889 (Francia), obra de Dutert y el ingeniero Contamin (1889).

En el estudio de la evolución de los límites dimensionales, se percibe como en el siglo XIX los límites de la técnica residen en el ámbito de la ingeniería civil, alejándose cada vez más de los rangos dimensionales justificadamente empleados en arquitectura. Así en arquitectura, en el siglo XIX, se sustituyen los “límites técnicos”, por “límites funcionales”, ampliándose paulatinamente el número de opciones resolutorias y el marco dimensional alcanzable con cada una de ellas. Este hecho se explicita en la comparativa que se puede realizar entre dos obras coetaneas, la *Halles des Machines* (Figura 21), de Dutert, en la Exposición Universal de París de 1889³⁷ y el puente ferroviario Firth of Forth en Escocia (Figura 22), realizado entre 1883 y 1890, por Fowler y Baker. El primero es una gran sala de exposiciones realizada para la Exposición Universal como un alarde técnico y espacial de las capacidades resolutorias del país, configurando una gran sala de 116 metros de ancho y 420 de largo. Este espacio se resuelve de una manera análoga a como se ha visto en las estaciones de ferrocarril, mediante una sucesión de arcos triarticulados, pero a una escala nunca antes vista. Por su parte, el segundo es un puente ferroviario, realizado mediante el sistema cantilever³⁸, que logra salvar en los dos vanos centrales 520 metros y 200 en los laterales. Como se evidencia en estos dos ejemplos, es necesario diferenciar entre lo técnicamente alcanzable y lo justificadamente aplicable en el marco arquitectónico. Por ello es necesario estudiar los puentes, como aquel ámbito en el que la técnica ve su mayor exponente.

Figura 22. Puente ferroviario Firth of Forth, en Edimburgo Escocia (Reino Unido), obra de John Fowler y Benjamin Baker, (1883-1890).

³⁷ En la Exposición Universal de París de 1889, se registraron dos record en el ámbito arquitectónico: la mayor luz alcanzada con la *Halles des Machines*, de Dutert con 116 metros y de altura con la Torre Eiffel y sus 300 metros. Dos hitos que hicieron de este encuentro un referente mundial, cuya trascendencia hoy permanece patente.

³⁸ Los puentes cantiléver o puente en ménsula, es un tipo de puente en el que partiendo de las pilas, se configuran voladizos a ambos lados, compensado los esfuerzos, pudiendo conectarse el extremo de los dos voladizos que conforman un vano mediante un elemento independiente, que actúa como un apoyo puntual en el extremo. Éste suele configurarse como una viga apoyada-apoyada, que actúa de elemento intermediario y controla las deformaciones del conjunto.

Así al referirnos a los límites dimensionales, en el caso particular de los puentes y su evolución, se distingue entre:

- Puentes viga
- Puentes ménsula
- Puentes en arco
- Puentes colgantes o suspendidos
- Puentes atirantados

Pero por su repercusión en el ámbito dimensional el estudio se concentra principalmente en los tres últimos, plasmándose en los siguientes diagramas (Figuras 23 y 24) ³⁹:

³⁹ Descubrimientos relativos al material:

- 1.- 1713 - Abraham Darby I sustituyó el carbón vegetal, elemento que se venía históricamente empleando como fuente de calor en la fundición de hierro y como agente reductor, por coque, (un combustible fósil). Este hecho condiciona el empleo de hornos de cuba de mayor altura que los empleados hasta el momento, desarrollando un nuevo método con el que obtener el arrabio.
- 2.- 1740 - Benjamin Huntsman desarrolla su propio método de producción de acero, por el que se obtenía un material mucho más duro que el producido hasta esa fecha.
- 3.- 1783 - Henry Cort patenta el proceso de pudelado.
- 4.- 1811 - Aubertôt propone la reutilización de los gases calientes procedentes de los altos hornos, para perfeccionar el proceso, reduciendo las pérdidas energéticas.
- 5.- 1828 - Neilson pone en práctica la propuesta de Aubertôt, optimizando el proceso de producción.
- 6.- 1834 - Wilhelm August Julius Albert emplea por primera vez el “Cable Albert” en las minas de Harz.
- 7.- 1842 - Se sustituye en Estados Unidos por primera vez la cuerda de cáñamo por cable de acero.
- 8.- 1845 - Smith and Newall producen un cable de seis filamentos retorcidos sobre un núcleo e inventan la trefiladora, la máquina que a partir de este momento será básica para la producción industrial de cables.
- 9.- 1849 - John Augustus Roebling en Estados Unidos comenzó la producción del cable de tres tamaños, formado por un conjunto de 19 alambres, organizados en tres grupos de seis, que se retuercen sobre un núcleo, (6+6+6+núcleo).
- 10.- 1850 - Aparecen las primeras trefiladoras de alta velocidad.
- 11.- 1856 - Método Bessemer, por el cual se podía producir acero, empleando como principio la eliminación de las impurezas del metal fundido, mediante la introducción de aire en el horno, lo que genera un proceso de oxidación, potenciada por las temperaturas del arrabio. En este momento comienza la producción de acero laminado.
- 12.- 1864 - Al método de Martin y el horno de Siemens, se les denomina en conjunto “*Horno Martin-Siemens*”. Este es un horno de reverbero, destinado a la fusión y refinado de acero, para la fabricación de lingotes. Éste se convirtió en el medio más común de fabricación de acero en Gran Bretaña y Estados Unidos en la última mitad del siglo XIX.
- 13.- 1873 - Cable California, un tipo particular de cable desarrollado por Andrew Smith Hallidie, para los tranvías que recorren la ciudad de San Francisco. Estos son más caros, pero tienen una vida más larga ante los esfuerzos a los que se encuentran sometidos.
- 14.- 1889 - Stone determinó en 1889 que eran necesarios 6 rellenos, para lograr que el cable resultante fuera redondo, empleando además 19 alambres del mismo tamaño, lo que hoy se conoce como 6 por 25 de James Stone’s, siendo uno de los más utilizados en aplicaciones de uso general.

Figura 23. Influencia de los descubrimientos y sociopolítica, en la evolución de las tipologías de puentes.

15.- 1900 - Aparecen los hornos eléctricos, que permiten la obtención de unos aceros de una pureza y dosificación perfectas, erradicando la presencia de impurezas, tales como el fósforo o el azufre. Además, estos nuevos hornos hacían posible una perfecta dosificación de aditivos, para lograr aleaciones de acero.

16.- 1906 - El químico estadounidense de origen belga Leo Hendrik Baekeland, desarrolla uno de los primeros plásticos, denominado comercialmente como Baquelita.

17.- 1920-1930 - En este periodo de tiempo es cuando se produce el origen de la mayor parte de los plásticos, como etanoato de celulosa, empleado para la producción de resinas y fibras, el cloruro de polivinilo (PVC), empleado en la producción de tuberías y recubrimientos de vinilo. Además se produce resina acrílica, empleada, entre otros usos, en la producción de vidrio laminado.

Otro de los plásticos desarrollados en este periodo, es el metacrilato de metilo polimerizado, comercializado en Reino Unido como Perspex y en Estados Unidos como Lucite, (a este plástico se le conoce en España como Plexiglás). Las propiedades ópticas de este material hicieron posible su aplicación para la producción de lentes, gafas, luminarias... Por su parte las resinas de poliestireno demostraron sus capacidades como aislamiento térmico. El politetrafluoretileno (PTFE), fue sintetizado por primera vez en 1938, tomando el nombre de Teflón, en 1950.

Todos estos plásticos vieron un gran desarrollo a lo largo de la Segunda Guerra Mundial, ya que en ambos bandos, la escasez de suministros de materias primas, llevó a la sustitución de éstas por plásticos, como fuente "inagotable" de sustitutos aceptables de sustancias, en esos momentos inaccesibles.

Además en estos años se perfecciona la producción de cables, logrando aumentar su tamaño y resistencia. Precisamente a este factor, es al que podemos atribuir en su mayor parte el salto evolutivo que los puentes suspendidos sufren en estos años.

18.- 1953 - Karl Ziegler desarrolla el polietileno.

19.- 1954 - Giulio Natta desarrolla el polipropileno.

Figura 24. Puentes que definieron los límites dimensionales de la técnica.

Estos esquemas muestran una imagen fija de los límites dimensionales alcanzados por el hombre, particularizados para los puentes de arco, suspendidos y atirantados. Es necesario recordar, que estos dos últimos son esquemas basados en la utilización de cables, por lo que la evolución de este elemento es de vital importancia. En ambos casos sus orígenes se remontan al uso de cadenas⁴⁰, pero en el caso de los puentes suspendidos, especialmente ven su florecimiento con las soluciones de barras⁴¹.

Así mismo como visión global de las opciones resolutorias con las que se cuenta en la actualidad en este ámbito, se pueden definir éstas, de forma conjunta a los márgenes dimensionales dentro de los que pueden actuar (Figura 25). Esta es otra herramienta de selección que puede ayudar a seleccionar la vía más adecuada de actuación y clarificar las decisiones tomadas en obras recientes. Aunque este análisis se haya realizado en el caso de los puentes, los resultados son extrapolables al ámbito arquitectónico con las debidas particularidades de éste. Ésta puede ser una visión extremadamente pragmática de la problemática proyectual, pero encuadra de manera precisa las posibles decisiones proyectuales, atendiendo a su eficacia para la problemática planteada.

Figura 25. Rangos de luces alcanzables en puentes según su tipología.

⁴⁰ Los puentes atirantados, más allá de sus orígenes, sólo comienza a extenderse su uso en la segunda mitad del siglo XX.

⁴¹ Las barras son, desde el punto de vista resolutivo, eslabones de grandes longitudes, posibles gracias a los avances acontecidos durante las primeras décadas del siglo XIX. El empleo de este elemento frente a las cadenas, permite reducir la cuantía de componentes y por tanto el número de enlaces.

La historia de los puentes durante los dos últimos siglos, resulta esclarecedora en el estudio de los entresijos ligados a la evolución de los materiales y la técnica. Así este ámbito de estudio esta intrínsecamente ligado a la producción arquitectónica como un entorno más de aplicación en el que prima el factor dimensional y el punto de vista pragmático sobre cualquier otro. Así las estructuras metálicas y su evolución más extrema, ven su aplicación en este tipo de obras, donde formas como los arcos

Figura 26. Puente de Zouz (Suiza), obra de Robert Maillart (1901).

triarticulados realizados en las estaciones de ferrocarril, serán a su vez algunos de los primeros referentes de puentes de arco de hormigón armado. Este es el caso a comienzos del siglo XX, del puente de Zouz (Suiza) 1901 (Figura 26), obra de uno de los grandes ingenieros de este siglo, Robert Maillart. Esta obra se encontraba fuera de las opciones posibles en base a la normativa existente, ya que ésta no permitía su realización pese a los cálculos que avalaban su funcionamiento. Finalmente estos cálculos fueron aceptados gracias al apoyo Wilhelm Ritter, que gozaba de un gran prestigio, capaz de acreditar la validez de esta obra. Las obras extremas siempre suponen un reto a los márgenes establecidos y por ello son el ámbito de estudio que define los márgenes de actuación del global de la producción humana. Así se suman nuevas opciones resolutorias y nuevas libertades, que inciden sobre la concepción dimensional, espacial y material de las obras, tanto relativas al ámbito de la ingeniería civil, como de la arquitectura, donde existe un mayor acto reflexivo sobre la significación de la forma y el impacto de las decisiones adoptadas, más allá del pragmatismo técnico.

Si el siglo XIX se encontraba marcado por la incorporación del hierro y la capacidad para resistir tracciones, el hormigón tanto armado, como pretensado, son los materiales que marcaron el siglo XX. El hormigón armado, frente a la incorporación del hierro, no supone un salto capacitivo. Este material es una piedra artificial, que convive con la disposición de una armadura que le permite resistir tracciones. La relevancia de este hecho, es que por un lado permite realizar estructuras capaces de soportar, tanto compresiones, como tracciones con un menor uso de hierro, como así su presencia pétreo tiene una mayor aceptación dadas sus relaciones con la tradición constructiva. Si de primeras la imagen de las estructuras metálicas se asoció con el mundo industrial, en el caso del hormigón armado fue con la tradición, aunque pronto adquirió una imagen y connotaciones propias.

El hormigón, pese a su uso clásico, como ya hemos dicho, especialmente significativo en la arquitectura Romana, se dejó de usar durante siglos, perdiéndose el conocimiento de su uso, hasta que en el siglo XIX, cuando nuevamente se redescubre y pasa de elaborarse con cenizas volcánicas, denominadas “puzolana”⁴², al proceso industrial necesario en la elaboración del

⁴² El nombre de puzolana viene de la población de Pozzuoli, situada bajo el volcán Vesubio, de donde los romanos extraían dichas cenizas para la elaboración del hormigón y la realización de todo tipo de obras, desde puertos, hasta el Panteón de Agripa, que como se ha dicho, ha sido un referente a lo largo de toda la historia de la arquitectura.

cemento Portland. Esta producción industrial y en grandes cantidades del hormigón, lo posicionaron a lo largo del siglo XIX como un material económico, al que se le buscaron infinidad de aplicaciones. Así el matrimonio del hormigón y el hierro y posteriormente el acero supuso una revolución desde el punto de vista económico, ofreciendo una opción constructiva económica. Así los sistemas patentados por Joseph Monier (1823-1906) y por François Hennebique (1843-1921) (Figura 27) y sus múltiples concesionarios, marcaron el panorama constructivo en el cambio de siglo y las primeras décadas del siglo XX. Este tipo de soluciones se hicieron populares como el eslogan de Hennebique: *“Haga todas sus construcciones económicas, incombustibles y de duración ilimitada sin mantenimiento en hormigón armado Hennebique”*⁴³

Este tipo de construcciones vieron una amplia difusión de su uso, pero el hecho que impulsó su universalización y lo posicionaron como la primera opción constructiva, fueron los conflictos bélicos que marcaron la primera mitad del siglo XX, tanto la Primera, como la Segunda Guerra Mundial. Durante estos periodos el hierro era un recurso escaso, destinado en su inmensa mayoría a la industria armamentística, por lo que el hormigón armado al hacer un uso limitado de este recurso, se convirtió en la opción más económica y ventajosa. Así mismo esta carestía

Figura 27. Panel de patentes de sistemas de hormigón armado de Hennebique.

⁴³ En numerosas ocasiones se organizaron demostraciones públicas, en las que se llegaban a levantar edificios, para posteriormente dejarlos ser pasto de llamas, probando las propiedades ignífugas del hormigón armado. Así mismo se organizaron pruebas de resistencia de losas, vigas... demostrando las capacidades resistentes, ante un público aún reacio a confiar en las propiedades de un nuevo material. Algunas de estas demostraciones tuvieron lugar en exposiciones regionales e internacionales celebradas en esos años o se hacía referencia a ellas mediante fotografías y demás documentación, que demostrara visualmente a los asistentes las propiedades de este material y del “Sistema Hennebique” y principalmente su resistencia ante el fuego.

permanecía en los periodos posteriores, en los que así mismo se acometía un proceso de reconstrucción, por lo que ésta se realizó en buena parte con soluciones de hormigón armado. Así mismo en este fenómeno se encuentra el distanciamiento entre la producción arquitectónica europea, en “*hormigón armado*” y la americana en “*acero*”. Mientras que Europa se vio sumida repetidas veces en el conflicto y en la carestía de hierro destinado a la construcción, en Estados Unidos los conflictos se vivieron en la distancia, lo que permitió que permanecieran de forma ininterrumpida las estructuras metálicas. Este hecho se hace patente, tanto en la producción arquitectónica, como de puentes. Así el hormigón más que una elección, fue una imposición de las circunstancias socioeconómicas del siglo XX en una amplia área geográfica.

Pero este material definió el panorama arquitectónico durante la mayor parte del siglo XX, enlazado con el desarrollo de la arquitectura moderna y su ideario, que se extendieron por todo el globo y asociado a éste, el uso del hormigón armado, tanto como recurso técnico, así como forma de expresión. *“...En la ambivalencia de las emociones contemporáneas, el hormigón, este material omnipresente del paisaje construido, juega un papel evidente y sutil. Sus superficies lisas y preciosas o de texturas rugosas, se podían llamar también salvajes, empujan a tocar este mineral creado por la mano del hombre. Conserva el recuerdo de los moldes que le han dado forma, las venas de la madera, el fruto de los encofrados, la fría lisura de los paneles de metal, muestra las trazas fosilizadas de su puesta en obra, historia viva inscrita. Tiene a veces, en su misma desnudez, una gravedad que entra en resonancia con la naturaleza y conduce a las puertas de lo sublime. El hormigón se exalta igualmente en otros registros complementarios que nos afectan vivamente. La materia pasiva se hace fuerza, impulso, potencia. La inmovilidad inscribe el movimiento, la opacidad se hace día. Las formas ideadas por arquitectos o ingenieros le confieren un dinamismo que contrasta con su esencial estabilidad. Sus posibilidades constructivas hacen posible cualquier libertad del espacio, cualquier fluidez de recorrido. El hormigón se presta a transcribir la transparencia del edificio con juegos de contraste y de oposición. La opacidad de estructuras y muros, sus perforaciones y sus huecos, la amplitud y complejidad de volúmenes, las respuestas que se ofrecen al peso y las fuerzas... Es así como la materia y su ausencia dialogan con la luz en esa armoniosa complementariedad de lo vacío y lo lleno que se plantea a veces como la misma definición de arquitectura...”⁴⁴.*

Pero el hormigón armado es un material imperfecto, en el que al traccionarse la armadura, el hormigón circundante, sometido forzosamente a este esfuerzo que es incapaz de resistir, se fisura irremediablemente. Esto ocurre a todas las escalas, pero superando el rango dimensional de los 15 metros adquieren una entidad inadmisibles, por lo que no se pueden configurar soluciones de grandes luces con elementos horizontales de hormigón armado. Ante esta problemática, nuevamente se echó la vista atrás, recurriendo al factor de forma y modelos clásicos como el arco, la bóveda y la cúpula. Ejemplo de ello es la cúpula nervada del

⁴⁴ RUI-WAMBA, Javier y FERNÁNDEZ ALBA, Antonio, “*Eugène Freyssinet un ingeniero revolucionario*”, España, Fundación Esteyco, 2003, p. 118-119. Fragmento traducido, publicado originalmente en:

AA.VV., “*Bétons: matière d’architecture*”, Francia, Régirex-France (realizado por iniciativa del Syndicat National des Fabricants de Ciments et des Chaux), 1991.

mercado de Leipzig (Figura 28) (1927), obra del ingeniero alemán Franz Dischinger (1887-1953), que cubre una sorprendente luz de 65,80 metros en su base y 9 centímetros de espesor. Pero el diámetro del espacio cubierto alcanza los 75,6 metros, una cota considerablemente superior a la del Panteón de Agripa, para un espacio mercantil, lo que pone de manifiesto, que como se ha mencionado anteriormente, en este periodo las grandes luces son un recurso práctico y expresivo, lejos de la clásica asociación al poder y la divinidad.

Figura 28. Großmarkt (Mercado) de Leipzig (Alemania), obra de Franz Dischinger (1927).

En la necesidad de recurrir al factor de forma para la realización de espacios de grandes luces con este material, se encuentra el origen de las estructuras laminares, como una evolución de los recursos formales clásicos. Frente a estos, las láminas no se limitan a los esfuerzos compresivos, combinando en el plano resistente compresiones y tracciones, gracias al armado en ambas direcciones y a la indeformabilidad de las superficies de doble curvatura. Así se inicia el uso de un esquema resistente sin precedentes, factible gracias al nuevo material. Este tipo de estructuras desarrolladas por grandes personajes como Eduardo Torroja Miret (1899-1961) y Félix Candela Outeriño (1910-1997), definieron unas formas arquitectónicas muy particulares, caracterizadas por la eficiencia estructural, así como por la necesidad de que la forma elegida fuera representable mediante ecuaciones resolubles por medios de cálculo manual. Éste ha sido un condicionante vital para entender las limitaciones relativas a este tipo de construcciones hasta recientes fechas, en las que los medios de cálculo informático han hecho factible romper dicha barrera, liberalizando la forma de este tipo de construcciones. Pero esta ruptura de las limitaciones formales, se produce en un panorama en el que las estructuras laminares prácticamente se encuentran en desuso a causa del encarecimiento de la mano de obra y la limitación geográfica a la que se ve coartado su uso atendiendo a la idoneidad climática.

Como el propio Candela expresa *“los cascarones apropiados no pueden tener una forma caprichosa. Los cascarones de piedra de la naturaleza son siempre de doble curvatura, y la razón para esto se hace obvia cuando consideramos la ventaja de evitar momentos flexionantes en los materiales pétreos. El efecto de flexión es siempre antieconómico en cualquier material y lo es aún más para materiales birresistentes cuya resistencia a la tensión es sólo una pequeña fracción de su resistencia a la compresión. La inexistencia de flexiones y,*

Figura 29. Paraguas de hypars experimental, Las Aduanas (México), obra de Félix Candela (1953). Prueba de carga con 24 operarios subidos sobre la estructura.

*en suma, la función resistente de una estructura, depende de su forma*⁴⁵.

Tal vez de este tipo estructural, una de las formas que más se enfrenta a la tradición resolutive, demostrando las capacidades del material y una expresión ligada al reto gravitatorio, son los paraguas de hypars (Figura 29), que Candela empleará en múltiples combinaciones como unidad básica. En este tipo de obras la forma, dentro de la libertad de actuación, responde a un esquema resistente, haciendo de tal esfuerzo la expresión de la obra.

Con las comentadas limitaciones del hormigón armado para resolver proyectos de grandes luces sin recurrir al factor de forma, se busca superar tal limitación y en este esfuerzo destaca Eugène Freyssinet, el padre del pretensado.

El pretensado es ciertamente una revolución resistente al nivel de la incorporación del hierro en la construcción en el siglo anterior. Supone la imposición de los requerimientos resistentes sobre el material, ejerciendo un preciso control sobre el comportamiento resistente del elemento constructivo a lo largo del estado de servicio.

Como se ha comentado, el hormigón armado más allá de los 15 metros sufre fisuraciones inaceptables, aunque éstas se producen a todas las escalas por el comportamiento resistente del material, ya que el hormigón es incapaz de soportar tracciones. En este aspecto la incorporación de una tracción previa sobre la armadura, precomprime el hormigón, reduciendo esta sollicitación durante el estado de servicio, no llegando a traccionarse el hormigón y por tanto, sin llegar a sufrir esfuerzos tructores, que es incapaz de soportar.

En cuanto Eugène Freyssinet fue consciente de la influencia de las deformaciones diferidas, pudo determinar la viabilidad de realizar pretensados de forma permanente y empezar su cruzada por el desarrollo de este sistema capaz de confeccionar la materia según nuestras necesidades, como expone cuando dice que: *“en cuanto conocí las leyes de las deformaciones lentas lo suficiente para estar seguro de que podrían conciliarse con la permanencia de los pretensados, decidí arriesgar toda mi fortuna, además de mi reputación y fuerzas, para convertir la idea del pretensado en una realidad industrial. Dado que presentía una larga y dura lucha, además de la necesidad de recursos financieros, tomé la precaución de registrar patentes. Mi socio, Limousin, no quiso acompañarme, por lo que abandoné mis funciones de cogerente y cedí todos mis derechos en el negocio, incluidos los relacionados con mis estudios, planos y patentes anteriores a la cesión (lo que fue muy duro para mí)”*⁴⁶.

Este personaje dedicó su vida al que consideraba el futuro de la construcción y las grandes luces. Gracias a él durante la segunda mitad del siglo XX este recurso se ha universalizado y hoy al hablar de grandes luces en hormigón, es sinónimo del uso del pretensado, no limitándose este recurso de control tensional al hormigón.

⁴⁵ FABER, Colin, *“Las estructuras de Candela”* (título original: *“Candela: The Shell Builder”*), México, Compañía Editorial Continental, S. A., 1963 (primera edición en castellano en 1970), p. 81. Es necesario aclarar que cuando se refiere a tensión está hablando de tracciones.

⁴⁶ RUI-WAMBA, Javier y FERNÁNDEZ ALBA, Antonio, *“Eugène Freyssinet un ingeniero revolucionario”*, España, Fundación Esteyco, 2003, p. 47.

Otro recurso constructivo vital en el panorama actual, son los elementos prefabricados de hormigón y estos están en su inmensa mayoría resueltos mediante el pretensado. Los elementos prefabricados, permiten reducir los tiempos de construcción, mejorar la calidad y precisión del producto, gracias a la producción en taller y ejecutar la construcción en seco. Todos estos factores van en la línea de las exigencias actuales del mercado y gracias a las máquinas de control numérico, se puede limitar la repetición generalmente asociada a este recurso, por lo que su implantación en el siglo XXI congruentemente debería de tender al alza.

Los orígenes de la construcción prefabricada en hormigón, se remontan a finales del siglo XIX y comienzos del XX. El primer ejemplo de que se tiene constancia es la construcción del Casino Biarritz en 1891, donde la empresa Ed. Coignet de París emplea vigas prefabricadas de hormigón armado. Una fecha temprana, si se tiene en cuenta que la primera edificación erigida en hormigón armado se remonta solo a 1853, La Maison del 72 rue Harles Michels, obra de François Coignet. Pero para encontrar un sistema de construcción prefabricado global hay que esperar a que el arquitecto americano Grosvenor Atterbury (1869-1956) en 1907 ideara un sistema de construcción de viviendas mediante grandes paneles prefabricados de hormigón, pero que frente a los modelos anteriores se encontraban aligerados⁴⁷.

En EEUU, en los comienzos del siglo XX, un personaje de gran relevancia, es Thomas Alva Edison, quien en 1907 era el quinto productor de cemento del mundo con su empresa, la Edison Portland Cement Company⁴⁸. Un material con grandes posibilidades que rápidamente este visionario supo reconocer⁴⁹. Así mismo dada la situación del momento en el país, que requería de la rápida producción de viviendas a costes reducidos, vio en este material y en la prefabricación el camino a seguir. El objetivo de Edison era producir casas completas por

Figura 30. Vivienda prefabricada de hormigón, durante el proceso de moldeo, siguiendo la patente de Edison (1919).

⁴⁷ En 1900 se encuentran en EEUU ejemplos de placas de 5 metros de largo y 1,2 metros de ancho, con un espesor de solo 5 centímetros, un claro antecedente de muchos de los sistemas que actualmente se emplean.

⁴⁸ La Edison Portland Cement Company se fundó en 1899 en New Village, New Jersey. Años más tarde esta empresa construyó una planta de producción de grandes dimensiones en Stewartsville, New Jersey.

⁴⁹ Esta empresa en sus primeros años no resultó rentable, hasta 1922, año en el que se construyó el Yankee Stadium, completamente realizado en hormigón. En esta obra, según un informe de 1923, se emplearon “más de 30.000 yardas cúbicas de concreto, hechos de 45.000 barriles de cemento, 30.000 yardas cúbicas de grava y 15.000 yardas cúbicas de arena”.

1.200 dólares, un tercio de lo que costaban habitualmente las viviendas producidas en el país. Con su patente de 1908, se podían construir edificios de dos y tres plantas, mediante encofrados metálicos reutilizables (Figura 30).

Este tipo de soluciones, en la segunda mitad del siglo, incorporan el pretensado, incrementándose sustancialmente su uso, principalmente en aquellas tipologías edificatorias más pragmáticas, como es el caso de edificios industriales y comerciales, aunque durante las últimas se encuentra en cualquier tipo de edificación, tanto en la prefabricación de los elementos estructurales, como en los elementos de cerramiento y compartimentación.

Durante la década de 1990 se extiende el uso de soluciones prefabricadas de hormigón para la realización de edificios de varias plantas, empleando una solución estructural hiperestática. Ésta, se emplea con gran frecuencia en la realización de centros comerciales, siendo un sistema rápido y económico para concluir con gran brevedad este tipo de espacios, pudiendo montarse estas edificaciones a un ritmo de 20.000 m²/mes⁵⁰.

Un ejemplo extremo, aunque empleando una estructura metálica, es la construcción de una torre en la ciudad de Changsha (China), obra de Xian Min Zhang, cuya construcción llevó tan solo 19 días, a una media de tres plantas al día⁵¹. La compañía china Broad Sustainable Buildings (BSB) logró levantar las 57 plantas de esta edificación en un tiempo record, entendiendo la torre como 19 fases constructivas de 10 metros de altura, dividiendo el proceso productivo de la torre, así como la modulación de todos los elementos conforme a esta organización.

En la actualidad, el empleo de elementos prefabricados de hormigón, se ha configurado como una solución económica a un amplio rango de problemáticas arquitectónicas, así como la opción que más garantías de calidad ofrece. *“La prefabricación aporta una gran capacidad de generar nuevas soluciones técnicas e imaginativas para resolver los problemas arquitectónicos y constructivos de los edificios”*⁵². Además, las tendencias del mercado actual ponen de manifiesto que las soluciones prefabricadas, con la reducción del tiempo de puesta en obra, son las que mejor se adaptan a los nuevos tiempos y en ellas reside buena parte de las líneas de actuación del siglo XXI.

⁵⁰ La cifra de 20.000 m²/mes está tomada de la construcción del centro comercial Plaza de Aluche (Madrid) por el arquitecto Juan Serrats, en la década de 1990. Este edificio de 70.000 m² se divide en cinco plantas y emplea una estructura hiperestática para resistir las acciones horizontales, estando formada por elementos prefabricados de hormigón. En este caso, los cerramientos se han materializado mediante paramentos de fábrica de ladrillo.

⁵¹ THORNHILL, Ted, *“How to build a skyscraper in NINETEEN DAYS: Time-lapse how Chinese firm builds 57-storey block at a rate of thee floors a day”*, Reino Unido, dailymail.co.uk, 11 de marzo de 2015.

⁵² BURÓN MAESTRO, Manuel y FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ HERNÁNDEZ., David, *“Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de Experiencia”*, Informes de la Construcción, vol. 48, nº 448, marzo/abril de 1997, p. 19.

2. Avances en los medios de cálculo. Conocimiento resistente como apriorismo dimensional y limitador formal.

Los medios de cálculo son el otro gran factor sobre el que se cimenta la superación dimensional, incidiendo decisivamente sobre la concepción proyectual a todas las escalas. Históricamente el hombre ha basado el dimensionado de las estructuras en el “*conocimiento empírico*”, de la producción previa, tanto de los éxitos, como de los derrumbes, que marcaban de forma abrupta el límite de lo posible, en un momento que se trabajaba con un coeficiente de seguridad 1. “... *Nuestro encuentro diario con la arquitectura del pasado, nos hace pasar de largo acerca de un hecho construido, fruto de experiencia, no de cálculo, cuya gran virtud, además de su belleza es haber sobrevivido hasta hoy, con reglas basadas solo en el arte ancestral del buen construir y en el saber aprendido y empleado de generaciones de operarios formados a la sombra de sus maestros*”⁵³. Precisamente en este momento, dentro de estos ámbitos cerrados del mundo de la construcción, se originaron algunos de los primeros tratados de arquitectura⁵⁴, durante los siglos XIV al XVI. Estos reflejaban unas reglas geométricas y dimensionales a seguir para garantizar, en base a la experiencia, el éxito de la edificación.

En el siglo XVIII se encuentran muchos de los orígenes científicos de los cambios que marcarían los siglos posteriores. El hombre hasta el siglo XVIII buscó la “*optimización formal*”, como vía para la realización de estructuras compresivas de grandes dimensiones, evitando la aparición de esfuerzos tractores, que únicamente podía resistir la madera. Sólo la incorporación en el siglo XIX del hierro al panorama constructivo, un material capaz de resistir tracciones, modificó todo el ámbito arquitectónico, rompiendo las barreras dimensionales y resolutivas, que durante siglos parecieron inmutables. Pero en ese mismo periodo, los medios de cálculo

⁵³ MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, “*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*”, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011, p.11.

⁵⁴ Aunque podemos considerar estos como algunos de los primeros tratados estructurales realizados por el hombre, no debemos olvidar que mucho antes ya se habían constituido textos relativos a los procesos constructivos, como los antiguos bajorrelieves egipcios llamados “*instrucciones de Rejmira*”, en los cuales según la interpretación más difundida, se explica la formación de muros de fábrica de adobe, aunque en mi opinión particular muestran algo más avanzado, la conformación de muros de hormigón en masa, desde la producción del material a su encofrado para la formación de muros. Un legado teórico, que nos acerca algo a comprender los conocimientos constructivos de los que se disponía en ese periodo. Otro texto que es imprescindible citar son “*Los diez libros de la Arquitectura*”, de Marco Vitrubio, que si bien a buen seguro no fue el único texto que reflejaba las bases de la arquitectura romana, sí el único que ha perdurado hasta nuestros días, permitiéndonos una visión más cercana a la ideación y proyección arquitectónica en la antigua Roma. En ambos periodos históricos hay que recordar que el funcionamiento interno de las estructuras aún es desconocido y el único recurso de comprensión estructural disponible es el geométrico, con el que se llegarían a producir obras impresionantes, como algunos proyectos de termas o el Panteón de Roma, referente indiscutible de las limitaciones inherentes a la técnica basada en el arco y la piedra (aunque ésta fuera artificial).

permitieron el dimensionado a priori de las estructuras, en base a un “*conocimiento científico*”, lo que llevó a que las obras realizadas en el nuevo material, basaran su dimensionado en la comprensión del comportamiento resistente y no en una experiencia previa de la que tampoco se contaba. El siglo XIX fue el periodo en el que la mayor parte de los medios de cálculo se formalizaron y aplicaron en el panorama arquitectónico, lo que condujo a la realización de las primeras normativas, en el caso de las estructuras de acero en 1891 y en el de las de hormigón armado en 1906, con la Circular Ministerial de 1906, que regulaba en Francia este tipo de estructuras.

A partir del establecimiento de un margen normativo basado en los medios de cálculo disponibles y los sistemas reflejados por las patentes existentes en ese momento, se condiciona lo construible a lo calculable. Hecho por el cual, los medios de cálculo informático, han supuesto un avance tan sustancial, superando las limitaciones intrínsecas a las capacidades del hombre. “*Los métodos matriciales de análisis son de una gran simplicidad y se podría decir que no han aportado grandes ideas conceptuales al análisis de estructuras. Son una evolución de las ideas de Maxwell y Mohr de finales del siglo XIX*”⁵⁵. Pero ciertamente el método matricial es el que ha permitido informatizar la resolución estructural, ampliando la libertad de concepción de las estructuras a lo largo de las últimas décadas del siglo XX. Se superan así las barreras del cálculo al que está limitado el hombre por los medios de cálculo manual.

En base al estudio realizado plasmado en el Tomo II (Anexo), se pueden comprender las fases evolutivas de los medios de cálculo que han conducido a la actual conformación del panorama arquitectónico (Figura 31). Así los principios se descubrieron en el siglo XVIII, pero los teoremas y los métodos pertenecen al siglo XIX y a la primera mitad del siglo XX, estableciendo las bases para la revolución de los medios de cálculo acontecida con los medios digitales, que permiten superar las limitaciones intrínsecas al hombre, aplicando el cálculo matricial, que hasta ese punto solo se pudo aplicar a ejercicios teóricos.

Los medios de cálculo han permitido al hombre, actuar con consciencia del comportamiento resistente y ajustar las dimensiones de la estructura de forma precisa. Así se establecen los coeficientes de seguridad, como forma de marcar unos márgenes lo suficientemente amplios sobre el estado de rotura, como para que ésta no acontezca en ninguna de las situaciones factibles durante la vida útil de la edificación. Por otra parte aparece el ejercicio conceptual de conocer los límites teóricos de lo realizable y la adecuación de la solución adoptada. Con este fin aparece el concepto de “*Cantidad de estructura*”, como medio de evaluación del diseño estructural. “*La cantidad de estructura es una medida del volumen de la estructura no asociada al material utilizado*”⁵⁶.

En arquitectura raramente se opta por la solución más eficiente, ya que los proyectos llevan asociadas multitud de factores a evaluar y ésta no tiene porque ser la más apta en todos los

⁵⁵ PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, “*Cálculo matricial de estructuras*”, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006, p. 6.

⁵⁶ CERVERA BRAVO, Jaime, “*Tres teoremas fundamentales de la teoría del diseño de estructuras*”, Informes de la Construcción, Vol. 40, nº 399, enero/febrero de 1989, p. 59.

aspectos. Por ello un equilibrio entre los distintos factores a evaluar y el mayor acercamiento a las soluciones óptimas, pueden servir como ayuda a la hora de la toma de decisiones en el estudio profesional. Así en el estudio de Jaime Cervera Bravo, queda claro que *“Las cualidades [de las estructuras] no son sólo estéticas —se mide en términos de trabajo o energía, que es una de las magnitudes de más potencial teórico— ni prácticas —veremos que está íntimamente ligada a los volúmenes y pesos estructurales— Se trata de una magnitud cuyas propiedades, y cuya independencia respecto del material considerado, la hacen idónea para una exploración abstracta sobre las propiedades estructurales ligadas a la forma”*⁵⁷.

Cuando se habla de las luces máximas alcanzables, se considera un modelo teórico en el que la estructura se encuentra sometida de forma exclusiva a las cargas de peso propio, algo que en la práctica no ocurre, pero puede servir de referencia comparativa para las soluciones adoptadas. En el caso de los puentes, la relación porcentual entre las cargas de peso propio y las variables, se caracteriza por una mayor relevancia de las primeras, más acusado en casos extremos como el del Gran Puente de Akashi Kaikyo (1997), que marca el record global de luz con sus 1991 metros entre soportes. Por su parte en la producción arquitectónica, como respuesta a la actividad del hombre, las cargas variables son de gran relevancia y consideran la obra, tanto para los usos inmediatos a los que estará destinada, como a su transformación predecible a medio plazo.

En el panorama actual con herramientas, materiales y de cálculo para asumir la realización de casi cualquier obra, el estudio de la *“cantidad de estructura”* es un esfuerzo reflexivo, sobre la validez de las soluciones adoptadas y una forma de ponerlas en perspectiva, para que la toma de decisiones pueda sustanciarse en la eficiencia, como ocurría en el caso de las cubiertas laminares de hormigón, al tiempo que responde al resto de problemáticas proyectuales.

Hoy son así de gran importancia conceptos como la *“optimización”* y más recientemente la *“cantidad de estructura”*, como forma de medir la idoneidad de ésta.

⁵⁷ CERVERA BRAVO, Jaime, *“Concebir y analizar estructuras”*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011, p. 160.

3. Cuadro resumen del marco condicionante de la producción arquitectónica.

El panorama contemporáneo y el marco condicionante que define el ámbito de trabajo de arquitectos e ingenieros, es resultado de un proceso evolutivo, que paulatinamente ha ido ampliando las barreras de lo posible. El conocimiento no puede ser desaprendido y por eso mismo, modifica irreversiblemente nuestra visión del mundo y nuestra forma de concebirlo y “proyectarlo”. Por ello, la evolución de los materiales, tanto en su transformación, como en su utilización, se establece como la principal causa de la revolución arquitectónica de los dos últimos siglos. Pero así mismo, los medios de cálculo y su aplicación en el dimensionado de las estructuras, han influido decisivamente en el desarrollo, tanto de los límites dimensionales, como en la concreción de la producción arquitectura durante los dos últimos siglos.

En base al estudio histórico realizado plasmado en el Tomo II (Anexo), del que aquí se ha hablado a grandes rasgos, se logra confeccionar un cuadro resumen del “*Marco condicionante de la producción arquitectónica*” (Figura 30). Éste, ofrece una foto fija del panorama en el que se desarrolla la producción arquitectónica, mostrando los avances acontecidos en los materiales, técnicas y medios de cálculo, como principales ámbitos que influyen sobre la proyección arquitectónica desde la capacitación resolutive. Así mismo, este cuadro plasma los límites dimensionales alcanzados en cada marco temporal, aunque estos se encuentren en el ámbito de la ingeniería civil y más concretamente en el de los puentes. Como se ha mencionado anteriormente, el estudio de los puentes, es de gran relevancia para el entendimiento de la evolución de muchos de los materiales y técnicas, que posteriormente son de aplicación en el panorama proyectual de la arquitectura.

Con esta herramienta, a la hora de interpretar una obra se puede contextualizar ésta, entendiendo su realización como respuesta a un panorama concreto y unas capacidades productivas, que se modifican radicalmente dependiendo del marco en el que se produce. Una visión global de las particularidades asociadas al ámbito constructivo y particularmente en este caso de las obras de grandes luces, otorga una visión más nítida del proceso proyectual que ha conducido a su realización, comprendiendo que paulatinamente la libertad de actuación del hombre se ha ido incrementando hasta llegar al panorama actual, en el que casi cualquier idea es materializable con los medios de que se dispone.

La concepción arquitectónica está teñida de las experiencias de los técnicos encargados de su elaboración, tanto arquitectos, como ingenieros. La lectura de dichas peculiaridades y las herencias del proceso evolutivo que nos ha conducido hasta el panorama actual, son sin duda la vía para el establecimiento de las bases conceptuales de la arquitectura que está por venir.

Figura 31. Marco condicionante de la producción arquitectónica.

III. LAS GRANDES LUCES COMO PARTE DE LA CONTEMPORANEIDAD PROYECTUAL

A lo largo del recorrido realizado hasta el momento, queda patente que durante toda la historia los logros espaciales del hombre han estado supeditados a las limitaciones propias del tiempo en que se producen. Superadas paulatinamente las barreras dimensionales, y abierto sobremanera el abanico de opciones para resolver los proyectos de grandes luces, hoy se plantea una situación claramente diferenciada de los periodos anteriormente analizados.

Hasta el siglo XIX la limitación estaba claramente dictada por el material, buscando a través de la optimización de los esquemas resistentes compresivos, arañar hasta el último centímetro que permitiera sorprender al usuario. Pero a lo largo del siglo XIX con el hierro, la limitación no está directamente vinculada a unas características intrínsecas al material, sino a la configuración de éste y las características que se le confieren a través del proceso productivo. Éste, frente a los anteriores, es un material cambiante, que hasta tiempos considerablemente recientes ha visto como se incrementaban sus resistencias y mejoraban sus cualidades, apareciendo un amplio rango de variantes, adaptadas a la finalidad a la que éste valla a ser destinado⁵⁸. El material durante los dos últimos siglos ha pasado de ser un invariante a la hora de lograr mayores

Figura 32. Plasti (k) Pavillion, San Louis (EEUU), obra de Marc Fornes (2011).

⁵⁸ Los aceros hoy en día se pueden clasificar en función de varios parámetros:

- Modo de fabricación: acero eléctrico, acero fundido, acero calmado, acero efervescente y acero fritado.
- Modo de trabajarlo: acero moldeado y acero laminado.
- Composición y estructura: aceros ordinarios y aceros aleados o especiales.
- Uso al que se destine: acero magnético, acero autotemplado, acero de construcción, acero de corte rápido, acero decoletado, acero de corte, acero indeformable, acero inoxidable, acero de herramientas, acero para muelles, acero refractario y acero de rodamientos.

luces, a una variable cada vez más compleja, con la aparición en el siglo XX del hormigón armado y pretensado y recientemente otros nuevos materiales. Así los materiales que a día de hoy se encuentra en ciernes, dibujan el panorama de diversidad técnica a la hora de acometer el proyecto, a la que se enfrentan arquitectos e ingenieros del siglo XXI. Un ejemplo de exaltación de estas nuevas variables relacionadas con los materiales y las técnicas asociadas a su empleo, es el Plasti (k) Pavillion (Figura 32), en San Louis (Estados Unidos), diseñado por Marc Fornes⁵⁹ en 2011. Esta obra de arquitectura efímera, establece como su objetivo la exaltación visual de las capacidades expresivas y geométricas posibles mediante este tipo de soluciones modulares autoportantes. Formalmente, esta obra es resultado del diseño mediante procesos algorítmicos⁶⁰, logrados mediante el lenguaje de programación Python⁶¹. El resultado es la suma de una serie de elementos cupuliformes, resultado del ensamblaje de láminas de polietileno, enlazadas entre sí, mediante unas placas metálicas a las que se atornillan. Este material y su presentación en láminas, hace posible cortar piezas de formas diversas⁶², empleando medios robotizados, así como el doblado de éstas. Todo el proceso productivo de las piezas se realiza por medios informatizados, obteniendo una forma única, trasladada directamente del modelado por ordenador al plano físico. Esta obra ejemplifica tres factores vitales, dentro del panorama arquitectónico del nuevo siglo: empleo de nuevos materiales, prefabricación y generación a través de medios digitales, tanto de diseño, como de producción.

Durante estos dos últimos siglos, al tiempo que se experimentaba y evolucionaban los materiales empleados en construcción, los conocimientos, tanto empíricos, como numéricos del comportamiento de los materiales avanzaban. Este hecho ha permitido la evolución de los esquemas resistentes empleados, fundamentando la adaptación de forma y configuración interna, en dichos conocimientos⁶³. El dimensionado pasa de un sistema fundamentado en el

⁵⁹ El Plasti (k) Pavillion es una obra realizada dentro de la plataforma de investigación arquitectónica The Very Many, de la Universidad de Washington.

⁶⁰ TSILIAKOS, Marios, “Plasti (k) by Marc Fornes & TheVeryMany”, Nueva York (EEUU), Archi Search.gr, 6 de febrero de 2012.

⁶¹ Python es un lenguaje de programación de código abierto, que hace especial énfasis en la legibilidad del código. El origen de éste, se remonta a finales de los ochenta, cuando lo crea Guido van Rossum en el CWI (*Centrum Wiskunde & Informatica*, en castellano Centro para las Matemáticas y la Informática), en los Países Bajos.

⁶² Para la construcción de este proyecto, ejecutado por los alumnos de la Universidad de Washinton, se emplearon 150 planchas de polietileno blanco de 2,4 metros de largo y 1,2 de ancho. Sobre éstas se grabaron las formas triangulares de las piezas a emplear en la obra, cortándolas mediante una fresadora de control numérico o lo que es lo mismo, trasladando directamente del ordenador las formas a los elementos constructivos. Por lo que respecta a la curvatura, fue necesario calentar el plástico, para que adquiriera la forma definitiva. Listas todas las piezas diferenciadas e individualizadas, se trasladaron a la obra para su ensamblaje.

⁶³ Como se ha puesto de manifiesto con anterioridad, previo al siglo XIX y los medios de análisis adquiridos, el dimensionado y conformación de las estructuras, lo dictaban las experiencias previas de éxitos y fracasos. Pero durante los dos últimos siglos, se ha pasado de un conocimiento empírico, a un

conocimiento empírico acumulado, a un dimensionado numérico previo de los elementos, que define la validez de la solución adoptada, antes de que ésta se lleve a término. Este hecho ha transformado por completo la forma de concebir las edificaciones desde el siglo XIX hasta nuestros días. A partir de este momento solo se construye aquello que el cálculo ha determinado como seguro, dejando toda solución fuera del alcance de las capacidades numéricas del momento, fuera del campo de lo posible. Claro ejemplo de ello, son las estructuras laminares de hormigón armado, cuya geometría está claramente dictada por las funciones que la definen y la capacidad de resolver éstas, determinando los esfuerzos máximos y mínimos presentes a lo largo de la superficie. Anterior a este ejemplo, es el de los arcos triarticulados, que se configuraban como solución isostática resoluble, frente al sistema hiperestático que se plantearía de no adoptar esta solución, irresoluble en el momento de su realización. Así se diferencia entre la capacidad de resistir un esfuerzo o conformar estructuras funcionales y la capacidad de determinar los esfuerzos internos y la seguridad de la actuación.

A lo largo del siglo XIX surge una concienciación en la producción arquitectónica ligada a un sistema de seguridad. Así la determinación de “*lo seguro*”, en si mismo se constituye como una nueva limitación a la producción del hombre, que ha marcado en gran medida las arquitecturas realizadas hasta nuestros días.

Actualmente, los métodos de análisis empleados, estudian el comportamiento elástico de la estructura, lo que confiere un conocimiento más cercano a la realidad tensional de los elementos estructurales que los precedentes métodos por cálculo plástico. El cálculo plástico de la estructura, hacía posible su dimensionado sin la capacidad de determinar las tensiones internas de la estructura durante el estado de servicio. “*Cualquier análisis estructural elástico (o por el método de los elementos finitos) trata de conocer la tensión en cada punto de la estructura para luego compararla con las tensiones admisibles obtenidas en ensayos de laboratorio. (...) en el caso de las estructuras de fábrica el requisito de la resistencia juega un papel secundario [frente a las deformaciones] (...)*”⁶⁴. En el diseño y cálculo de cualquier estructura aparecen tres requisitos básicos: resistencia, rigidez y estabilidad. De estos tres, el primero es capital para poder denominar a la estructura como tal y de los dos primeros dependerá la determinación del factor limitativo concreto que determine el dimensionado, ya que como hemos visto esto puede ocurrir tanto por un factor puramente resistente, como más habitualmente por una magnitud máxima de las deformaciones admisibles por los elementos constructivos de la edificación.

Al ver hoy, desde el conocimiento adquirido en el análisis estructural de los últimos siglos, las metodologías previas, se nos antoja extraño y complejo, al tiempo que sorprendente. El conocimiento no puede ser desaprendido y por eso mismo, modifica irreversiblemente nuestra visión del mundo y nuestra forma de concebirlo y “*proyectarlo*”. Por este mismo

conocimiento analítico del proceso resistente de las estructuras, lo que condiciona el diseño y dimensionado, modificando radicalmente el proceso de concepción proyectual.

⁶⁴ HUERTA, Santiago, “*Arcos, bóvedas y cúpulas: Geometría y el equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*”, Madrid (España), Instituto Juan de Herrera (distribuida por Reverté), 2004, p. 11-12.

razonamiento, queda patente que para comprender la producción arquitectónica de un margen temporal concreto, resulta imprescindible ser consciente del marco técnico, socioeconómico y geográfico, en el que se presenta⁶⁵.

La aparición de los medios informáticos y la potencialidad de los mismos para superar las limitaciones ligadas a las capacidades propias del hombre, como elemento limitativo de su propia producción, es el detonante del cambio acontecido en las últimas décadas. Este hecho está ligado en su mayor parte a las capacidades de ejecutar los cálculos de las estructuras, de forma rápida, abarcando modelos hasta ese momento irresolubles. El cálculo matricial, ideado a principios del siglo XX, por fin podía resolver grandes estructuras, mediante matrices de proporciones inabarcables para la mano del hombre. En estos últimos tiempos la limitación de lo seguro y calculable ya dejó de ser tal, ya que todo es calculable y por ende dimensionable, para la confección de sistemas resistentes seguros, que den lugar a soluciones arquitectónicas y espaciales sorprendentes y con una materialización como nunca antes había sido posible. Este hecho define una auténtica forma arquitectónica contemporánea, ligada no solo a parámetros formales, sino más intensamente a los procesos productivos.

Hoy podríamos hablar de *“arquitectura digital”*, como aquella materializada como resultado de un proceso de concepción claramente ligada a dichos medios. En las últimas décadas, los proyectos han pasado de definirse en un número sumamente limitado de planos y una escueta memoria que dictaba las bases de la intervención, a un auténtico compendio documental, con numerosos planos y una memoria y pliegos sumamente extensos, que puntualizan hasta el aspecto más nimio de la intervención. Este hecho ha cambiado radicalmente la forma de trabajo en el estudio y los procesos asociados a la concepción proyectual.

En el siglo XIX se rompió con la tradición de la unidad de la masa que conforma la edificación, apareciendo con las estructuras metálicas, una especificidad relativa a la función de los elementos que la constituyen, algo que vino a culminar el movimiento moderno, que desde el punto de vista conceptual separó claramente entre: estructura, particiones, cerramientos, cubierta e instalaciones, como elementos categóricamente distintos y diferenciados. Así hasta nuestros días, ha llegado la separación a la hora de la concepción de estos, pero en el siglo XXI, con los medios digitales y la impresión 3D, aparece la posibilidad de reunificar todos los conceptos, como ente único, formado mediante la traslación, al plano material, de un modelo digital a través de las herramientas de corte e impresión informatizadas o *“máquinas de control numérico”*. A través de estas máquinas de control numérico se tiene la capacidad de gestionar y controlar la producción de los elementos, para alcanzar un nivel de detalle y complejidad, que con cualquier otra técnica conocida resultaría inalcanzable. Ejemplo de ello

⁶⁵ El recorrido histórico previo, enfocado desde el punto de vista de los materiales y el cálculo, intenta por ende, dibujar el marco en el que se produce la evolución de las grandes luces hasta nuestros días, otorgando una base para el establecimiento de pautas de actuación y tipologías que hoy aparecen como parte de la contemporaneidad. Así se presenta la producción arquitectónica actual, como el resultado de un largo camino, siendo necesaria la comprensión del margen concreto en el que se produce cada obra, para comprender los factores que han intervenido en su concepción, tanto en forma de motivaciones y requerimientos, como de limitaciones impuestas, más allá de las definidas por los márgenes establecidos por la técnica.

lo encontramos en el proyecto experimental de arquitectura impresa realizado en Zurich (Suiza), por la empresa Digital Grotesque⁶⁶ en 2014 (Figura 33), en el que se lleva al extremo la complejidad de la forma, diseñando Michael Hansmeyer y Benjamin Dillenburger unos volúmenes barrocos⁶⁷, con un nivel de detalle, como ni el más experimentado artista hubiera podido alcanzar. De este ejemplo, hay que concluir, que se ha producido un enorme salto en la capacidad de complejizar la forma arquitectónica, algo solo justificable y alcanzable con los medios de digitalización de la producción arquitectónica, que hoy se encuentran en un estadio experimental. Así podríamos hablar de estas nuevas arquitecturas como “*espacios impresos*”.

Una de las reminiscencias del pasado pre-digital que aún se conserva en algunos estudios, es la producción de maquetas como ensayo espacial de la intervención, pero incluso este punto hoy está pasando a los márgenes de lo digital, a causa de las impresoras 3D, que como hemos visto son capaces incluso de imprimir los proyectos a escala 1:1. Estas herramientas hoy se encuentran en los márgenes económicos que posibilitan su introducción en el estudio. Los medios de representación han sufrido en las últimas décadas un cambio radical, que convierte a los render y maquetas 3D, en los sustitutos de la clásica producción de maquetas, no solo como medio de representación de una solución definitiva, sino más importante, como parte del proceso de pensamiento ligado a la concepción arquitectónica. En definitiva la pantalla ha

Figura 33. Arquitectura Impresa en Zurich (Suiza), obra de Digital Grotesque y los arquitectos Michael Hansmeyer y Benjamin Dillenburger (2014).

⁶⁶ TOMÁS FRANCO, José, “Video: Arquitectura Impresa / Digital Grotesque”, México, ArchDaily, <http://www.archdaily.mx/mx/02-332275/video-arquitectura-impresa-digital-grotesque>, 04 de junio de 2014.

⁶⁷ Esta obra es el resultado de un proyecto de investigación de la Cátedra de CAAD en el ETH (Instituto Federal Suizo de Tecnología) de Zurich. Todas las piezas que componen esta obra de 16 m² fueron impresas por voxeljet AG.

Digital Grotesque actualmente desarrolla arquitecturas impresas caracterizadas por el nivel de detalle y un ambiente inmersivo en la obra. (www.digital-grotesque.com)

sustituido en buena parte al lápiz y al papel, aunque estos aún permanecen en la generación actual, como aquella ligada a un periodo de cambio, conviviendo ambas, en cierta armonía, algo que no está claro que ocurra en las próximas generaciones, nacidas ya en un medio completamente digitalizado⁶⁸.

Los actuales medios digitales, transforman la ideación arquitectónica de un proceso de

Figura 34. Mobile Art Chanel Contemporary Art Container, obra de Zaha Hadid (2008-2010).

⁶⁸ Un claro ejemplo de los cambios generacionales relacionados con la sociedad digitalizada es su implantación en los sistemas docentes. Finlandia es un claro ejemplo de ello, coexistiendo la enseñanza de la escritura a mano y la mecanografía, que se presenta desde el primer año como parte vital del esquema docente, que año a año integra en mayor medida estos medios, con los que todo alumno tendrá que interaccionar en su día a día. En palabras de Tapio Varis, *“La educación en medios de comunicación y la alfabetización digital han ocupado un lugar central en la política educativa finlandesa para hacer frente a las nuevas tecnologías y las destrezas comunicativas requeridas en el siglo XXI. (...)”*

Desde 2002 la reforma curricular ha fortalecido el papel de la educación en los medios, tanto en la enseñanza primaria como secundaria. El nuevo enfoque habla de “la comunicación y los medios”. (...)” (VARIS, Tapio, *“Finlandia: estrategia y destrezas comunicativas para la sociedad del conocimiento”*, España, Telos nº 72, julio-septiembre 2007).

reflexión mental, intrínsecamente ligado a las consideraciones propias de la experiencia vital del proyectista, a una simulación visual de la intervención, más objetiva. Las decisiones que toma el proyectista, no se mantienen en forma de imagen en su mente hasta el momento de la materialización del proyecto, sino que de forma previa se pueden evaluar sus consecuencias y validez, sirviendo de control previo a la construcción, que en muchos casos modifica los resultados obtenidos. Esto afecta, tanto a la concepción de los paramentos, como a la configuración espacial y en muchos casos permite evaluar las consecuencias de adoptar sistemas de mallas de pilares o soluciones de grandes luces, como sistema de evaluación, para sopesar la conveniencia de uno u otro en la problemática concreta. Como se ha puesto reiteradamente de manifiesto, la concepción estructural va intrínsecamente ligada a la espacial y en consecuencia las consideraciones que intervienen a la hora de tomar la decisión de su adopción van en paralelo.

La “*arquitectura digital*” permite entre otras cosas, idear arquitecturas fuera de los márgenes estéticos y espaciales de nuestro tiempo, como realidades alternativas que reflejan, tanto el mundo de lo que pudo ser, como de lo que en un futuro podría llegar a convertirse en nuestro panorama arquitectónico. En este ámbito aparece de forma tangencial todo el mundo del cine⁶⁹ y los videojuegos, que gracias a los medios digitales llega a introducir al espectador en estas realidades paralelas, haciéndole participe de ellas. Por secundario que pueda parecer este punto, resulta tremendamente valioso para el panorama arquitectónico, ya que de él se deriva una mayor aceptación social de los cambios estéticos asociados, a los nuevos materiales y técnicas constructivas. Los usuarios no se enfrentan ya a una realidad completamente nueva y desconocida, sino a una innovación sobre algo que antes ya pudo haber pasado por sus ojos. Quien puede discutir la radicalidad del diseño de proyectos como el Chanel Contemporary Art Container⁷⁰ de Zaha Hadid (Figura 34), cuya imagen recuerda las de tantas naves de ciencia ficción, con unos paramentos formados por paneles curvos, empleando superficies de doble curvatura, algo posible gracias a los medios de producción mediante máquinas de control numérico, que hacen factible esta nueva forma de concebir la arquitectura, formada por elementos que se alejan de los patrones repetitivos y la modulación como sistemas de organización espacial. Esta nueva libertad lleva asociadas nuevas formas de pensamiento y con

⁶⁹ El campo de la ciencia ficción siempre ha sido el caldo de cultivo de ideas imposibles en su tiempo, que el paso de los años en muchos casos han venido a trasladarse a la realidad. El campo de la arquitectura a este respecto, se ha concebido en múltiples ocasiones, como exaltación de estéticas existentes, hasta llevarlas a los márgenes de lo cultural, cuestionando sus principios e interpretación, modificando las connotaciones que lleva asociadas. En otras ocasiones lo que se plantea, son referentes espaciales y visuales, drásticamente diferentes de lo conocido, apareciendo en estos márgenes la aceptación de nuevas estéticas, que podrían llegar a asociarse en un futuro a los nuevos materiales y nuevas técnicas constructivas.

⁷⁰ El Mobile Art Chanel Contemporary Art Container es un pabellón desmontable, pensado para organizar exposiciones itinerantes. Esta obra ha pasado por Hong Kong, Tokio, Nueva York, hasta su emplazamiento actual en París. Este espacio expositivo de 700 m², ha pasado por múltiples ciudades, como un visitante, que sin relación con el entorno, se posa para mostrar lo que tiene por compartir con el lugar. Desde este punto de vista, al romper los nexos con el entorno, puede permitirse la licencia de emplear una estética tan innovadora.

ello estéticas que se alejan de la tradición, lo cual es un reto para su aceptación por el usuario, que intenta establecer subconscientemente un referente que le sirva para leer la arquitectura que se presenta ante él. Así la lectura de las nuevas tendencias arquitectónicas del siglo XXI, quieran o no, tienen como referente esos mundos ficticios que las experimentaron en un plano entre la imaginación y la realidad.

Cambian las herramientas con las que se desarrollan las pautas de reflexión y pensamiento relacionadas con la producción arquitectónica. Este hecho no es gratuito y amén de ampliar los márgenes para la producción espacial y otorgar una mayor libertad a la producción arquitectónica, establece una clara influencia sobre el proceso de pensamiento y las pautas que conducen hasta la definición del proyecto. En algunos casos quizás por la fascinación del cambio y las posibilidades de los nuevos recursos digitales, se han materializado proyectos de formas sinuosas e injustificables desde otro punto de vista que no sea el propio alarde visual (Figura 35)⁷¹. Este distanciamiento respecto de las soluciones más pragmáticas, en la

Figura 35. FRAC Centre, Orléans (Francia), obra de Jakob + MacFarne Architects y el estudio de estructuras Batiserf - Emmer Pflénninger ond Parnter AG (2013).

⁷¹ La ruptura con las geometrías y concepciones clásicas es clara, cuando vemos cuales fueron los proyectos aspirantes a los mejores diseños del año 2014, un premio emitido por el Design Museum de Londres. De los 76 nominados a esta categoría, algunos de los proyectos que hacen gala de la innovación, tanto a nivel formal como material, son: el FRAC Centre en Orléans (Francia), obra de Jakob+MacFarne y el Centro Heydar Aliyev en Baku (Azerbaiyán) obra de Zaha Hadid y Patrik Schumacher. Ambos proyectos ponen de manifiesto las virtudes de las nuevas formas, como medio de conformación de los espacios propios del siglo XXI, en base a unas libertades, que permiten construir lo que hasta hace escasos años eran solo propuestas inmaterializables.

inmensa mayoría de los casos, supone un incremento de los costes, lo cual requiere una clara justificación que apoye tal proceder y más en el marco actual⁷². Hoy nos encontramos en un periodo de inflexión donde se ha hecho evidente que los excesos realizados años atrás, tanto por una cuestión práctica, como moral, ya no son posibles. Toda intervención, debe de evaluar tanto un ajuste del factor económico durante la obra, como durante la vida útil de la edificación, no solo en términos monetarios, sino energéticos, en busca de la sostenibilidad de la solución adoptada. Si bien en un marco amplio del concepto, actúan medidas como la energía fotovoltaica, energía térmica y eficiencia energética, no debe olvidarse el factor espacial y las implicaciones ligadas a cada tipo de actuación (Figura 36). Este es el caso, como ya se ha comentado, de las estructuras laminares que entre otros razonamientos están en desuso en países como el nuestro, por su escaso aislamiento térmico y el sobre coste que ello supone en el uso cotidiano de estos edificios. En estos términos, las soluciones prefabricadas pueden otorgar una mayor economía durante la ejecución y mediante el uso de paneles específicamente diseñados, responder a las exigencias de aislamiento térmico y acústico mejor que cualquier otra solución. Así mismo, la reducción del número de soportes implica una menor interferencia con los usos, algo que si bien en programas como los de vivienda puede tener aplicaciones menos directas, en espacios que requieran una mayor flexibilidad resultan una clara ventaja.

Sin lugar a dudas la prefabricación ocupa un lugar importante en la arquitectura del siglo XXI, como ya auguraban todos aquellos ejemplos del XX, ya que calidad, economía y control de tiempos son algunos de los factores en los que este tipo de soluciones ofrecen grandes ventajas.

A la hora de interpretar la producción arquitectónica actual y el empleo que hace de los recursos espaciales propios de las grandes luces, es necesario establecer unas premisas relacionadas con la justificación de dicha elección. Dicha decisión puede venir dictada por una *“necesidad”* o por un *“deseo de alarde”*, aunque dichos términos no resulten siempre excluyentes el uno del otro. Así el proyecto surge, tanto como respuesta a una problemática previa, estableciendo un compendio de necesidades preestablecidas, como en un deseo de ir más allá, en un esfuerzo propositivo del proyectista que busca dar respuesta a necesidades no consideradas en el punto de partida y que hacen del proyecto un ente único. Precisamente en

⁷² En España en el año 2008 se inició una crisis inmobiliaria, que llevó asociada una reducción de los préstamos hipotecarios y las ventas, sobre todo en el sector de la vivienda, lo que condujo a una brusca caída de los precios de la vivienda. Esta situación condujo a la quiebra de promotoras y constructoras, destruyendo miles de puestos de trabajo. Esta crisis inmobiliaria fue en parte producida, tanto por la especulación del sector inmobiliario, como por la crisis económica mundial, que actuó como detonante para una situación ya de por sí insostenible.

En este marco socioeconómico se requiere un abaratamiento de la edificación para competir con el exceso de edificación existente. Este hecho modifica drásticamente los condicionantes proyectuales, cambiando el orden de prioridades durante el proyecto, exigiendo un mayor compromiso con la optimización y economía de medios, no solo durante el proceso de construcción, sino además durante toda la vida útil de la edificación. Por las anteriores consideraciones, se abren vías para la aceptación de nuevos materiales y técnicas constructivas, siempre que otorguen ventajas sobre los medios considerados tradicionales.

este segundo punto es donde aparece el “*alarde*”, como una posible solución a la hora de suscitar una respuesta emocional en el usuario. Aunque, surjan de donde surjan las consideraciones que marcan las pautas a las que responde el proyecto, el aspecto económico resulta un factor hoy en día considerablemente más limitativo que el técnico⁷³.

Al hablar de las grandes luces como alarde espacial, surge, y más en el actual panorama socioeconómico, la necesidad de justificar dicha elección, por ello se hace necesario

Figura 36. Estadio Nacional de Kaohsiung (Taiwan), obra de Toyo Ito (2009). En este estadio la cubierta fotovoltaica cubre el 75% de las exigencias energéticas de las instalaciones.

⁷³ El Gran Puente de Akashi Kaikyo (Japón, 1998) con sus 1.991, marca el record de luces en puentes suspendidos, un límite dimensional que desde el proyecto del puente del Estrecho de Mesina (Italia), con un vano central de 3,3 kilómetros se demuestra que es claramente superable con el estadio técnico actual. El rango dimensional contemplado por este último proyecto, aún se encuentran en un margen inferior al dictaminado por las limitaciones técnicas, estableciendo las limitaciones dimensionales, tanto por factores económicos, como funcionales, para lograr el proyecto que mejor responda a las problemáticas planteadas. En el caso del Gran Puente de Akashi Kaikyo, la elección de un rango dimensional tan elevado está justificado por; las corrientes de agua en ese punto, que dificultan la realización de las pilas en el lecho marino (limitando su número) y la interferencia que un mayor número de éstas producirían en un punto por el que pasa un intenso tráfico marítimo. La construcción de este puente supuso más de 3.000 millones de euros, una cuantía que expresa claramente las implicaciones que lleva la elección de una solución tan extrema y la necesidad de una amplia reflexión y estudio previo, que dictamine la solución más apta en todos los aspectos. Este ejemplo, en cuantías más reducidas, resulta extrapolable al general de las edificaciones y por ello demuestra la necesidad de justificar las acciones y la inversión que suponen para la conformación del proyecto. Las grandes luces son una solución proyectual con grandes ventajas, pero su adopción ha de ir acompañada de justificaciones que la avalen. Así mismo, los rangos dimensionales están sometidos a las mismas consideraciones y el establecimiento previo de unos requerimientos espaciales a los que la solución técnica ha de responder, para conformar la espacialidad del proyecto.

reflexionar sobre las consideraciones proyectuales en las que se fundamenta dicha elección. A este respecto más adelante se mostrará un análisis taxonómico de dicha problemática, en aras de establecer unas bases, sobre las que poder emitir juicios para la determinación de la procedencia de la adopción de soluciones de grandes luces, así como las repercusiones que tiene sobre el funcionamiento espacial y lectura del usuario, ambos factores clave a la hora de concebir, tanto los proyectos singulares, como aquellos que adoptan las grandes luces como forma de concebir la arquitectura.

Hoy ante el panorama de libertades que se presenta ante el proyectista, las implicaciones ligadas al diseño arquitectónico van más allá de las capacidades técnicas, apareciendo el factor de *“propiedad de la actuación”*, un punto de vista pragmático, ligado al marco de la intervención, dictaminando las limitaciones dimensionales aplicables al proyecto. *“En las últimas décadas y fomentado por la aparición de los primeros rascacielos a finales del siglo XIX, han ido apareciendo edificios más bien ensimismados, aislados, hechos más para la contemplación, despreocupados con la realidad que rodea el lugar donde se han construido. En este sentido, hemos podido observar cómo en Valencia Santiago Calatrava ha cultivado un nuevo parque plagado de edificios icónicos, que poco o nada tienen que ver con lo que les rodea. Formas caprichosas, elementales, ajenas a la escala de las personas para albergar un parque temático de la ciencia: un ojo que hasta parpadea, un gran costillar como si se tratase del esqueleto de un animal varado en la orilla del río, un casco de guerra que hace las veces de auditorio y otro sinfín de elementos cónicos parecidos a conchas u otros animales marinos que parecen haber venido de otro mundo. No es casual que el remake de la serie de los 80 V haya utilizado imágenes del recinto de la Ciudad de las Artes y las Ciencias para ambientar el interior de una nave nodriza de la serie de alienígenas. De forma más reciente, también aparece el auditorio de Tenerife, donde una exuberante vela doblada no quiere más que deslumbrar a todo el que viaje a la isla. Pero el que pienso es el colmo es el nuevo Palacio de Congresos que está construyendo en Oviedo, donde parece que una nave espacial (algo así como la nave Enterprise de Star Trek) ha aterrizado en la ciudad. No hay una relación con el entorno, una vocación de asumir la ciudad preexistente, sino más bien un jeh, ya estoy aquí, he llegado a la ciudad!”*.⁷⁴

Como se ha puesto anteriormente de manifiesto, se ha pasado de un marco de limitaciones técnicas, a uno de limitaciones económicas, una tendencia que se refleja en la concepción arquitectónica⁷⁵ y el papel de las soluciones técnicas de grandes luces.

El conocimiento adquirido a través de las generaciones, determina nuestra actual forma de concebir el mundo y éste no puede ser desaprendido, dictando los cimientos para los desarrollos futuros, como parte de la esencia que hoy nos caracteriza. En base a esta verdad

⁷⁴ GONZALO MARTÍN, Román, *“Objeto no identificado”*, Valencia (España), d[x]i magazine nº38, febrero de 2012.

⁷⁵ Al decir que hemos pasado de un marco de limitaciones técnicas a otro de limitaciones económicas, se habla como elemento definitorio de los límites superiores de la producción arquitectónica, ya que la economía siempre ha sido un punto de vital relevancia a la hora de la elección de la conformación espacial y material del proyecto.

incuestionable, para concebir un mejor mañana, debemos conocer mejor nuestro presente, como marco en el que se desarrolla la producción arquitectónica, siendo el ámbito de las grandes luces, el sendero que a lo largo de toda la historia de la construcción, ha determinado con más propiedad las características de la concepción espacial ligadas a un tiempo, como reflejo de éste, sus intereses y estadio técnico. La arquitectura de grandes luces dibuja desde sí misma un reflejo de los tiempos en que se produce.

1. Los requerimientos proyectuales. Las grandes luces como respuesta a exigencias previas y generadas

A la hora de germinarse todo proyecto arquitectónico, se contemplan varios factores de vital relevancia para la concepción de su formalización. En su mayor parte la arquitectura surge como respuesta a unas “*necesidades previas*” que han de ser satisfechas, aunque durante el proceso proyectual, como reflexión sobre los factores determinantes a tener en cuenta en el proyecto se pueden llegar a plantear cuestiones ajenas a las consideraciones de partida. Así el proceso creativo es tanto una reacción a unos requerimientos, como el origen conceptual para otras “*necesidades generadas*”, como medio para conformar proyectos, que más allá de la hipótesis de partida, sean capaces de suscitar una espacialidad propia de la contemporaneidad.

Desde un punto de vista cronológico, podemos distinguir entre necesidades previas y necesidades generadas, aunque dicha diferenciación hace solo referencia al origen de dicho factor, sin tener en cuenta las valoraciones que realmente nos permiten distinguir los tipos de necesidades que se plantean en el ámbito arquitectónico. Además la distinción taxonómica de las diferentes necesidades planteadas ha de tener un carácter pragmático que permita el establecimiento de los factores que determinan las motivaciones para las decisiones proyectuales. En estos términos, se pueden distinguir cuatro grandes tipos de necesidades: las sociales, técnicas, representativas y espaciales.

Todo proyecto arquitectónico surge de un acto reflexivo, en el que, en raras ocasiones se dará respuesta a un único factor y por ende, surge como balance de múltiples consideraciones a las que se ha de dar respuesta. Dichas consideraciones se plantean desde el punto de vista: programático espacial, técnico, representativo y estético. Como resultado surge el proyecto, como prototipo, un ente único que da respuesta a un compendio singular de circunstancias. Además todo el proceso creativo se encuentra supeditado a arquitectos e ingenieros, que con procesos mentales claramente matizados por su experiencia vital, plasman su visión del mundo en la respuesta que la arquitectura da a las problemáticas planteadas. Así, se genera un panorama lleno de matices personalistas ligados a un tiempo, tanto al nivel personal de los que la concibieron, como del marco socioeconómico y técnico, además de las necesidades a las que sirve de respuesta. En definitiva, la arquitectura es una respuesta material, tanto a la pregunta formulada, como a aquella que permanece oculta, hasta que se comienza a plantear la respuesta.

La arquitectura como respuesta a una multiplicidad de preguntas implícitas y explícitas, está supeditada a un amplio rango de factores que conforma el caldo de cultivo en el que se gesta el proyecto. Desde los mismos comienzos de la arquitectura, el hombre busca humanizar su entorno, transformándolo en un medio más propicio para su presencia, de este hecho ha surgido un arte, tanto a nivel conceptual, como técnico, dibujando el actual marco en el que se desarrolla la actividad del arquitecto. Así todo proyecto solo resulta entendible gracias al conocimiento del marco específico en el que surge y del que parte como respuesta específica.

Ya que la arquitectura no se puede establecer como respuesta directa e irreflexiva a una serie de parámetros, es necesario recapacitar sobre cada uno de los tipos de necesidades que intervienen en su creación, como formas de pensar y líneas de actuación asociadas. Las necesidades no establecen réplicas fijas, sino tendencias y marcos de actuación, que combinados dictan líneas comunes, que concilian una respuesta única a las problemáticas suscitadas.

Como se ha comentado anteriormente las tres líneas básicas que se pueden diferenciar a la hora de clasificar los tipos de exigencias previas que se presentan en la raíz de un proyecto son⁷⁶:

Necesidades sociales

En este ámbito nos encontramos ante un factor completamente ajeno al propio elemento arquitectónico, residiendo la influencia sobre éste en las exigencias del hombre sobre el concepto materializado, que busca tanto la respuesta a los *“requerimientos funcionales”*, como a los *“requerimientos representativos”*.

La primera es una vía, que de forma relativamente directa, en función de usos determina las formas y estructuraciones más aptas. Un ejemplo clarificador de ello son las normativas aplicables a la vivienda pública en España, que dictaminan de forma objetiva las dimensiones que son consideradas adecuadas para determinados usos⁷⁷, así como las proporciones y dimensiones de las aperturas de los paramentos, un marco rígido dictaminado en términos puramente pragmáticos, pero que pese a ello, en nuestro país gracias a la suma de otras consideraciones añadidas a estos formalismos, han servido de caldo de cultivo para la experimentación espacial y como en el caso de Madrid han dado lugar a obras como El edificio mirador (2005) (Figura 37) y edificio celosía (2001-2009) (Figura 38) de MVRDV y la casa voladora (2008) (Figura 39) de Salvador Pérez Arroyo y Eva Hurtado Torán, entre otros que ejemplifican la potencialidad del uso de las grandes luces en proyectos de vivienda, como forma de entender los espacios comunes que constituyen la vecindad y forman comunidades más reducidas dentro de la trama urbana.

⁷⁶ Esta diferenciación resulta básica, pero establece los principios que permiten la comprensión de las valoraciones adoptadas en la toma de decisiones en la proyección arquitectónica. La labor del arquitecto es sumamente compleja, debiendo compaginar un sinnúmero de conceptos, lo que permite que la arquitectura sea un campo tan sumamente rico y complejo que haya imposibilitado su sistematización y organización como una ciencia. Con esta realidad en mente, la simplificación de la toma de decisiones a las necesidades: sociales, técnicas, representativas y espaciales, se entiende como un medio para adentrarse en este ámbito complejo.

⁷⁷ Al hablar de vivienda pública, es necesario comentar que en ésta, intervienen los conceptos de mínimos, confeccionando espacios capaces, según tales consideraciones, de dar una respuesta habitacional ajustada en dimensiones y costes a las exigencias de la sociedad. La vivienda pública se contempla como medio para el cumplimiento del derecho a la vivienda, tipificado en el artículo 47 de la constitución española de 1978, aunque a efectos prácticos dicho punto esté lejos de su cumplimiento real.

Figura 37. Edificio Mirador, Madrid (España), obra de MVRDV y Blanca Lleó (2005).

Figura 38. Edificio Celosía, Madrid (España), obra de MVRDV y Blanca Lleó (2001-2009).

Figura 39. Edificio Vallecas 8, Madrid (España), obra de Salvador Pérez Arroyo y Eva Hurtado Torán (2008).

En el caso de la segunda, los requerimientos representativos, son un factor clave a tener en cuenta, ya que a lo largo de la historia, las grandes luces se han empleado como un medio de representación, ensalzando en muchos casos la importancia de ritos, colectivos, espacios públicos... Desde este punto de vista vemos como en el siglo XIX ante la aparición de un nuevo tipo de espacios, como son las estaciones de ferrocarril, que debían responder a las necesidades funcionales que exigía ese nuevo medio de transporte, se idearon edificaciones que iban más allá, entendiéndolos como las nuevas puertas de la ciudad, una representación de progreso y grandiosidad, que en buena medida revelaba al visitante la importancia de la urbe en la que se encontraba (Figura 40). Una lectura más ambiciosa, que concebía la amplitud como medio de representación del espacio público⁷⁸. Este hecho condujo a optar por soluciones acordes a los nuevos tiempos, empleando estructuras trianguladas de acero, en forma de arcos triarticulados⁷⁹.

Por otra parte, como hemos comentado, el ensalzamiento de un determinado culto o colectivo también se ha relacionado con la utilización de las grandes luces, como las empleadas en templos religiosos, que aparte de como exigencia para las reuniones de un gran público, busca el sobrecogimiento de éste

Figura 40. Estación de Atocha, en Madrid, edificio de Alberto Palacio, inaugurado en 1892.

Figura 41. Cúpula de Santa María de las Flores (Florencia), obra de Filippo Brunelleschi (1418-1446). De 114 metros de alto x 41.7 metros de diámetro.

⁷⁸ La concepción de las estaciones bajo las premisas de representación del espacio público, explican el razonamiento por el que este tipo de edificaciones emplea grandes luces, en lugar de mallas de pilares, con una luz mínima marcada por las dimensiones del ferrocarril, solución que resultaría probablemente la más lógica si nos coartamos a los factores meramente funcionales.

⁷⁹ Los arcos triarticulados eran una de las formas estructurales más extendidas en el siglo XIX para las grandes luces en estructuras metálicas, ya que conforman un esquema estructural que supone una reducción de los momentos máximos resistidos y por tanto una minoración del material requerido para su ejecución.

por la magnificencia de las salas en las que se realizan tales ritos. Se podrían enumerar muchos ejemplos, en los que la significación espacial trasciende sobre la propia edificación, como en el caso de Florencia y Siena que competían entre sí en un intento de sobresalir, la una sobre la otra, en importancia como urbe y centro cultural. Un ejemplo arquitectónico de dicha rivalidad es el intento de construir la catedral con una cúpula de mayor tamaño, reto que ganó Florencia con Santa María del Fiore, aunque para ello fue necesario un amplio margen temporal y una apuesta técnica como la planteada por Filippo Brunelleschi (1377-1446) (Figura 41).

En conjunto, las necesidades representativas hacen referencia a una exigencia abstracta de representación e incluso de aquiescencia, cuyo valor sobrepasa cualquier respuesta meramente funcional, que hubiera podido conducir a la materialización de un proyecto limitado a tales términos.

Tanto los requerimientos funcionales, como los representativos se conjugan para dar respuesta a las exigencias propias de la sociedad y la humanización del entorno. Esta concepción ha existido a lo largo de los siglos, cambiando según los ojos del observador, aunque durante los últimos siglos este hecho ha sido especialmente patente con algunos movimientos arquitectónicos, como el Art Nouveau. Henry Van de Velde, como uno de los principales representantes del Art Nouveau, expresa sus esperanzas en el cambio de la concepción arquitectónica a finales del siglo XIX, como respuesta al hombre y la naturaleza, más que a las pautas lingüísticas acuñadas con los siglos y así lo expresa cuando dice: *“Mis esperanzas en lo que se obtendría con la liberación de la tutela del pasado y el comienzo de un nuevo periodo en el diseño eran tan grandes como las tuyas, pero sus ilusorios anhelos no bastan para satisfacerme. Sabía que debíamos cavar mucho más hondo, que el objetivo a conseguir era mucho más importante que la simple novedad que, por su propia naturaleza, solo puede ser efímera. Para llegar a esto debía empezar por apartar los obstáculos que los siglos habían acumulado en nuestro camino, contener los ataques de la fealdad y desafiar cualquier influencia capaz de corromper el gusto natural... Creía firmemente poder conseguir mis fines... en virtud de una estética fundada en la razón, y por lo tanto inmune al capricho. Y, siendo plenamente conscientes de que la falsedad puede manchar a los objetos inanimados, exactamente igual como degrada el carácter del hombre y la mujer, confiada en que mi honradez resistiría las múltiples insidias de la falsedad”*⁸⁰. Este es un punto de inflexión para la concepción arquitectónica, que nos conduciría a la aparición de la arquitectura moderna y la línea de pensamiento que nos conduce hasta la actual forma de interpretar los factores que influyen sobre el acto creativo. A este respecto Le Corbusier representa un papel fundamental al abrir el campo de pensamiento y referencias relativas a la arquitectura al establecer los principios que *“Reducen los objetos a su sencillez más arquitectónica, denominando sus casas como máquinas prácticas para vivir en ellas”*. En este sendero en la definición de conceptos, Ludwig Mies Van der Rohe, establece nuevamente un punto clave con la célebre frase *“menos es más”*. Con esta frase tan escueta, establece una firme postura ante la concepción tradicional de la arquitectura, así desprovista de lo superfluo y concebida desde el pragmatismo y la técnica, alcanza la obra la belleza pura y atemporal, fundada en la fidelidad a las necesidades a las que la arquitectura da respuesta (Figura 42).

⁸⁰ Cita de Henry Van de Velde.

Las transformaciones ideológicas y sociales, han modificado drásticamente a lo largo de los siglos la concepción del pragmatismo y la representatividad, como dos caras de la arquitectura. Ambas facetas se combinan para confeccionar la obra, que puede ir desde los puros extremos, hasta el punto intermedio en el que se presenta la mayor parte de la producción arquitectónica. Ambos límites, serían: desde el extremo de la pura representatividad, sin atisbo de pragmatismo, encontraríamos la escultura y el arte, como medio puramente expresivo, mientras que en el extremo opuesto, la funcionalidad pura sin consideraciones expresivas, encontraríamos las obras de ingeniería civil, como respuesta ajustada a la problemática marcada previamente. Así desde los extremos, en los que también encontramos gradaciones, vemos como la arquitectura se establece como diálogo de opuestos. Tanto los factores expresivos, como funcionales, debidamente compaginados, dan lugar a interpretaciones diversas de la espacialidad arquitectónica, formando tipologías proyectuales reconocibles, dictaminadas por el marco en el que se desarrollan y en el que se leen. Así, la contemporaneidad no solo implica la influencia sobre la producción arquitectónica actual, sino además la lectura que se hace de cuanta obra hemos heredado del pasado.

El empleo de soluciones de grandes luces, hasta el siglo XIX obligaba a trabajar en los márgenes de las limitaciones técnicas, un esfuerzo ímprobo que añadió a este hecho connotaciones innegables, que lo establecían como medio de representación y forma de ensalzar no solo la espacialidad arquitectónica, sino la actividad en ella realizada en dichos márgenes. Éste es el caso de las edificaciones religiosas, que durante siglos fueron el referente espacial, ensalzando el culto en ellos realizado, suscitando un mayor interés e implicación del usuario. Todo ello cambia en el siglo XIX, cuando la aparición de las estructuras metálicas

Figura 42. Neue Nationalgalerie (Nueva Galería Nacional) de Berlín (Alemania), obra de Ludwig Mies van der Rohe, fue inaugurado en 1968. Es un ejemplo que pone de manifiesto su convicción de *“menos es más”*.

amplía los rangos dimensionales, más allá de la espacialidad arquitectónica en términos programáticos. Las arquitecturas de grandes luces pasaron a ser un recurso más económico y fácil de alcanzar, pasando de ser el sumun representativo del poder, a un medio aplicable a ámbitos como la representación urbana, sin otras connotaciones relativas al poder, como ejemplifica la producción de estaciones de ferrocarril, que como hemos comentado, surgieron de un requerimiento técnico del nuevo siglo, para constituirse como elemento representativo de la propia urbe⁸¹. Las grandes luces se constituyen tanto como respuesta funcional, como representativa, cambiando en mayor medida las connotaciones a este respecto con el paso de los años.

Los conceptos anteriormente expuestos, son aplicables de forma global a toda la producción arquitectónica, pero resultan especialmente relevantes para la comprensión de las obras de grandes luces, que requieren un mayor esfuerzo para la conformación espacial. Este empeño por emplear espacios de mayores dimensiones, requiere una justificación especialmente fundada, por lo que encuentran su origen en los extremos, tanto del pragmatismo, enfocado en aquellos usos que requieren una mayor libertad espacial y una menor interacción con la estructura, como aquellos que en su empleo encuentran un medio para la expresión de ideas ajenas a la propia obra. Todo ello nacido de las necesidades del hombre relativas a la adaptación del medio a las exigencias que plantea su existencia.

Necesidades técnicas

Anteriormente se ha mostrado la arquitectura como una dualidad tensional entre los factores prácticos y expresivos, en el que las necesidades sociales suelen emplazarse en un punto intermedio, en un intento de confeccionar un entorno más propicio para el hombre. Aunque se hayan mostrado ambos extremos como campos de la producción del hombre independientes del concepto arquitectónico, ciertamente la producción arquitectónica alcanza dichos márgenes, debido al planteamiento de cuestiones extremas, que marcan el desarrollo de la proyección arquitectónica. A este respecto se plantean las necesidades técnicas, como aquel factor más pragmático que enfoca los esfuerzos en la superación de ciertas barreras impuestas por el medio.

Este punto resulta más obvio cuando hacemos alusión a obras de ingeniería como puentes, acueductos..., que responden a una necesidad técnica clara, como pueden ser; conectar las orillas de un río o configurar un medio de transporte hasta una cumbre con un teleférico... Ya que en ellos resulta evidente la carencia previa que induce a salvar un obstáculo existente, siendo la idea central de toda la obra. En el ámbito arquitectónico surgen este tipo de requerimientos a multitud de escalas, como condicionantes previos que supeditan la concepción proyectual. Un ejemplo cercano lo encontramos en la torre del BBVA, realizada

⁸¹ Recordamos, que las estaciones de ferrocarril plantean en el siglo XIX una nueva problemática espacial, ligada a un elemento tecnológico como el tren, suscitando una respuesta que desde soluciones pragmáticas, opta en numerosas ocasiones por modelos espaciales de grandes luces, por consideraciones ajenas a las meramente funcionales, como forma de representación espacial.

entre 1978 y 1981 en Madrid (España) por Saénz de Oiza (1918-2000)⁸² y el ingeniero Javier Manterola Armisen (Figura 43). Este proyecto dentro de AZCA cuenta con un recinto con condicionantes muy particulares, ya que por el centro del solar discurren los túneles de cercanías que conectan las estaciones, de Atocha en el sur de la capital, con la de Chamartín al norte, un condicionante de partida fundamental para comprender el reto que suponía conformar sobre el trazado férreo una torre, sin que se produjeran interferencias indeseadas. Por esta causa, el núcleo central de la torre se dividió en dos de menor entidad, situados cerca de los extremos, para dejar libre la franja de las vías, que pasa entre ambos, conformando una sorprendente solución en la que desde estos grandes soportes se configuran una serie de plataformas sobre las que se apoyan edificaciones conceptualmente independientes, ya que los soportes de la edificación erigida sobre cada una de ellas no llegan a tocar con la dispuesta justo encima. Esta solución sorprendente, reduce los problemas relativos a la construcción de la torre, al resolver por un lado los paquetes de oficinas con sus problemáticas sobradamente conocidas y de forma independiente una macroestructura que es capaz de unificar el funcionamiento del conjunto para que el proyecto no aparezca como una adición de elementos, sino como una unidad indisoluble. La rotundidad de esta obra, en buena parte, surge del requerimiento técnico inicial, que impone una complejidad añadida a la resolución del proyecto. En esta obra las grandes luces surgen como herramienta para la resolución, tanto de la necesidad técnica inicial, como de la organización espacial y funcional del conjunto, organizando los volúmenes conceptualmente independientes comentados anteriormente. A nivel estructural⁸³ es un referente y una apuesta por la experimentación espacial, que desde el punto de vista de la espacialidad interior confecciona una serie de plantas bajo las plataformas en las que desaparecen la trama de pilares, surgiendo la magia del volumen de la torre que parece levitar sustentado desde el doble núcleo central, como única conexión visual entre planos horizontales. Esta obra surge de motivaciones técnicas y consideraciones pragmáticas, como el propio Saénz de Oiza expresa, al afirmar que no quería que su obra fuera un objeto visual. Pero pese a los deseos del artífice la belleza conceptual de la obra y la conformación exterior de la misma le han otorgado una presencia visual en la urbe, estableciéndola como un icono dentro de la Castellana. Así en esta obra podemos ver la relevancia de diferenciar entre las motivaciones y consideraciones proyectuales y sus repercusiones a nivel espacial, social y técnico. No siempre estas últimas son una respuesta directa a la obra o a las consideraciones tomadas en su concepción.

⁸² Este proyecto fue el ganador en el concurso celebrado en 1971 para la construcción de la sede social del Banco de Bilbao en Madrid en el centro financiero AZCA. Originalmente era la Torre del Banco Bilbao, cambiando de nombre con las posteriores fusiones entre entidades bancarias.

⁸³ La estructura de este edificio fue diseñada y calculada por Carlos Fernández Casado, Javier Manterola Armisen y Leonardo Fernández Troyano.

En el ámbito puramente arquitectónico, otro ejemplo de requerimientos técnicos previos, que condicionan la concepción proyectual es el MASP⁸⁴ (Figura 44), museo realizado por Lina Bo Bardi⁸⁵ en São Paulo, en esta obra se puede observar el volumen expositivo suspendido de un inmenso pórtico, que permite que bajo el edificio se configure una gran plaza, en la que no

Figura 43. Torre BBVA (originalmente la torre del Banco de Bilbao), en Madrid (España), obra de Francisco Javier Sáenz de Oiza y el ingeniero Javier Manterola Armisén (1978-1981). En la sección transversal se ven los túneles de los trenes de la red de cercanías y los dos soportes centrales, en los que se apoyan los distintos paquetes edificatorios superpuestos.

⁸⁴ MASP, Museo de Arte de Sao Paulo, realizado por Lina Bo Bardi en 1957 e inaugurado en 1968.

⁸⁵ La estructura del Museo de Arte de Sao Paulo fue posible gracias al trabajo del ingeniero José Carlos de Figueiredo Ferraz y el empleo del hormigón postensado.

aparece ningún soporte, logrando enlazar visualmente la Avenida Paulista y el parque de Trianón, con la vista de la ciudad que se presenta tras el edificio, gracias al gran desnivel en el que se encuentra el museo. Precisamente esta conexión visual sin interrupciones, era el principal punto de partida, como condicionante impuesto por el anterior propietario del terreno, que lo cedió con dicha cláusula. Así, aunque de forma auto impuesta, se presenta un requisito técnico, que sirve de germen del proyecto y actúa como espina dorsal que lo estructura, estando claramente patente en la imagen y sentir del edificio, anteponiéndose a cuestiones estéticas. Así mismo la ausencia de soportes interiores en el nivel superior del volumen suspendido y la escasa entidad de estos en la planta primera, otorgan gran libertad para la conformación de exposiciones y actividades, generando en palabras de Lina Bo Bardi un *"museo vivo"*, siempre en pleno cambio y con la palpitante actividad de la exposiciones periódicas, las conferencias y concursos, que hacen de estos espacios un centro activo de la vida cultural de la urbe. El requisito espacial conlleva en sí mismo un requisito técnico, haciendo de su resolución un alarde expresivo de la técnica, el hormigón postensado y el colorido de los elementos transmiten al usuario la firmeza de los ideales, al tiempo que el volumen suspendido deja volar las ideas, retando las reglas de la cotidianidad.

La concepción de la arquitectura desde tiempos remotos, se ha entendido como un arte, dependiente de factores culturales y técnicos, mostrando la obra como una respuesta personalista, generalmente claramente vinculada al autor. Pero este arte responde a un proceso mental claramente vinculado a un conjunto de requerimientos previos, entre los que los aspectos puramente técnicos se han posicionado más como medio de respuesta que como

Figura 44. MASP (Museo de Arte de São Paulo), São Paulo (Brasil), obra de Lina Bo Bardi (1956-1968).

imposición previa, a excepción de las obras tanto de ingeniería civil como de aquellas enmarcadas en el ámbito de las grandes luces y con especial mención a edificios religiosos y símbolos del poder. Si bien el siglo XIX vino a romper esta simbología casi divina de las arquitecturas de grandes luces, su influencia sobre el espectador no se vio en forma alguna mermada, sino todo lo contrario. El mayor abanico técnico ha hecho posible, que el recurso espacial de las grandes luces se haya constituido como respuesta factible a multitud de problemáticas arquitectónicas. Las exigencias técnicas han tomado las grandes luces como medio capaz de materializar sus requerimientos, no todos ellos limitaciones físicas. Una de estas situaciones es la libertad o flexibilidad espacial, que como veremos más adelante ha dado paso a una reinterpretación de la espacialidad arquitectónica, como un ente vivo y cambiante no coartado por los condicionantes específicos relativos a una actividad única, pudiendo modificarse ésta dependiendo del marco temporal. No cabe lugar a duda de las ventajas de la flexibilidad espacial que caracteriza a un proyecto como el Centro Nacional de Arte y Cultura George Pompidou de París (Francia) (Figura 45), inaugurado en 1977, obra de Renzo Piano (1937) y Richard Rogers (1933), una de las primeras obras del High-Tech. Este edificio es capaz de transformar su interior para adaptarse a las distintas exposiciones y actividades que acoge a lo largo de los años. Esta obra en concreto pone de manifiesto otro punto clave dentro del marco de necesidades técnicas y que ha dado lugar a un amplio grupo de arquitecturas, la eventualidad y necesidad de montar y desmontar la edificación. Si bien este edificio no se ha desplazado de su emplazamiento original, a nivel técnico es una estructura desmontable, que podría haber trasladado su ubicación a lo largo de los años si los condicionantes externos lo hubieran requerido, si bien éste no era uno de sus principales enfoques. La imagen fabril de esta obra es una clara provocación al entorno, claramente condicionado por unas reglas formales, que deciden trasgredir al extremo, creando un hito dentro de la trama urbana. El edificio se concibe como una máquina de exponer, transformable y adaptable a las circunstancias, desdeñando aquellas reglas ajenas a su razonamiento funcional, que le vienen impuestas por la herencia del lugar.

Las arquitecturas efímeras son aquellas que modifican su emplazamiento de forma

Figura 45. Centro Nacional de Arte y Cultura Georges Pompidou de París (Francia), obra de Renzo Piano y Richard Rogers (1977).

premeditada, por lo que, tanto la resolución técnica, como espacial se ven condicionadas, así como su concepción del entorno, desligándose de éste, como marco cambiante e independiente de la concepción de la espacialidad y estética del proyecto, como ente independiente.

Por lo tanto la concepción del proyecto se encuentra claramente influenciada por aquellas consideraciones referentes a las exigencias técnicas que marcan su proceso de concepción, aunque no resulte una línea de pensamiento independiente y el proyecto tenga que dar respuesta a otras necesidades y consideraciones que determinarán su materialización. Las necesidades técnicas posiblemente resulten las más puramente arquitectónicas y cuya resolución obtiene un resultado más valioso, tanto a la hora del progreso en el ámbito constructivo, como en la experimentación espacial. Particular mención exigen las soluciones de grandes luces, ya sean dictadas por requerimientos del entorno o consideraciones relativas al funcionamiento del edificio, estableciendo barreras dimensionales que solo una marcada concepción técnica del espacio puede llegar a materializar. Aunque los rangos de luces empleados disten de las limitaciones dimensionales relativas a un tiempo, constituyen un reto a la cotidianidad, que de forma irremediable siempre lleva asociadas unas connotaciones, que ofrecen una lectura más rica que la mera respuesta a la problemática preexistente. La lectura de este tipo de arquitectura cambia con los años, pero los razonamientos que la dieron lugar y los fundamentos técnicos en los que se basa permanecen inalterables en el tiempo. Así este tipo de requerimientos son los que ofrecen una lectura más reveladora y fiel de las circunstancias que dieron lugar a la obra arquitectónica, aunque en la inmensa mayoría de los casos, resulten una pieza del crisol que forma la compleja concepción del proyecto.

Este tipo de requerimientos, aunque obviamente se encuentren presente en la gran mayoría de los proyectos de grandes luces, no suelen ser los principales a la hora de idear el edificio. A lo largo de la historia se ha concebido, más como una superación de las limitaciones físicas a la producción arquitectónica, que como un auténtico germen creativo, aunque hoy seamos capaces de reconocerlo como tal y realizar ese tipo de lectura de las obras que nos vienen heredadas. En el actual marco de libertades espaciales y técnicas vigentes, este tipo de requerimientos se alejan de los límites dimensionales de la producción del hombre. Así este tipo de exigencias se concentran en mayor medida en la resolución técnica y el desarrollo de tipologías estructurales, desde el arco hasta las mallas espaciales, que pueden dar respuesta desde requisitos dimensionales, hasta otros relativos al uso como la temporalidad de la instalación o su transformación para adaptarse a múltiples circunstancias.

Necesidades Representativas

En el extremo opuesto a los requerimientos técnicos, podemos encontrar los estéticos o representativos, como otra respuesta arquitectónica a las exigencias marcadas por la sociedad. La arquitectura, como hemos visto en la torre del BBVA en Madrid de Saénz de Oiza, es inseparable de una lectura en términos estéticos, volumétricos y espaciales, sean cuales sean las consideraciones que influyeron en su realización. En un amplio rango de casos las exigencias del proyecto cuentan con factores relativos a su lectura por el conjunto de la sociedad. Esta respuesta puede ir desde la generación de una imagen icónica fácilmente

reconocible, asociada a una empresa u otro ente, que se beneficia de esta asociación, hasta el establecimiento de un diálogo visual con el usuario, que oriente a patrones de uso o atracción, siendo en ambos casos esencial la concepción dialéctica de la obra.

Encontramos edificios que se valen de las herramientas expresivas a todas las escalas, apareciendo desde los proyectos de vivienda (Figura 46), que buscan la diferenciación y atracción dentro de la trama urbana, como una forma de suscitar el interés de los vecinos, para lograr el óptimo funcionamiento de los espacios públicos definidos, hasta en un extremo más pragmático generar una imagen icónica, que sirva de representación material del ente etéreo que son las empresas, como una representación de poder, como en el caso del Edificio Chrysler (1928-1930), hasta una exposición de los valores por los que se guía, como en el caso de la sede de Endesa en Madrid (1999-2003).

Las herramientas de diseño espacial asociadas a las grandes luces, debido a su impacto sobre el usuario, a nivel visual y perceptivo, constituyen uno de los principales recursos indirectos empleados en la actualidad a la hora de llevar a efecto los casos más exacerbados de representación arquitectónica, por lo que a la hora de analizar las arquitecturas que emplean este tipo de recurso espacial el factor representativo suele ser vital para su entendimiento.

El factor representativo o en términos más genéricos, la estética como elemento lingüístico y de interacción con el usuario, como se ha puesto de manifiesto en repetidas ocasiones, ha estado patente a lo largo de toda la historia de la arquitectura, hasta el punto de ser los términos en los que se ha establecido el entendimiento histórico de la arquitectura, como movimientos estéticos y un compendio de recursos que concebidos de distinta manera a lo largo de los años han logrado conformar imágenes reconocibles por el usuario y que éste asocia a determinados actos y lugares.

Edificios religiosos y representativos de los distintos poderes son claramente reconocibles, no solo por los recursos y materiales de los que disponen, sino por la estética asociada a ellos. Por esta causa cuando aparece una nueva concepción de la arquitectura, como la suscitada con el

Figura 46. Apartamentos Wozoco en Amsterdam (Holanda), obra de MVRDV (1994-1997).

surgimiento de las estructuras metálicas en el siglo XIX éstas son inicialmente rechazadas, ante la ruptura con el continuismo con los referentes a los que el usuario se encuentra familiarizado. En estos términos el ornamento surge como una forma de adaptar imágenes inicialmente rechazadas a otras que pueden establecer referencias con producciones previas. La estética y el ornamento son un campo clave en la lectura visual de la arquitectura con el paso de los siglos y su distinción geográfica, ejemplo de ello, son las connotaciones que implicaba en el siglo XIX erigir una pagoda en China, Japón, Corea..., donde tienen claros fines religiosos o este mismo objeto emplazado en el Real Jardín Botánico de Kew⁸⁶ en Reino Unido, se percibe como un elemento exótico y bello sin las implicaciones heredadas de la historia y el contexto religioso que las justifica más allá del factor visual e icónico.

Un ámbito en el que actualmente resultan especialmente significativas las necesidades representativas, son los edificios de oficinas entendiendo la arquitectura como imagen de marca. Esta interpretación de la arquitectura como representación material de entidades como empresas y corporaciones, se encuentra especialmente patente durante las últimas décadas, cuando multitud de éstas han decidido erigir grandes centros donde concentran sus actividades, transmitiendo una imagen de sí mismos al mundo, a la vez que logran una mayor eficiencia en su administración. Hoy el poder de las empresas no se ve representado arquitectónicamente por el empleo de órdenes clásicos o materiales nobles, sino por el reto espacial implícito en las edificaciones a las que se vinculan y en consecuencia las soluciones de grandes luces son una de las principales opciones a tener en cuenta. Así vemos como en las últimas décadas Empresas como Gas Natural, Endesa, Telefónica... han erigido nuevas sedes, en las que en menor o mayor medida las grandes luces aparecen como herramienta espacial, vinculando estas decisiones a un esfuerzo por representar la firmeza y valores de la entidad que personifica. En esta línea podemos ver dos ejemplos especialmente ilustrativos, en el marco arquitectónico español.

El primero de ellos es la sede de Gas Natural en Barcelona, la Torre Mare Nostrum (2006), obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue. En este ejemplo, la torre se alza sobre el terreno, no de forma unitaria, sino fragmentada, como dos olas a punto de chocar, introduciendo la tensión de este punto y la de las ondas, que se alejan del núcleo de la torre, para terminar en unos amplios voladizos que se extienden más allá de los límites de ésta, llegando al perímetro de la parcela. Esta obra se esfuerza en hacer ciudad, configurando en el plano del suelo una topografía artificial, que los vecinos habitan, mientras el edificio de Gas Natural sobrevuela sus cabezas (Figura 47). Esta integración liga el proyecto en la actividad cotidiana de los habitantes de la ciudad y establece un punto de atención. Así el proyecto actúa como nuevo espacio urbano para el disfrute de los vecinos y ente icónico emplazado junto a una de las principales vías de circulación de Barcelona. Deberíamos destacar que el principal volumen en voladizo continúa con la orientación de las edificaciones que limitan con la Ronda Litoral, como nexo con las edificaciones que lo rodean, mientras el resto de los gestos transgreden las normas

⁸⁶ William Chambers (1723-1796) construyó varias edificaciones en el Real Jardín Botánico de Kew, entre las que se encuentra una pagoda china realizada en 1761. Esta pagoda imita el diseño de las pagodas chinas del periodo Taa, dividiéndose en diez niveles octogonales, que parten de un diámetro en el nivel inferior que alcanza los 15 metros, reduciéndose paulatinamente según se alza hasta los 50 metros de su cúspide.

dictadas por el lugar. Así precisamente el punto donde el proyecto establece un reto espacial, volando la edificación, alejándose de las limitaciones dictadas por la gravedad, es donde conceptualmente establece un nexo con el entorno. El principal volumen en voladizo de la torre emplea como solución una cercha, realizada en acero, al igual que el resto de la estructura, a excepción de los núcleos rígidos de hormigón. Las diagonales de la cercha parten de forma descendente desde la parte superior del núcleo de hormigón, funcionando éstas a tracción lo que resulta conveniente dadas las proporciones del elemento estructural. La cercha no se extiende solo en la dirección del vuelo, sino a ambos lados, tocando en el extremo opuesto con otro núcleo rígido de hormigón. Esta solución aumenta el impacto visual de la intervención, al sumarle el gesto casi poético del apoyo desmaterializado, apareciendo un leve retranqueo en la tersa fachada de vidrio, donde el volumen visualmente debería apoyarse. Este gesto transforma por completo la lectura del edificio, anulando la imagen más directa del empotramiento por otra menos inmediata, que suscita el interés del espectador al retar el entendimiento resistente que tiene el usuario, no conocedor de la tramoya estructural. En este proyecto podemos concluir que aún con el esfuerzo evidente por formar ciudad, la intervención de las grandes luces en el proyecto se centra en suscitar un interés como elemento icónico, produciendo un efecto llamada, que queda conceptualmente vinculado a la empresa a la que representa, mientras que su papel como conformador de la ciudad pasa a un segundo plano.

El reto espacial y estructural se encuentra claramente supeditado al factor representativo e

Figura 47. Torre Mare Nostrum, Barcelona (España), obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue (2006). Imágenes finales y durante el proceso constructivo.

icónico de la edificación, que logra imponerse en la urbe, como un ente reconocible y un punto de atracción, que logra acercar la imagen de la empresa a los ciudadanos, con los que se implica, aunque sea en un margen espacial muy limitado.

El segundo ejemplo es la sede de Endesa en Madrid, edificio proyectado por Rafael de La-Hoz Castanyes (1955), construido entre 1999 y 2003 (Figura 48), en éste, la intencionalidad de hacer

Figura 48. Sede Endesa, Madrid (España), obra de Rafael de La-Hoz Castanyes (2003).

ciudad frente al anterior, ha desaparecido casi por completo. El edificio se concibe como una ciudad en sí misma, limitándose el nexo peatonal con la trama urbana que lo rodea, a la configuración de una plaza ante el vestíbulo, que surge como continuación de éste al exterior. Precisamente esta continuidad será la que permita entender el espacio central cubierto en torno al que se estructura el proyecto, como una calle, que reinterpretada permite generar un ambiente ideal al que abrir los espacios de oficinas. Este desinterés por el posible aprovechamiento de este lugar por los vecinos, se encuentra motivado por su emplazamiento entre una autovía y las vías del tren, en un lugar que agrupa otras intervenciones de edificios del sector terciario, que actúan de igual manera como entes cerrados, a los que tanto trabajadores como demás usuarios acceden generalmente a través del garaje, por lo que la entrada principal destinada a los peatones se conforma como acceso simbólico, adquiriendo su escala por factores representativos y conceptuales.

Los factores de diseño que dictan las formas de este edificio son preponderantemente prácticos y en vista a la representatividad de éste, como buque insignia de una compañía energética, busca reflejar sus intereses y valores, mediante decisiones arquitectónicas, como medio para generar una buena imagen de empresa. Algunas de éstas, son la conformación del conjunto como un ente respetuoso con el medio ambiente, reduciendo el consumo de agua, gas y electricidad, rebajando las emisiones de CO₂ y de otros tipos de residuos, implantando entre otros un programa de reciclaje. Este edificio se caracterizó por ser el primero en España en obtener la Certificación de Eficiencia Energética “Triple A”⁸⁷. Todas estas decisiones enfocadas en la consecución de un edificio sostenible, tienen repercusiones proyectuales, tales como la conformación de las fachadas de forma claramente diferenciada en función de la orientación... Pero uno de los aspectos visuales más destacados es la cubierta acristalada que sobrevuela el conjunto edificado, con una inclinación de 3,14%, confiriéndole una mejor protección de las inclemencias meteorológicas y comportamiento climático, reduciendo los consumos energéticos de la edificación, al igual que hemos comentado en las fachadas. Además esta segunda cubierta, oculta tras de sí la tramoya técnica que se conforma en las cubiertas de las oficinas, un factor a valorar dada la cercanía del aeropuerto y su percepción desde el aire. Esta preocupación por el medio queda clara al viandante cuando ve que las cubiertas empleadas para el aparcamiento en superficie son conjuntos de placas solares, que pese a su tratamiento estrictamente técnico, adquieren una condición casi escultórica. Como ya se ha hecho mención, este edificio se sitúa lindando con una autovía, lo que centra el esfuerzo representativo en esa fachada, como se evidencia cuando contemplamos la planta del edificio, organizada de forma ortogonal al noreste, en un esquema en peine, mientras que en la suroeste el edificio se ondula como una serpiente buscando su lugar, hasta que ésta decide levantarse del terreno, continuando en un gran voladizo que mira a la carretera, atrayendo a su vez las miradas de cuantos pasan a su lado. Estas dos facetas del proyecto se ponen en diálogo en el patio cubierto que se organiza entre ambos volúmenes, partiendo éste de la zona de acceso, como si la vía pública continuara por el interior de la edificación, como se ha comentado, en un intento de que ésta a su vez sea una pequeña urbe en la que los

⁸⁷ La clasificación Triple A le fue concedida al obtener los certificados en Eficiencia Energética (UNE-E 16.001), Calidad Ambiental en Interiores (UNE 171330-3), y la certificación de Gestión Ambiental (ISO 14.001).

corredores de los volúmenes de oficinas se abren a este espacio interior. Este espacio actúa a su vez como climatizador del complejo, empleando el “*efecto chimenea*” (Figura 48), facilitando la salida del aire caliente en verano, mientras desde el suelo entra el aire frío que llega de unas conducciones subterráneas, que facilitan un flujo de aire fresco, en invierno el patio actúa como un invernadero, cerrándose la entrada de aire de las conducciones subterráneas y la salida por la cubierta.

En este proyecto, como compañía eléctrica a la que representa, los aspectos relativos a la eficiencia energética son los que han primado en el diseño, haciéndose notar en cada gesto. Por su parte las grandes luces encuentran su lugar en el proyecto como herramienta de expresión espacial, centrándose su uso en la cubierta de vidrio que sobrevuela la edificación y el voladizo que remata el volumen que da a la autovía. En el primer caso genera un halo ingravido que sobrevuela la edificación, conformando un plano de tal rotundidad, que las vigas trianguladas que lo sostienen pierden relevancia visual, conformando una imagen en la que técnica y espacialidad atraen las miradas de cuantos pasan junto a él.

Por su parte, el gran voladizo surgido en un último quiebro del volumen sur, mantiene la superficie superior de la fachada de lamas inalterable, estableciendo la continuidad del volumen, que a nivel del basamento sustituye la consecución de columnas de hormigón por un elemento de hormigón sumamente masivo, algo que consideraríamos propio del campo de la ingeniería civil, insertado como elemento expresivo, que se alza para conformar el gran voladizo sobre el que se apoya el volumen de oficinas. Tal vez uno de los puntos por los que más destaca este gesto, es por la traslación de un elemento estructural propio de la construcción de puentes a un edificio de oficinas, lo que denota un gran interés por la consecución de la espacialidad resultante y la lectura fraccionada de este volumen, que enfrenta con éxito técnicas de diferentes ámbitos constructivos, demostrando la potencialidad inherente a esta fusión. Así las grandes luces se establecen en el proyecto, como elemento expresivo enfocado a la representatividad visual de la edificación, como medio de captar la atención de los que pasan por delante, ya que los retos gravitatorios, suscitan bajo cualquier forma en que se presenten una respuesta en el espectador, originada en su entendimiento de la estabilidad y la puesta en cuestión de éste desde el proyecto.

Desde el exterior en ambos casos los grandes voladizos tienen una clara vocación icónica. Si este proyecto no parece demostrar que pueda influir en la concepción de la ciudad, sí pone de manifiesto su capacidad de introducir estos conceptos dentro del propio proyecto para formar un ente complejo casi autosuficiente como prototipo de lo que en otros términos podría llegar a formar un nuevo tipo de ciudad.

Ambos ejemplos nos acercan a la relevancia de los factores representativos, que hacen de la ciudad un lugar interesante en el que nuestros sentidos se ven atraídos frecuentemente por imágenes y concepciones de la urbe, claramente enfocadas en la transgresión del término neutro y la implicación de los ciudadanos, ya sea como en estos ejemplos, para defender su marca y transmitir su punto de vista de la ciudad y los valores que defiende o simplemente como medio de establecer un diálogo con los transeúntes y usuarios, incitándoles a entrar o provocando una respuesta en estos que favorezca el funcionamiento de la intervención.

Los requerimientos representativos, son vitales para la concepción proyectual y aunque se encuentren cerca de la concepción escultórica, distan de ésta, en la funcionalidad espacial y en la implicación del concepto de *“habitar”*, ya se refiera al entorno o al interior. Son conceptos cercanos pero implícitamente distintos por cuantas consideraciones llevan asociadas, al tiempo que forman solo uno de los puntos que intervienen a la hora de considerar las opciones en el diseño arquitectónico.

Necesidades espaciales

En los tres casos anteriores se ha atendido a cuestiones relativas a la vida y actividad del hombre, como punto de partida para el dictamen de las consideraciones oportunas para la conformación material y espacial del proyecto. En este caso al referirnos a necesidades espaciales acometemos una problemática más definida, al establecer de antemano los condicionantes espaciales requeridos para la realización de cierta actividad y con ello la definición de unas pautas esenciales. Cada tipo de actividad requiere espacios específicamente diseñados, pongamos por caso un espacio deportivo dedicado al baloncesto, las dimensiones de la pista establecen unas cuantías mínimas del espacio libre de soportes, al tiempo que la presencia de estos resulta más que inadecuada en la zona perimetral dedicada a las gradas en las que se encuentra el público. Así definida una actividad y un volumen de usuarios, se establecen unos requerimientos de diseño básicos, que atenderán conjuntamente al resto de exigencias expuestas anteriormente para conformar el proyecto. La actividad define las pautas básicas de diseño espacial, no solo del espacio dedicado a la actividad, sino además de todos aquellos que vienen asociados en el ritual que constituye cada actividad, apareciendo en este punto la complejidad programática asociada a la actividad, como compendio de exigencias que llevan asociadas de partida unos márgenes mínimos y máximos relativos a la espacialidad de la obra, enfocados al correcto desarrollo de la actividad preconcebida.

En la mayor parte de los casos, las grandes luces surgen como respuesta a las condiciones que se requieren para acoger cierta actividad y por tanto van ligadas a una *“función espacial”* o *“actividad”*, como condicionante previo que dictamina la procedencia de su uso. Éste es un proceso natural, ya que la arquitectura surge como respuesta a una necesidad humana, al tiempo que ésta ha sido delimitada al punto de establecer todo un compendio de exigencias particulares definidas en su mayor parte por las experiencias previas. Como se ha expuesto, cualquier actividad deportiva podría servir de ejemplo.

Si tomamos el caso particular del beisbol, el campo de juego cuenta con unas medidas prefijadas y estandarizadas, que no han de presentar interferencia alguna, colocándose en este caso concreto las vallas que determina los límites del campo a una distancia desde los 90 a 125 metros desde el punto en que se coloca el bateador (home). Así las dimensiones requeridas para la realización de este tipo de actividad exigen la presencia de estructuras de grandes luces de unos rangos dimensionales considerables, algo difícilmente viable hasta recientes fechas. Por esta razón, estos espacios deportivos se han realizado al aire libre, dado que desde sus orígenes en 1846, aunque a finales del siglo XIX ya fueran realizables espacios de tales dimensiones, no se consideraban oportunos para tal actividad, no siendo hasta estas últimas décadas, cuando se realizarán espacios dedicados a este deporte totalmente cubiertos, como

en el caso del Tokyo Dome⁸⁸ realizado en 1988 (Figura 49), que reúnen todas las características que requiere un espacio para la realización de dicho deporte, concentrando los elementos estructurales en el perímetro, donde no interfieren con la actividad deportiva. Por tanto, la cubierta aparece como un firmamento bajo el que el hombre cobijado, desarrolla las distintas actividades que éste requiere, con total libertad, rigiéndose por las reglas de las actividades realizadas (funciones), sin interferencias arquitectónicas.

Las actividades que debe contener un edificio, en la mayor parte de los casos, son las que definen las características espaciales que debe cumplir el proyecto y por tanto las que obligan al uso de las grandes luces, como medio de adaptación espacial. Como hemos visto, los recintos deportivos dan buena cuenta de ello, pero podemos encontrar innumerables ejemplos, como estaciones, aeropuertos, museos... en los que la actividad a realizar resulta un condicionante fundamental a la hora de su concepción, primando en muchos casos sobre cualquier otro factor definitorio del espacio.

Las exigencias espaciales surgen de consideraciones pragmáticas, que definen los límites de la espacialidad a emplear en el proyecto y por ello son en los términos en los que el hombre ha organizado la producción arquitectónica, como una serie de tipologías, definidas por los

Figura 49. Estadio de béisbol Tokyo Dome, Tokio (Japón), obra de Nikken Sekkei (1985-1988).

⁸⁸ El estadio de béisbol Tokyo Dome (1988), obra de Nikken Sekkel, se encuentra en Bunkyo-ku, (Tokyo, Japón) y es uno de los pocos espacios deportivos cubiertos que encontramos realizado empleando arquitectura neumática. La cubierta de este gran espacio, se encuentra formada por una serie de cámaras longitudinales hinchadas, sustentadas por una serie de cables dispuestos entre cámaras, que permiten mantener la forma final y soportar las tensiones una vez se ejerce la sobrepresión en el espacio interior del edificio, que permite que una cubrición tan ligera se mantenga en pie.

condicionantes que las determinan, como adaptación espacial enfocada en el desarrollo de una actividad concreta.

Como hemos visto, los diferentes tipos de necesidades que dan lugar a un proyecto, raramente se encuentran de forma aislada, naciendo los proyectos como respuesta compleja a la multiplicidad de factores que conforman los requisitos que debe cumplir, quedando el espíritu de ese germen inicial, representado en la materialización final que llamamos arquitectura. Pero entre el conjunto de exigencias que originan un proyecto, siempre destaca una sobre el resto, primando su respuesta e influyendo sobre la forma en la que se conciben los espacios de grandes luces, por ello aunque este proceso generalmente se produce de una forma abstracta, la lectura de las motivaciones puede aportar un punto de vista que nos ayude a comprender mejor los edificios de grandes luces y las tipologías proyectuales, que surgen como respuesta a este conjunto de necesidades básicas.

A lo largo de toda la historia, las consideraciones a tener en cuenta en el ámbito de los requerimientos arquitectónicos, se han adaptado a las circunstancias técnicas y sociales que han servido de marco para su determinación. Así podemos leer los proyectos como un reflejo histórico del marco en el que se materializaron, pudiendo acercarnos a un periodo de tiempo concreto desde la materialidad y descubrir los entresijos que han influido sobre la producción arquitectónica y la concepción espacial del hombre.

Por lo que respecta a marcos temporales más cercanos, conocemos mejor los condicionantes, como el panorama socioeconómico y técnico existente. Así en el presente texto, se ha procedido inicialmente a dibujar los dos últimos siglos como el periodo en el que mayores transformaciones ha sufrido la arquitectura y las concepciones espaciales. Teniendo el contexto en el que se desarrolla la arquitectura, podemos llegar a comprender los requerimientos o necesidades a las que se ha visto supeditada la producción de ésta, pudiendo comprender las justificaciones que llevan al empleo de un recurso espacial como el referente a las grandes luces.

Este análisis de las consideraciones que justifican el empleo de las grandes luces en la arquitectura, tiene especial relevancia en la actualidad, en un marco técnico donde prácticamente cualquier forma y espacio resulta materializable. Así resulta hoy más que nunca, necesaria la medida y racionalidad proyectual, todo ello basado en la adecuada reflexión sobre las consideraciones anteriormente expuestas, surgiendo hasta el último gesto, como respuesta sentida y meditada, del compendio de necesidades presentes en la confección de la obra.

2. Ámbitos del conocimiento que inciden sobre la concepción proyectual

A lo largo de toda la historia las grandes luces han aparecido tanto como respuesta a una necesidad, como en el caso de los puentes, o bien como medio de representación espacial, como en los edificios religiosos, donde no solo dan respuesta a unas necesidades ocupacionales y relativas al culto, sino además de representación espacial de la divinidad. Esto último enfocado desde un sobrecogimiento del usuario u otra respuesta capaz de influir sobre los asistentes⁸⁹. Existen multitud de razones para emplear las grandes luces ligadas a las diferentes categorías de necesidades expuestas en el punto anterior, configurándose el proyecto como respuesta a varias de éstas. Pero el bagaje cultural, técnico y social, es un punto, tanto o más importante a la hora de expresarse estética y volumétricamente, siendo un factor clave a la hora de leer la arquitectura y por consiguiente a tener en cuenta a lo largo del proceso de proyectación. Hoy el uso de las grandes luces no solo está condicionado por los razonamientos que han dado lugar a su adopción, sino además por el conjunto de connotaciones adquiridas desde varios ámbitos. Así hay varios puntos que han de plantearse como referentes a la hora de contemplar la concepción de las arquitecturas de grandes luces en la actualidad, ya que suscitan referencias visuales y connotaciones que influyen sobre el entendimiento de la espacialidad arquitectónica. Todo ello con una clara influencia, tanto sobre el proceso de proyectación, como así mismo, sobre el uso de la obra terminada.

Así se deben de tener en cuenta factores relativos a múltiples ámbitos, que dentro del panorama histórico han dejado una marcada huella en la concepción de la producción arquitectónica enmarcada en el ámbito de las grandes luces, como marco límite en el que cualquier consideración se tiende a exacerbar, hasta límites en los cuales adquiere un nuevo sentido, ya sea estético, técnico o moral. Desde este punto de vista podemos encontrar cuestiones de especial interés, que pertenecientes al inmenso abanico de referentes que intervienen en nuestra concepción espacial y arquitectónica contemporánea, requieren especial mención en el ámbito arquitectónico que nos interesa.

El punto de vista técnico siempre ha resultado especialmente relevante en las soluciones de grandes luces, ya que como ámbito extremo, se ha valido de cuantos adelantos han

⁸⁹ Un ejemplo de este tipo de arquitectura eclesiástica que busca el sobrecogimiento del usuario mediante un recurso espacial, es la iglesia de San Pedro en Durazno (Uruguay) en 1967, muestra la preocupación de este gran ingeniero sobre la relación entre *“la forma, el espacio que esta forma configura y las funciones que en ese espacio se realizan”*. Estas relaciones son un todo indisoluble, que en conjunto dan una respuesta expresiva y funcional a un compendio de necesidades, en el caso de Eladio Dieste, con un marcado interés por el factor constructivo y el impacto visual de las formas estructurales que parecen levitar, con la ayuda de las franjas de luz que desmaterializan los apoyos. En el caso de esta iglesia, destaca la ausencia de soportes en el interior, que más allá del impacto visual, permite la visión del altar sin interferencias desde cualquier punto de la sala de 32 x 23 metros. Para esta cubierta emplea una lámina de cerámica armada de solo 8 centímetros de espesor.

posibilitado arañar nuevas cotas a lo considerado como imposible. Por ello los avances en la técnica y los materiales han plasmado su utilización, no solo desde el punto de vista dimensional, sino habitualmente en el estético, pasando a formar parte de la conciencia global de la concepción de grades espacios, lo que ayuda tanto a su lectura y aceptación por los usuarios como un medio de concebir el espacio en términos claramente justificados por razonamientos resistentes y constructivos. Al hablar de la arquitectura contemporánea, claramente las influencias relativas a técnicas hoy en desuso o pertenecientes a un tipo de arquitectura hoy ampliamente superada desde el punto de vista técnico, representan una escasa influencia en la concepción de este tipo de obras. Hoy soluciones técnicas como la prefabricación y el pretensado, resultan básicas, ya que en su aún breve desarrollo, se han establecido como referentes y han mostrado una forma de entender el proceso constructivo y la arquitectura, tanto desde el pragmatismo y la economía de medios, hasta en el caso opuesto los alardes técnicos que gracias al pretensado hoy resultan factibles. Aunque los dos puntos anteriores resultan validos en múltiples materiales, como principios relativos al funcionamiento estructural, por lo que respecta a las estructuras metálicas actualmente uno de los aspectos que exige especial mención son las soluciones atornilladas, tanto por su influencia en el proceso constructivo, como en el entendimiento de la temporalidad y transformaciones, tanto de las actividades acogidas en las edificaciones, como de éstas en respuesta a las exigencias prácticas y sociales. Un elemento como el tornillo, abre el horizonte de las arquitecturas efímeras como una línea proyectual que en la actualidad se ha constituido como uno de los principales ámbitos de experimentación espacial.

Otro aspecto de especial relevancia, es el referente a la comprensión del comportamiento resistente de los materiales y esquemas estructurales. Como ya se ha puesto de manifiesto, durante la mayor parte de la historia se ha construido aquello que la experiencia dictaba como seguro, hasta que los avances numéricos hicieron posible un dimensionado previo, que permitía conocer los márgenes factibles en función de la forma, las cargas y los materiales. Esta nueva visión supuso un cambio radical en la concepción arquitectónica, ya que *“solo se construía lo que el cálculo dictaba como seguro”*. Así la aparición de los medios digitales y las plataformas de cálculo computarizado, han representado un salto, no solo en el conocimiento resistente, sino en el desarrollo formal y la libertad expresiva. Hoy no se podría entender buena parte de la producción arquitectónica de las últimas décadas sin la presencia de estos medios, que nos han permitido superar las limitaciones inherentes al hombre.

Como ya se ha expresado anteriormente, el entendimiento actual de la arquitectura y en los términos en los que clásicamente se ha organizado la producción de ésta a lo largo de la historia, están enmarcados en los aspectos estéticos y conceptuales, puesto que en estos términos es en los que se procede a la lectura de la arquitectura y su encuadre en un marco temporal y socioeconómico concreto. Así podríamos enumerar los múltiples movimientos estéticos que han marcado la producción arquitectónica a lo largo de los siglos, pero sin lugar a dudas el que mayores nexos tiene con las grandes luces es la arquitectura High-Tech, ya que el alarde de la técnica y las capacidades asociadas, están relacionadas tanto con la espacialidad, como con la estética.

El lenguaje empleado en la arquitectura High-Tech emplea la técnica como ente estético en sí mismo y refleja la belleza de la estructura y las instalaciones. Este movimiento arquitectónico

otorga un margen en el que las grandes luces adquieren expresión propia, ajena a ornamentos y consideraciones fuera de sí misma y de la espacialidad deseada. Aún hoy, la forma en la que se perciben este tipo de arquitecturas que hacen del margen espacial su bandera, está claramente relacionada con este tipo de estéticas, ya sean analogías directas, referencias o simplemente la libertad con la que se han concebido como elemento estético.

Por otra parte como se ha podido ver a lo largo de toda la historia y en especial en los dos últimos siglos, constantemente se han investigado nuevas técnicas, nuevos materiales y medios analíticos, con los que ampliar los márgenes dimensionales al tiempo que se favorecen el uso de ciertas soluciones. Tanto en el siglo XIX, como en el XX, las patentes han supuesto una de las principales líneas de investigación, mediante las que se intentan sacar unos réditos económicos a los avances acaecidos. Una dinámica cerrada, pero que ha favorecido la difusión del conocimiento y la suma de avances, logrando la continua superación del estadio técnico previo. Actualmente en el ámbito de I+D (Investigación y Desarrollo) encontramos dos puntos de especial relevancia, los nuevos materiales y los medios de representación y producción. Los materiales actualmente en desarrollo, auguran saltos cualitativos tan relevantes como los acontecidos con la aparición del hierro y el hormigón armado en los dos siglos anteriores. Así mismo ligado a los medios digitales, se encuentran, como se ha hecho mención, los medios de cálculo y los de representación. Precisamente los medios de representación han influido en la forma de pensar y proyectar. Hoy se cuenta con sistemas capaces de trasladar modelos digitales al plano físico a través de las herramientas de corte e impresión informatizadas o *“máquinas de control numérico”*. Así estos puntos influyen tanto desde el nivel conceptual y proyectual hasta el constructivo, mostrando el camino a nuevas formas de hacer arquitectura, augurando cambios radicales, que supondrán un paso más en la evolución arquitectónica.

Todas estas consideraciones, requieren una reflexión que permita una comprensión de su papel en la arquitectura contemporánea como referente que tiñe nuestra comprensión y el proceso de concepción de las arquitecturas del siglo XXI. Por ello se hablará más en detenimiento de cada uno de estos ámbitos, como encuadres clave que intervienen en la concepción proyectual.

2.1. Técnica. Los sistemas resolutivos como condicionantes formales

A lo largo de toda la historia, el hombre ha visto supeditada su actividad y su producción arquitectónica a lo que los medios técnicos le permitían, por eso mismo han ejercido una innegable influencia sobre la manera de entender la espacialidad arquitectónica y los lenguajes a ella asociados. Históricamente las soluciones estructurales han impuesto la forma, que posteriormente se ha trabajado estéticamente. A este respecto la arquitectura barroca centró buena parte de su interés en la ruptura con los modelos formales clásicos, empleando superficies cóncavas y convexas allá donde antes todo era uniforme. Esta búsqueda de una ruptura formal entre los modelos estructurales básicos y la conformación espacial, encuentra sus frutos con la aparición de los nuevos materiales, al perder entidad el elemento resistente y adquirir una mayor libertad de diseño, posibilitada en buena parte por los medios de cálculo.

Así, a lo largo de toda la historia de la construcción, encontramos técnicas y materiales que como referente nos permiten leer periodos históricos y comprender la producción arquitectónica en ellos realizada. Durante las últimas décadas hay varias técnicas o soluciones, que han ejercido una especial influencia sobre el entendimiento de la espacialidad y producción arquitectónica, en unos términos que parecen indicar el camino a seguir a lo largo del siglo XXI. Una tendencia impulsada por los condicionantes socioeconómicos y la practicidad y posibilidades que encierra cada una de estas soluciones:

Prefabricación

Las soluciones prefabricadas son conceptualmente en sí mismas, una rama independiente de la arquitectura, aunque pueden presentarse elementos prefabricados en un amplio rango de arquitecturas.

La arquitectura, pasa de ser una producción artesanal in-situ, a una producción fabril, que se nutre de las ventajas asociadas a la fabricación industrial⁹⁰. Así se cuenta con un entorno

⁹⁰ La construcción prefabricada cuenta con una serie de ventajas y desventajas asociadas, que condicionan su adopción.

Ventajas:

- Mayor calidad de los materiales, al tener un dosificado y conformación con mayores controles.
- Se reducen los plazos de ejecución in-situ, al trasladar la producción al taller, donde resulta más eficiente el proceso productivo, reduciendo los plazos totales.
- Reducción de los elementos auxiliares necesarios en la obra, tales como encofrados y andamios.
- Mayor resistencia de las secciones, asociada a la mayor calidad de los materiales y la ejecución.
- Mayor economía, tanto por los tiempos de obra más reducidos, como por la consiguiente minoración de la mano de obra exigida.
- La mano de obra empleada es especializada, por lo que ofrece mayores garantías y capacitación.

Desventajas:

controlado, que permite un aumento de la calidad y precisión de los elementos elaborados (Figura 50). Al tiempo, la producción seriada en base a un sistema constructivo previamente desarrollado, permite rapidez y economía en la producción. Como resultado de este traslado del proceso productivo en taller, la construcción in-situ pasa a ser un proceso de ensamblaje, para conformar la unidad final.

Como se ha comentado anteriormente, este tipo de soluciones primeramente extendidas en edificios de un carácter marcadamente funcionalista⁹¹, han pasado a transformarse gracias a la experiencia y el desarrollo asociado a los medios de producción prefabricada, en una solución versátil, no restringida a los modelos repetitivos, a los que la gante ha venido asociándolos.

Figura 50. Planta de prefabricados de hormigón, donde se están produciendo losas alveolares y una pérgola realizada mediante piezas prefabricadas de hormigón pretensado.

- Las uniones suponen un punto conflictivo en algunos casos, al no ser una solución monolítica como el hormigón armado in-situ.
- Frente a las soluciones in-situ la inversión económica inicial es mayor, al centrarse en la producción de los elementos.
- A la hora del montaje, la contundencia de los elementos prefabricados exige sistemas auxiliares de mayor envergadura para su puesta en obra.
- Este sistema exige una mayor coordinación y un correcto proyecto de las instalaciones y su incorporación.

⁹¹ Los elementos prefabricados, tanto para su uso como componentes estructurales, como de elementos de fachada y cubierta, se introdujeron primeramente en edificios fabriles, aunque por las marcadas ventajas que llevan asociados, tanto en tiempos de ejecución, como en economía y calidad, se han extendido a otros sectores como el terciario y más recientemente a la vivienda, como una forma económica de garantizar los estándares impuestos por la normativa.

Como dice Víctor Yepes Piqueras: *“En ocasiones asociamos la prefabricación con una baja calidad cuando pensamos en los típicos barracones de obra. Sin embargo esta visión se encuentra alejada de la realidad. Lo cierto es que el control de calidad en fábrica y las modernas técnicas constructivas permiten realizar construcciones prefabricadas con una fiabilidad igual o mayor que la conseguida con la construcción tradicional.*

*Después de la II Guerra Mundial las necesidades de reconstrucción llevaron a diversos países a intentos sucesivos de dar el salto para industrializar la propia construcción. De este modo se desarrolla la prefabricación, con el objeto de reproducir en la edificación lo que en los años veinte había conseguido Ford con los automóviles, si bien los primeros antecedentes hay que buscarlos en el año 1905, cuando los establecimientos Edmond Coignet iniciaron la prefabricación de piezas moldeadas de hormigón. Hacia el año 1925 hizo su aparición el procedimiento de fabricación de tubos por centrifugación. En la Unión Soviética y en los países de su órbita, aunque también en Israel y, en menor medida, en países occidentales, como Francia, se desarrolló una prefabricación pesada, cerrada en sí misma, que consiguió racionalizar procesos y abaratar costes, con el inconveniente generalizado de caer en la repetición y la monotonía. En España se vieron ejemplos en la proliferación de pasos superiores de vigas prefabricadas con la construcción de las primeras autopistas de pago en la década de los 70 y 80. Más inteligente y con más posibilidades fue el desarrollo de una prefabricación abierta, donde diversos componentes pueden utilizarse en sistemas abiertos y variados.”*⁹²

Hoy el panorama es bien distinto, con una industria diversificada que permite dar respuesta a un amplio abanico de problemáticas, con sistemas constructivos donde los elementos pueden transformarse según unas reglas prefijadas, para generar un modelo más libre y adaptado a las exigencias de los usuarios, sin que aparezca ineludiblemente la repetición como condicionante formal de la obra. Esta opción otorga calidad constructiva, reducción de tiempos y costes, lo que la posicionan como una de las principales opciones constructivas en la actualidad.

Cuando hablamos de arquitecturas de grandes luces prefabricadas, los rangos dimensionales de éstas están firmemente determinados por los medios de transporte. El condicionamiento dimensional ya no está asociado con los factores limitativos del material o la técnica de producción, ya sean elementos metálicos o de hormigón pretensado. El transporte en el caso de las estructuras metálicas no coarta la solución de forma tan patente, ya que las grandes luces pueden constituirse mediante la adición de varias secciones prefabricadas para conformar el elemento estructural final (Figura 51). Para el establecimiento de estas uniones, en el caso de las estructuras metálicas, se emplean en mayor medida las soluciones atornilladas, frente a las soldadas, puesto que éstas permiten un mayor control, al encontrarse las placas realizadas y revisadas en taller, empleando tornillos de alta resistencia, cuyo correcto apriete puede ser fácilmente asegurado. Por lo que respecta a esta problemática en elementos de hormigón, se opta por un postensado que garantice el funcionamiento del elemento estructural como una unidad.

⁹² YEPES PIQUERAS, Víctor, *“La prefabricación revoluciona los procedimientos constructivos”*, Valencia (España), Universidad Politécnica de Valencia, 27 noviembre 2013.

Las soluciones prefabricadas no suponen un incremento dimensional, pero sí un cambio conceptual a un *“sistema de calidad”*, que resulta más apto a las exigencias actuales de la construcción, constituyéndose como una de las principales vías de desarrollo para la producción arquitectónica futura, tanto en los márgenes de las grandes luces, como rangos

Figura 51. Edificio Vital, la nueva sede corporativa de Caja Vital Kutxa en Vitoria-Gasteiz (España), obra de Javier Mozas, Eduardo Aguirre (Mozas+Aguirre arquitectos) y la ingeniería NB35 (2005-2007). Esta sede empresarial remata uno de los volúmenes mediante un voladizo de 26 metros, resuelto al igual que el resto de la edificación mediante una estructura metálica formada por piezas healizadas en taller y placas alveolares.

dimensionales menores. Las soluciones prefabricadas, en todas sus variantes, se constituyen como una de las soluciones más propias del siglo XXI, aunque como ya se ha visto anteriormente, sus orígenes apenas distan en el tiempo de los del hormigón armado.

Este tipo de soluciones convierte la adopción de luces de hasta 25 metros en una opción económica, ampliando el rango proyectual en el que se aplican este tipo de luces. Así proyectos, que bajo otras circunstancias se verían restringidos por el margen económico a soluciones de mallas de pilares, puedan emplear pórticos con grandes luces, suponiendo una mejora de la espacialidad interior, al tiempo que una mayor flexibilidad para la adaptación de las actividades a lo largo del tiempo.

Las soluciones prefabricadas, más allá de dar una resolución a la problemática estructural, son capaces de dar una respuesta constructiva global, incluyendo los distintos paramentos,

Figura 52. Viviendas impresas de hormigón (China), desarrolladas por la empresa WinSun (2014). Los distintos tipos de secciones impresas, permiten la incorporación en obra de un armado en su interior, para un posterior hormigonado, aunque en el modelo de vivienda presentado no se realice esta opción.

definiendo en conjunto la espacialidad arquitectónica, así como las texturas que matizan sus límites.

A las ventajas comentadas, hoy se añade otro ámbito en ciernes, que en las próximas décadas probablemente se constituya como una de las principales vías para el desarrollo de elementos arquitectónicos prefabricados, de forma particular para cada proyecto, las herramientas de corte e impresión informatizadas o “*máquinas de control numérico*”. Este tipo de recursos, permite la traslación directa de modelos digitales al plano físico, tanto mediante el corte y conformación de planchas de diversos materiales, como mediante la impresión de modelos, que pueden ir, desde componentes, hasta el total de la edificación. Actualmente este tipo de piezas no son de grandes dimensiones, pero en un futuro seguro que aumentarán su escala y la variedad de materiales con los que se trabaja.

En 2014 la empresa china WinSun Decoration Design Engineering Co. demostró la potencialidad de este tipo de soluciones, al lograr construir en 24 horas diez casas producidas mediante impresión digital (Figura 52). Las piezas que conforman las viviendas fueron impresas empleando materiales reciclados⁹³ y fibra de vidrio⁹⁴, tras lo que se trasladaron los materiales a un área de ensamblaje al aire libre, montando las diez viviendas en menos de un día. Las dimensiones de la máquina de control numérico empleada en este proyecto resultan sorprendentes, con 40 metros de largo, 10 de ancho y 6,6 de altura, unas dimensiones que hacen factible la producción seriada de este tipo de viviendas y multitud de otros elementos aplicables en los distintos ámbitos de la edificación. Pero el tamaño de los elementos realizados por estos medios, como se ha comentado anteriormente, se encuentran supeditados a las limitaciones inherentes a los medios de transporte encargados de trasladar estos componentes o la edificación ya realizada hasta su disposición definitiva.

Las impresoras 3D necesarias para acometer este tipo de retos, son igualmente un desafío tecnológico y productivo, aunque se están invirtiendo grandes esfuerzos y capitales en superar las limitaciones de estos y confeccionar una solución constructiva de futuro⁹⁵, que transforme la arquitectura en un producto, literalmente, industrial. En el ejemplo que se ha visto, la impresora responsable de la producción era de Contour Crafting⁹⁶. Este tipo de

⁹³ Según Ma Yihe, “*Los residuos industriales de los edificios demolidos están dañando nuestro medio ambiente, pero la impresión 3D permite reciclarlos para convertirlos en nuevos materiales de construcción. Esto crearía un entorno mucho más seguro para los trabajadores y reduciría en gran medida los costos de todo el proceso*”.

⁹⁴ El coste de producción de cada una de las viviendas resulta reducido, siendo de unos 4400 euros.

⁹⁵ La potencialidad de esta vía de investigación, ha llevado a que la NASA dé su apoyo a Contour Crafting para investigar la viabilidad de producir módulos lunares por estos medios. Un ámbito teórico que en un futuro relativamente cercano podría llegar a materializarse, como tantas cosas que un día pertenecieron al campo de la ciencia ficción.

⁹⁶ Countour Crafting no es ni mucho menos un ejemplo aislado, pudiendo encontrar más empresas dedicadas a este tipo de máquinas, como es el caso de KamelMaker, que de forma paralela ha realizado

impresoras son capaces de producir casas de 2500 m² en menos de un día. El material empleado para la impresión es un cemento especialmente diseñado para esta máquina.

En 2015 la misma empresa WinSun ha logrado imprimir un edificio de 5 plantas con los medios de impresión 3D. Comparativamente esta solución frente a una de las empleadas habitualmente, reduce entre un 30% y un 60% la producción de residuos, los tiempos de construcción entre un 50% y un 70% y los costes de mano de obra se reducen entre un 50% y 80%. En este caso las piezas resistentes ya incorporan en su interior refuerzos de acero, así como el aislamiento necesario para cumplir las normativas.

La potencialidad de este tipo de soluciones es innegable y augura un futuro prometedor para las soluciones pretensadas, para dar respuesta a todas las escalas⁹⁷. Según Ma Yihe (CEO de Winsun), en un futuro próximo existe la esperanza de poder levantar rascacielos con este tipo de soluciones. Hoy el caldo de cultivo en el que nos encontramos empieza a dar impulso a este tipo de soluciones de impresión 3D, que aún en el ámbito de I+D pronto podría llegar a implantarse como una opción constructiva más, en los márgenes de la cotidianidad. Así en un futuro podrían llegar a producirse puentes, rascacielos y edificios de grandes luces por estos medios.

Las impresoras 3D desarrolladas hasta el momento, solo han sido capaces de trabajar con un material a la vez. Este hecho ha condicionado sobremanera el diseño de las soluciones adoptadas, como dice Javier E. Ramos⁹⁸, *“Los diseñadores e ingenieros están acostumbrados a diseñar con un solo material, por lo que todo el paradigma del diseño cambiará. Eso va a requerir un nuevo hardware y software, y vamos a tener que cambiar la forma en que nosotros los ingenieros y diseñadores pensamos el diseño”*. En el ámbito constructivo se suele exigir la combinación de varios materiales, por lo que un avance a la hora de ampliar y aplicar, la combinatoria disponible, cambiaría radicalmente el proceso de diseño y realización de las arquitecturas impresas. En 2015 el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) ha logrado producir una impresora 3D capaz de emplear al unísono 10 materiales distintos durante el proceso de impresión. Este novedoso sistema se ha denominado Multifab⁹⁹ y permite tanto la impresión con 10 materiales, como la

una casa en Ámsterdam por estos medios. Otras de las empresas que han experimentado a gran escala la impresión 3D son, Dus Architects y Ultimaker en Holanda.

⁹⁷ Este tipo de soluciones impresas, en la actualidad responden a modelos de reducidas dimensiones, pero más adelante podrían incorporar un armado y las vainas necesarias para el postensado, dando respuesta a soluciones de grandes luces, aunque aún hoy solo es una posibilidad.

⁹⁸ Javier Ramos es uno de los ingenieros encargados de la investigación de Multifab y coautor de dicho avance.

⁹⁹ Multifab está formado por un sistema de mapeado, que escanea las superficies de los objetos, para trasladar dicha información al ordenador central, éste a su vez transforma los datos en un modelo virtual, con el que se trabaja para definir su conformación final, ajustando el proceso de impresión y los materiales a emplear. Una vez definido el modelo digital se procede a la impresión.

incorporación durante el proceso de partes ya terminadas, lo que permite la conformación de elementos más complejos, abriendo el abanico de soluciones a las que pueden dar respuesta este tipo de herramientas. Este sistema se ha desarrollado para la impresión de elementos de pequeñas dimensiones, teniendo un coste aproximado de unos 7.000 dólares, lo que haría competitiva esta solución frente a las actualmente en circulación. Si bien sus proporciones no la enmarcan actualmente en el ámbito de la construcción, más allá de la producción de modelos, reflejan claramente las posibilidades de un campo en pleno desarrollo, con infinitas posibilidades para la producción arquitectónica económica en un futuro, cada día más palpable. La impresión global de la vivienda parece más cercana, así como las posibilidades de concebir la edificación, como una unidad monolítica compleja basada en un proceso de producción industrial.

El concepto de construcción impresa, se ha considerado como una de las opciones para los misioneros del Mars One¹⁰⁰, el proyecto para la colonización de Marte, para el año 2035 (Figura 53). La impresión de edificios no solo se plantea como medio de producción en taller, sino como medio de construcción in-situ, a este sistema se llama *“Contour Crafting”*, mediante el cual se imprime la edificación completa en hormigón, disponiendo durante el proceso los elementos de instalaciones de forma automatizada. Este sistema permite la construcción de una vivienda en un solo día, mediante la disposición de la máquina de control numérico en el lugar de la implantación de la obra (Figura 54). Si bien esta opción

Figura 53. Propuesta para la realización del asentamiento en Marte de la misión Mars One, empleando *“Contour Crafting”* como sistema constructivo más apto a las problemáticas relativas al empleo de recursos autóctonos en las construcciones realizadas.

Los responsables del proyecto son: Pitchaya Sitthi-Amorn, Javier E. Ramos, Yuwang Wang, Joyce Kwan, Justin Lan, Wenshou Wang y Wojciech Matusik. Este trabajo ha sido expuesto en SIGGRAPH 2015, realizado en agosto de 2015 en Los Ángeles (Estados Unidos).

¹⁰⁰ Elon Musk, director ejecutivo de SpaceX, quiere construir una ciudad en Marte, en el contexto de la *“Mission Mars One”* de la NASA, que planea enviar gente para el 2035. En septiembre de 2014 dieron a conocer que están probando la tecnología de construcción Contour Crafting, una impresión de los edificios en hormigón mediante la adición de capas sucesivas, mediante un robot-impresora, como principal opción para la creación del complejo en Marte.

GRAHAM, Fiona, *“¿Es la impresión de casas el futuro de la construcción?”*, Reino Unido, BBC, 16 de septiembre de 2014.

resulta menos aconsejable que la producción en taller, tiene claras ventajas, como la eliminación del transporte del elemento construido, pasando ésta a la máquina de impresión, algo factible mediante la especialización de dicho elemento, optimizado para su transporte y rápida implantación en el lugar. En un futuro podría llegar un camión, colocar unos raíles y sobre ellos la máquina de impresión 3D, que mediante su forma de puente grúa, desplaza el punto de impresión por toda la parcela, hasta completar en pocas horas o días el total de la edificación, con unos costes reducidos y empleando una mano de obra muy especializada. Un sistema que en pocos años o décadas puede llegar a transformar por completo la concepción proyectual y los sistemas constructivos. Según Behrokh Khoshnevis¹⁰¹ el sistema constructivo Contour Crafting, *“no va a hacer que todo en la construcción se quede obsoleto, pero ciertos tipos de edificios definitivamente se van a construir de esta manera y no con el método tradicional”*, ya que con este sistema *“puedes construir mejor, más rápido y más barato”*. Actualmente hay un modelo conceptual de la máquina de Contour Crafting que podría emplearse en unos años de forma regular en edificación (Figura 55).

Desde el siglo XIX se ha intentado alcanzar un sistema óptimo para la consecución de una producción arquitectónica económica y de calidad, que logre valerse de las ventajas de la producción industrial, ya hemos visto ejemplos, como las viviendas realizadas por Thomas Alva Edison en el conjunto residencial que realiza en Phillipsburg, New Jersey (Estados Unidos), realizado siguiendo su patente en 1919. Estandarte de la industrialización de la concepción arquitectónica del proyecto es Jean Prouvé (1901-1984), que pensaba en la arquitectura como una máquina, cuyo diseño ha de ser preciso como la maquinaria de un reloj y dar respuesta concreta a una problemática, tanto técnica como social. Hoy las ideas

Figura 54. Impresión de una vivienda mediante Contour Crafting y cabezal de impresión mediante el que se ejecuta mediante capas sucesivas el modelado de la edificación.

Figura 55. Modelo conceptual de una máquina de Contour Crafting.

¹⁰¹ Behrokh Khoshnevis es profesor de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Aeroespacial e Ingeniería Mecánica, Astronáutica Ingeniería, Ingeniería Biomédica e Ingeniería Civil y Ambiental y uno de los principales responsables de la investigación relativa al Contour Crafting.

de Prouvé aparecen nuevamente con los ojos de la tecnología del siglo XXI, pudiendo ser la línea conceptual para todo un movimiento arquitectónico, que haga poner en valor las indudables virtudes de la incorporación de la impresión 3D en la cotidianidad constructiva. Un nuevo entendimiento, tanto del diseño, como de la producción, regidos por limitaciones distintas, pudiendo dar lugar a soluciones sorprendentes. Aunque actualmente no parece que este ámbito y el de las grandes luces resulten coincidentes, aunque dado el ritmo al que se suceden los avances en este campo, no nos permiten descartar su empleo a medio plazo. Además sea como elemento único monolítico o como piezas que requieran un ensamblaje posterior, la arquitectura impresa es una realidad y su empleo en espacios de mayor envergadura es solo cuestión de tiempo y de superación técnica, al igual que como se ha expresado reiteradamente, se han producido todos los avances en el ámbito constructivo a lo largo de la historia.

En los márgenes de la prefabricación vemos desde los modelos más experimentados a otros en continuo avance, siendo claramente el ferviente caldo de cultivo de la arquitectura contemporánea tal y como la concebimos, así como la línea más clara hacia la que tiende la producción arquitectónica. La prefabricación es uno de los puntos de especial interés a tener en cuenta a la hora de intentar analizar la producción arquitectónica actual y por lo tanto de interés para el presente estudio.

Pretensado

Como se ha expuesto anteriormente en numerosas ocasiones el pretensado ha supuesto uno de los principales factores por los cuales se han incrementado los rangos dimensionales a lo largo de los siglos XX y XXI, así como un factor vital para la conformación de soluciones económicas para cubrir grandes espacios, ya sea con elementos de hormigón in-situ, elementos prefabricados de hormigón o soluciones con otros materiales que se benefician del empleo de este recurso. Recordemos que el pretensado, desde su desarrollo por Eugène Freyssinet en la década de 1920, permite la competencia de las soluciones de hormigón frente a las estructuras metálicas, en la conformación de grandes luces con elementos horizontales. Este nuevo sistema fue impulsado en sus orígenes por el panorama social del momento histórico, caracterizado por una carestía de hierro para su uso en la construcción, suponiendo una clara ventaja el menor consumo que hacía de este recurso. Este hecho impulsó las soluciones pretensadas para la resolución de infraestructuras,

Figura 56. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron (2008). Resultado de los esfuerzos axiales de la estructura principal y solución adoptada, empleando un trazado funicular de los cables del postensado del muro perimetral.

además de otros muchos elementos.

Pero ante todo el pretensado es un reto al comportamiento innato del material, estableciendo tensiones previas que garanticen el comportamiento estructural deseado en el estado de servicio. Desde el punto de vista resistente se logra evitar la aparición de tracciones en el hormigón y por tanto se impide la aparición de la indeseada fisuración. Por otra parte la reducción de las deformaciones del elemento estructural, permite compaginarlo con otros materiales, como elementos de fábrica, que bajo otras circunstancias podrían sufrir daños, como en el caso del Caixa Forum de Madrid¹⁰² (Figura 56). Así las soluciones pre y postensadas permiten ejercer un control sobre los esfuerzos internos, fisuración y deformación, pasando estos a formar parte de los parámetros a tener en cuenta a la hora de proyectar, a todos los niveles y más si cabe en arquitecturas singulares o de grandes luces.

El pretensado cuenta con múltiples virtudes, entre otras la de dar lugar a soluciones eficientes y competitivas dentro del ámbito constructivo. Así se utiliza tanto como recurso secundario, empleando elementos basados en estos conceptos, así como germen argumental del proyecto, como ocurre en la obra de Paulo Mendes da Rocha (Figura 57). Un recurso espacial y estructural se

Figura 57. Museo de Escultura (MUBE), São Paulo (Brasil), obra de Paulo Archias Mendes da Rocha (1986).

¹⁰² En el Caixa Forum de Madrid, se configuran grandes voladizos, sobre los que se apoyan los muros de fábrica de ladrillo de la antigua central eléctrica, visualmente levitando para el transeúnte. En este caso, al ser de vital importancia la conservación del elemento de fachada preexistente, las deformaciones del nuevo elemento estructural han de verse muy limitadas, algo solo factible gracias a la adopción de una solución postensada en las vigas perimetrales de hormigón, que pese a su gran canto, sin éste recurso resistente serían incapaces de resolver dicha problemática.

convierte en el hilo argumental que estructura la obra, otorgándole un sentido más allá de la propia función a la que se encuentra destinado, centrado en su propia materialidad y el reto que supone al comportamiento natural de ésta.

Como Javier Rui-Wamba expresa: *“La prosperidad económica está contribuyendo a impulsar la exploración de los límites en la arquitectura y en la ingeniería y, a veces, parece que el agresivo talante olímpico (más lejos, más alto, más deprisa), tenga que presidir nuestro trabajo. Pero, acaso, en la sana exploración de los límites nos encontremos más que con la altura, la distancia o la velocidad, con la complejidad y, en relación con lo que aquí nos ha convocado, su moderada manifestación que es la heteroestructuralidad. Las estructuras más notorias son crecientemente complejas, y son complejas, también, un porcentaje creciente de las que, por unas u otras razones, pasan aparentemente desapercibidas. Y la respuesta estructural a la complejidad requiere, con creciente asiduidad, el recurso simultáneo al hormigón armado, al pretensado parcial o total, a las estructuras de acero o al mestizaje de las soluciones mixtas de hormigón y acero. Sin olvidarnos de la madera y sus variantes y, en ocasiones, de las estructuras textiles o hinchables o del uso de nuevos materiales, hoy pasivos, mañana –tal vez– activos y sensibles.*

(...)

*La técnica del pretensado tiene mucho que aportar en las estructuras de la Arquitectura y no solamente como utilización generalizada en grandes obras. Tiene también cabida en obras menores por su dimensión o en elementos singularizados de obras mayores.”*¹⁰³

Se pueden diferenciar dos tipos de pretensado¹⁰⁴ en base al proceso constructivo, in-situ o prefabricado. Esta distinción no solo diferencia tipológicas estructurales y constructivas que difieren claramente, sino además dos formas de entender la arquitectura y por ende dos tipos de influencia sobre la proyección arquitectónica. A la hora de la construcción in-situ, en la inmensa mayoría de los casos hablamos de soluciones postensadas, disponiendo las vainas por las que discurren los cables con un alto límite elástico, a tensar tras el fraguado del hormigón. En este caso, el establecimiento previo de las tensiones resulta de mayor complejidad, encontrándose claramente asociado a la producción en taller y por tanto a las soluciones y elementos prefabricados. En este segundo caso pueden presentarse soluciones postensadas, aunque en muchas ocasiones dichas tensiones sean introducidas ya en el emplazamiento definitivo, como parte de su puesta en obra. En ambos casos se ejerce un control sobre la resistencia interna de las tensiones, pero frente al monolitismo asociado a las soluciones in-situ, la prefabricación entiende la construcción como suma de unidades menores, adquiriendo especial relevancia las uniones y la configuración resultante. En las soluciones in-situ primeramente todas las uniones son rígidas, aunque depende de la rigidez de las secciones de los elementos implicados en la unión. Claro ejemplo de ello sería

¹⁰³ RUI-WAMBA MARTIJA, Javier, *“El pretensado como instrumento de diálogo entre la ingeniería y la arquitectura”*, España, Hormigón y Acero, 22 de agosto de 2007.

¹⁰⁴ Cuando se emplea el término pretensado, por definición incluye tanto la introducción de tensiones previas (pretensado), como la introducción de tensiones a posteriori (postensado).

el Puente de Salginatobel (1929) (Figura 58), de Robert Maillart (1872-1940), el cual logra conformar en su punto medio y en los apoyos unas articulaciones, con una solución realizada in-situ, configurando en dichos puntos secciones de menor rigidez. Este tipo de solución constructiva permitía realizar el cálculo de la estructura, conformando un arco triarticulado. Obviamente en la actualidad no nos es necesario realizar este tipo de simplificaciones para el dimensionado de la estructura, pero la claridad de ese concepto se transmite al diseño del proyecto y en algunos casos concretos influye sobre la conformación espacial.

En el caso de soluciones prefabricadas, sean de hormigón u otro material, los elementos llegan a la obra como unidades que formarán un todo conceptual, adquiriendo las uniones especial relevancia como punto que configura las interacciones resistentes entre los elementos. La más básica sería el apoyo de unos elementos sobre otros, conservando su individualidad, como así encontramos estructuras prefabricadas de hormigón de naves, comercios... en las que se erigen soportes, cuyo diseño formal está claramente enfocado al apoyo de las vigas, estableciéndose en obra el contacto entre ambos a través de un elastómero que permite compaginar los desplazamientos entre los elementos. Así mismo la continuidad en vigas prefabricadas de hormigón puede lograrse a través de un

postensado, que conforme la configuración resistente definitiva. Las estructuras metálicas por su parte por definición son prefabricadas, llegando a obra elementos complejos preconformados o unidades para ensamblar en obra, ya sea por soldadura o tornillería. Todas estas distinciones son condicionantes sumados al resto de consideraciones implicadas en el proceso de concepción de la arquitectura.

Como dice Alfredo Páez Balaca, *“Con la salvedad de contadas excepciones, el hormigón pretensado ofrece unas ventajas que primordialmente se manifiestan en las estructuras llamadas singulares, bien sea por la importancia del vano que salvan, bien por las especiales circunstancias que rodean su ejecución, o bien por sus particulares requisitos de impermeabilidad o resistencia frente a fenómenos de fatiga. Puesto que ninguna de estas condiciones concurren ordinariamente en la construcción de viviendas, lógico es que, en este dominio estructural, la técnica del pretensado se limite al empleo de sus viguetas, unas piezas que por venir prefabricadas, ofrecen la incuestionable ventaja de una mayor*

Figura 58. Puente de Salginatobel (Suiza), obra de Robert Maillart (1929-1930). Es un puente de arco triarticulado de hormigón armado de 90 metros de luz.

*economía respecto a los equivalentes perfiles metálicos, una mayor durabilidad, y un mejor comportamiento frente a los efectos de un posible incendio declarado en el interior del edificio. Así resulta que, cuantitativamente, la mayor parte de la producción de aceros de muy alta resistencia mecánica se destine a este mercado sin que por ello pueda afirmarse que la edificación sea el principal campo de aplicación del pretensado. En realidad, un edificio convencionalmente construido con estos elementos prefabricados, no se considera como una solución pretensada a menos que la estructura, es decir el entramado resistente que soporta esos elementos, lo sea efectivamente.*¹⁰⁵ Los elementos pretensados pueden encontrarse como parte de otro tipo de soluciones o en sistemas pretensados, que conciben por estos medios el esquema resistente general. Este último es el caso de las arquitecturas de grandes luces, donde el pre o postensado aparecen como parte estructurante, aportando sus valores a los asociados a la conformación de este tipo de soluciones espaciales.

Por múltiples razones, desde las meramente económicas hasta las conceptuales, las soluciones pretensadas, han abanderado, desde el punto de vista técnico, la revolución arquitectónica de la segunda mitad del siglo XX, marcando claramente la vía para futuras soluciones estructurales. Este recurso es ya parte del panorama arquitectónico del siglo XXI y pieza vital para la comprensión de las arquitecturas de grandes luces, actuales y futuras.

El pretensado, se constituye como uno de los principales recursos para la producción arquitectónica del siglo XXI. Esto se produce, tanto por las ventajas que lleva asociado su empleo, como desde un punto de vista filosófico, ya que el pretensado es el reflejo de la superación del hombre sobre la materia, rebasando las limitaciones impuestas por el material, supeditando el comportamiento resistente a las conveniencias proyectuales. El hombre siempre ha trabajado con materiales muertos que modelaba para erigir sus edificaciones, hasta que los nuevos materiales dibujaron un panorama cambiante en el que estos, año tras año mejoraban sus capacidades resistentes. Por fin en el siglo XX, el pretensado permitió actuar dentro del material, mediante la incorporación de un sistema de cargas inicial, que regula el funcionamiento de la estructura al entrar en servicio.

El pretensado no es solo un sistema constructivo, sino de una forma más profunda, un entendimiento de los límites naturales y la superación de los mismos mediante el uso ingenioso de sistemas de fuerzas, que modifican el estado tensional interno de los materiales, para que cada cual actúe conforme a sus características. Así se hace posible aumentar la resistencia del elemento estructural y un mayor rango dimensional, controlando la forma en que cada material asume su función dentro del elemento estructural. La estructura pasa de ser un *“elemento inerte”*¹⁰⁶ que se activa con la presencia

¹⁰⁵ PÁEZ BALACA, Alfredo, *“El hormigón pretensado en la arquitectura”*, España, Informes de la Construcción, nº 457-4, 11 de octubre de 1988, p. 111.

¹⁰⁶ Las denominaciones personales de *“elemento pasivo”* y *“elemento activo”*, dan por descontado en el estado inicial la influencia de las cargas de peso propio, con el fin de clarificar el concepto. Esta simplificación es un recurso didáctico y no niega la relevancia de la carga de peso propio, que en casos extremos como los puentes, puede llegar a ser uno de los principales factores a considerar.

de un conjunto de cargas que lo ponen en tensión, para trasladar éstas hasta el terreno, a un “*elemento activo*”, que en la situación de partida tiene un estado tensional que se modifica según se incorporan las cargas, aumentando la tensión de algunos materiales, mientras en otros se produce el efecto inverso. Un cambio conceptual en el entendimiento del medio físico en el que se desenvuelve la actividad del arquitecto, que como ideador de espacios ha de ser consciente de los márgenes de actuación, así como del comportamiento de la materia. Una revolución ideológica como ésta, no puede quedar en el campo de las anécdotas o como un mero elemento al que se recurre al suscitarse una problemática técnica para la resolución por medios más convencionales. El pretensado es una forma de entender la materia, la espacialidad y la arquitectura. Si hay un arquitecto que hizo alarde de ello fue Paulo Mendes Da Rocha. *“Todos sus edificios resultan, vistos hoy, maravillosamente coetáneos. La independencia de juicio y la solidez de sus esquemas mentales le han permitido pasar por encima de tantas y tantas tentaciones que se han sucedido a lo largo del tiempo.*

Ni...

- *posmodernidades, porque la modernidad no ha pasado; es un modo, del que somos hijos, de enfrentarse al mundo, sin que hasta el momento hayamos sido capaces de encontrar otro mejor;*

- *ni deconstructivismos, porque la arquitectura consiste en la puesta en orden de la naturaleza a través de la construcción con el material; todo orden superfluo no es tal, sino la serpiente de la confusión interesada;*

- *ni alta tecnología, porque la técnica no es más que el conocimiento de la naturaleza para aprender de ella sus lecciones de orden y suprema necesidad; todo lo innecesario o innecesariamente complicado repugna al buen sentido arquitectónico;*

- *ni regionalismos, porque la aspiración de la arquitectura es construir sueños, e igual que no existe una humanidad regional, no puede existir una arquitectura regional;*

En el caso de los “*elementos inertes*” según se incorporan las cargas en mayor o menor medida, todos los materiales que conforman el elemento estructural, incrementan su tensión en una misma línea, ya sean esfuerzos tractores o compresiones.

Por su parte los “*elementos activos*” a medida que se incrementan las cargas a resistir, actúan de forma más compleja, ya que mientras los materiales a los que se había aplicado una tensión inicial incrementan los esfuerzos tractores a los que se encuentran sometidos, por su parte el resto de materiales precomprimidos reducen sus tensiones de compresión, manteniendo materiales como el hormigón, incapaces de resistir tracciones, siempre con esfuerzos que entran en el marco de sus capacidades resistentes. Este tipo de soluciones no da por descontado el monolitismo y unidad del elemento estructural, ya que la conformación de un estado tensional de inicio, hace posible la conformación, por ejemplo, de estructuras en arco con dovelas enlazadas por un postensado, que las permite actuar en unos rangos resistentes impropios para las estructuras de arco.

- ni informalismos, porque la forma es el resultado del orden y el modo que tiene la arquitectura de responder, con rigor, a un problema; "para apuntalar a un edificio hace falta más madera que para construirlo"...¹⁰⁷

Como bien expresa José María García del Monte al hablar de la obra de Paulo Mendes da Rocha, lo verdaderamente relevante es la forma de pensar y en este caso concreto, buena parte de la contemporaneidad conceptual de su obra parte de la concepción estructural y del pretensado, como entendimiento primigenio para el diseño espacial. Una forma de pensar y diseñar, que si bien claramente encuadrada en un marco técnico y social claramente distinto, durante sus últimas obras, se percibe el avance suscitado por la

Figura 59. Pórtico en la remodelación de la Plaza Patriarca, en São Paulo (Brasil), obra de Mendes da Rocha (2002).

¹⁰⁷ GARCÍA DEL MONTE, José María, *"De las posibilidades arquitectónicas del pretensado, Técnica y proyecto en la obra de Paulo Mendes da Rocha"*, España, Tesis doctoral, ETSAM, Universidad Politécnica de Madrid, 2006, p. 31-32.

La cita realizada por José María García del Monte, pertenece a:

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luis, *"Intersecciones"*, España, Editorial Rueda, 2004, p.42.

influencia debida a los medios digitales, como parte de su contemporaneidad técnica, permaneciendo inalterable la forma de concebir la arquitectura. Éste hecho hace especialmente reseñable su obra, como una muestra no solo constructiva y técnica, sino primordialmente ligada al proceso reflexivo sobre la propia concepción del proyecto. En la remodelación de la Plaza del Patriarca (2002) (Figura 59) Mendes da Rocha deja patente su interés por crear espacios públicos, mediante los recursos espaciales de grandes luces y la experiencia adquirida en su amplia producción en hormigón pretensado, haciendo un alarde de la forma y las proporciones, para constituir el simbolismo de la puerta y la función de la pérgola, en este caso mediante una estructura metálica. Pese al cambio de material, esta obra conserva todos los principios empleados por Mendes da Rocha en obras, como el MUBE, en detalles como la proporción y el apoyo del elemento horizontal. Obras como ésta, son materialización del reto expresivo a la gravedad, basado en la capacidad técnica empleada, con magistral virtuosismo e intencionalidad trasgresora, ante la concepción convencional de la espacialidad arquitectónica.

A día de hoy el pretensado es la técnica constructiva que podemos considerar más firmemente enlazada con la contemporaneidad. Así buena parte de las arquitecturas singulares que se desarrollan en la actualidad, resultarían incomprensibles sin su etérea presencia.

Arquitectura atornillada

Al hablar de arquitectura metálica, claramente aparece como un factor vital para su entendimiento y concepción las uniones. A este respecto en la actualidad encontramos tres soluciones: las uniones soldadas y las uniones atornilladas. Soluciones como los roblones quedaron ya enmarcados en tiempos remotos, aunque pese a estar en desuso, se encuentran excepciones como el caso del Segundo Puente del río Hooghly, Calcuta (India) (Figura 60), construido entre 1978 y 1992. Dicha decisión se tomó tras sopesar las dificultades para encontrar acero soldable en esa parte de India, optándose por la solución más adecuada a los medios disponibles para garantizar la calidad y economía. Así vemos como podemos establecer determinadas soluciones como pertenecientes a los márgenes de la contemporaneidad, excluyendo otras de tal calificativo.

Figura 60. Segundo Puente del río Hooghly, Calcuta (India), obra de Schlaich Bergermann und Partner (inaugurado en 1993). Este puente tiene un vano central de 457 metros y dos laterales de 182 metros.

De las soluciones actualmente empleadas, tanto la soldadura como la tornillería muestran claras ventajas. Ambas técnicas tienen marcadas diferencias prácticas, más allá de su propia constitución. Las soldaduras establecen un nexo permanente entre las piezas, mientras que la tornillería permite la temporalidad de las soluciones, por lo que las arquitecturas

efímeras suelen recurrir a estas soluciones. Además la soldadura, pese a los medios de control, está claramente supeditada al factor humano, por todos los condicionantes que intervienen en la conformación del cordón de soldadura, algo que no ocurre en la tornillería¹⁰⁸, ya que el par de apriete está controlado por la máquina que lo ejerce, dando una garantía de calidad extra.

La soldadura aparece en 1910, introducida en el campo de la construcción, como un sustituto a los roblones, que rápidamente logró reemplazarlos. Las soluciones atornilladas son más recientes, ya que para su resolución es necesario el empleo de tornillos de alta resistencia, que aparecieron más recientemente.

La desventaja de las soluciones atornilladas radica en el mayor control que hay que realizar a lo largo de la vida útil de la edificación, vigilando que cada uno de los tornillos se encuentre correctamente apretado, pese al paso del tiempo.

Actualmente las soluciones atornilladas son las que mayores garantías ofrecen, así como un mejor control tensional de los elementos, ya que de una forma similar a como ocurría con el pretensado, se establece una tensión elevada en los tornillos para que la resistencia de la unión se produzca principalmente mediante el rozamiento de las superficies en contacto, frente a la resistencia a cortante en la que se basaban los roblones. Una evolución, no solo constructiva y práctica, sino primordialmente conceptual. Así ésta se establece como la línea más intensamente ligada a la contemporaneidad, así como a las soluciones de grandes luces con elementos metálicos, que en la mayor parte de los casos se construyen como un mecano, uniendo mediante tornillería las grandes piezas que llegan desde el taller, limitadas dimensionalmente por el transporte. Este tipo de soluciones ejercen una distinción entre la calidad y control de la producción en taller, donde las soldaduras se pueden ejercer con unas mayores garantías de calidad, montando en obra éstas mediante tornillos, que empleando el control mecánico del apriete, establecen igualmente unas garantías de calidad como el mercado actual exige.

La prefabricación de elementos estructurales soldados y la tornillería en obra, son sin duda una de las soluciones más extendidas para la ejecución de grandes luces o arquitecturas singulares, a las que no responden el conjunto de perfiles comerciales que resuelven la inmensa mayoría de las situaciones convencionalmente suscitadas en la arquitectura, tanto por los márgenes dimensionales, como por la resistencia.

No se debe pasar por alto que en la actualidad se están investigando adhesivos, que posiblemente en un futuro cercano sean capaces de establecer nexos muy similares a los

¹⁰⁸ Cuando las uniones mediante tornillos tienen un carácter temporal, las superficies de los elementos metálicos pueden llevar recubrimientos para su protección, pero cuando están concebidas con un carácter permanente, las superficies en contacto deben encontrarse limpias y carentes de cualquier tipo de recubrimiento, para garantizar el coeficiente de rozamiento adecuado, considerado a la hora del cálculo.

ejercidos por las soldaduras, pero con las garantías de un mayor contacto entre las superficies¹⁰⁹.

La adopción de elementos como tornillos o adhesivos... más allá de la propia resolución técnica de la edificación, llevan asociado un proceso resolutivo claramente diferenciado, que encuadra su empleo en diferentes rangos proyectuales. Al hablar en los márgenes de los proyectos de grandes luces, nos encontramos ante una mayor especialización de las acciones constructivas, enfocadas, tanto en la resolución espacial, como simbólica y representativa de la edificación, buscando una determinada respuesta en el usuario. Las soluciones estructurales no siempre quedan expuestas como elemento visual, aunque en el caso de las estructuras atornilladas, dado el control durante la vida útil al que han de estar sometidas, está especialmente aconsejado. Así mismo, la estética que generan, suele establecer en el espectador un claro vínculo con la arquitectura High-Tech, como referente claramente reconocible por la población.

Los tornillos representan tanto los avances sobre el material, con el empleo de aceros de alta resistencia, como la calidad y el control de la ejecución en taller, para culminar con el montaje en la obra. Así enfocados en procesos ligados a la prefabricación se establecen como una solución encuadrada en los márgenes de la contemporaneidad y con claras vistas de convertirse en una de las principales líneas de actuación en la resolución de estructuras metálicas en el siglo XXI.

Añadido a lo anteriormente comentado, hay que considerar que

Figura 61. Proyecto de experimentación espacial DENSITY FIELDS, obra de Oyster Wu Collaborative y el ingeniero Bruce Danziger de ARUP (2007). En este caso realizado mediante una serie de barras soldadas.

¹⁰⁹ Para la realización de las soldaduras es necesario considerar las superficies en contacto y la sección definida por el cordón de soldadura, ya que en ese punto es la sección del elemento resistente. Para aumentar esta superficie de contacto, en muchos casos se efectúan cortes a 45º que permiten aumentar la superficie de contacto del cordón de soldadura con el elemento donde se suelda. Así mismo los perfiles cerrados y tubos, solo permiten su soldadura por el perímetro exterior, lo que supone una desventaja resistente de estos en las soluciones soldadas, por lo que en muchos casos se desestima su empleo. Es posible que la aparición de adhesivos de alta resistencia, permitan que los perfiles tubulares establezcan un nexo de mayor entidad con la superficie a unir y aumente su uso en edificación.

en gran medida las arquitecturas efímeras son posibles gracias a este recurso. Un elemento puramente técnico y de pequeñas dimensiones es capaz de posibilitar todo un abanico tipológico, que según avanzan la interacción entre los procesos productivos y los medios digitales hace alarde de una mayor libertad formal. A día de hoy, este tipo de construcciones con un entorno cambiante, gozan de la libertad e irreverencia para optar por resoluciones arriesgadas e innovadoras, que pongan en tela de juicio nuestra lectura del espacio y los nexos con el entorno. En definitiva un campo para la experimentación (Figura 61), aunque este tipo de obras no suele caracterizarse por unos márgenes dimensionales reseñables, sí pone en práctica soluciones que otro tipo de resoluciones proyectuales pueden llevar a efecto, en contextos claramente distintos.

2.2. Medios de cálculo. La capacitación y medios resolutivos, como definidores del marco de actuación

Desde el punto de vista del conocimiento, como se ha comentado anteriormente, la producción arquitectónica actual, así como sus procesos de concepción, están claramente condicionados por los medios de análisis estructural. El conocimiento del funcionamiento resistente de las estructuras ha hecho posible el correcto dimensionado previo. Partiendo de un esquema de cargas, se llega al establecimiento concreto de los elementos. La capacidad de cuantificar, a su vez, permite establecer comparaciones entre las distintas opciones disponibles, cambiando los procesos de selección, buscando la combinación más oportuna, que se ajuste, tanto a la resolución resistente, como espacial y funcional. Este hecho ha influido en el proceso de la concepción arquitectónica de manera claramente patente a lo largo de toda la historia. En los últimos tiempos es precisamente donde el conocimiento adquirido ha permitido alardes y efectos enfocados en la negación de dicha influencia para el espectador, lo que si cabe lo hace aún más relevante desde el punto de vista conceptual.

Al tiempo que los medios de cálculo, los medios de representación han sido claro reflejo de los avances constructivos durante los últimos tiempos. Hasta hace escasas décadas todos los medios de representación con los que se contaban eran con los planos y maquetas, estos últimos en muchas ocasiones como principal medio de ensayo previo de las soluciones, como representación escalada de la realidad física de la estructura¹¹⁰. Estos medios de representación de la idea arquitectónica, servían de ensayo previo, a nivel funcional, estructural y estético. Estos han determinado la forma de concebir el proyecto, resultando de relevancia en la propia idea edificada. Por poner un ejemplo, la perspectiva cónica ideada por

¹¹⁰ Es necesario puntualizar que el ensayo de sistemas de cargas en modelos reducidos, no es más que un medio orientativo para el diseño, (enfocado primordialmente en la determinación gráfica de los funiculares y antifuniculares de las cargas), y no una corroboración exacta de la validez de la solución adoptada. A la hora de aumentar la escala del elemento resistente, *“cuando un objeto se somete a un aumento proporcional en tamaño, su nuevo volumen es proporcional al cubo del multiplicador y su nueva superficie es proporcional al cuadrado del multiplicador”* (Galileo Galilei). Así la superficie encargada de resistir las tensiones se incrementa más lentamente. Una diferencia de grado, que pone de manifiesto la incapacidad de estos medios de cálculo como sistema de cálculo directo de las estructuras.

Esta relación entre el aumento de los volúmenes y las áreas al modificar la escala de los elementos se denomina *“ley cuadrático-cúbica”* y fue enunciada en primer lugar por Galileo Galilei (1564-1642) en 1638 en su libro *“Dos nuevas ciencias: Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze”*.

Las maquetas desde tiempos remotos y aún en la actualidad, siguen siendo un método de ensayo de gran utilidad en diferentes campos, pero no pueden ser tomadas como objetos proporcionales a la hora del análisis resistente, tal y como se ha visto debido a la *“ley cuadrático-cúbica”*.

Filippo Brunelleschi (1377- 1446) (Figura 62), no solo influyó en la forma de entender la representación pictórica de la realidad¹¹¹, sino en la propia arquitectura, que buscó ensalzar la visión perspectiva de los espacios, modificando, tanto la representación, como la concepción espacial.

En las últimas décadas del siglo XX entraron en el panorama arquitectónico los medios digitales, que han marcado el cambio de siglo y el nuevo entendimiento de la arquitectura. Esta herramienta ha posibilitado la representación de volúmenes complejos mediante múltiples secciones que permiten su definición, así como mediante representaciones tridimensionales, que han venido a competir con la producción de maquetas a la hora de vislumbrar un atisbo del producto final. Pero en los últimos años se ve una tendencia claramente en aumento a la confección de modelos tridimensionales confeccionados mediante impresoras 3D (Figura 63). Éstas como se ha comentado, constituyen uno de los puntos clave para la comprensión del panorama arquitectónico de las próximas décadas.

Tan importante es la comprensión del medio en el que se desarrolla la producción arquitectónica y las capacidades que la técnica hace posible en los diferentes campos que influyen en su conformación, como de los procesos reflexivos que conducen a su definición. Actualmente el marco dimensional posibilitado por los medios a nuestro alcance, hace que en los márgenes empleados en la arquitectura se presenten un amplio abanico de opciones para su resolución. Pero de forma paralela, ha de aparecer un esfuerzo reflexivo que busque la justificación de las decisiones adoptadas en el proyecto, desde la adopción de soluciones de

Figura 62. Perspectiva cónica ideada por Filippo Brunelleschi (1377- 1446).

Figura 63. Maqueta realizada mediante una impresora 3D.

¹¹¹ La ciudad de Florencia fue el caldo de cultivo ideal para un arquitecto como Filippo Brunelleschi, que basaba la belleza de la obra en las medidas, las proporciones y la perspectiva. Este arquitecto renacentista se formó y relacionó, con la obra de múltiples sabios: Paolo del Pozzo Toscatelli (matemático y físico), Vitrubio, Alhazer, Euclides, Peckman... Así la obra de Brunelleschi se enmarca dentro de la cultura científica de Florencia, que mediante el conocimiento buscaba la superación.

grandes luces, como es el caso que nos ocupa, como de una u otra solución técnica y configuración espacial, sopesando desde los aspectos más pragmáticos, a los esencialmente representativos, sin que ambos resulten excluyentes.

Resultan de especial relevancia el estudio de los medios de cálculo como se ha expuesto en capítulos anteriores, teniendo en cuenta el impacto, tanto sobre la técnica, como sobre la concepción del proyecto. Un mayor conocimiento siempre ha llevado asociado un mayor aprovechamiento de las posibilidades intrínsecas del material y por consiguiente un aumento tanto de las luces, como una mejora del proceso constructivo y el producto final. Así toda evolución producida en los medios de cálculo, ha redundado en un cambio conceptual en los procesos de proyección arquitectónica. El acto proyectual es la intermediación entre el poder y el hacer. Por eso mismo la reflexión sobre ambos ámbitos puede llegar a conferirnos un mayor entendimiento de los entresijos concernientes a la materialización de los proyectos de grandes luces, como respuesta a un marco concreto, tanto técnico, como socio-económico e ideológico. La superación de las barreras dimensionales, siempre está precedida por una necesidad, ya sea de índole funcional o representativa. Siempre existe una justificación para las decisiones proyectuales, aunque ésta resida en ámbitos más complejos que una respuesta directa a la problemática inicial. Las grandes luces al abandonar en los márgenes arquitectónicos la frontera de lo posible, cambian radicalmente su papel, modificándose así tanto su proyección como su lugar en el panorama global. Hoy las grandes luces son una opción más, que lleva asociado un mayor compromiso tanto estructural, como económico y constructivo, lo que claramente requiere una justificación, en un panorama donde cada vez el factor económico se contempla como una de las principales limitaciones a la acción humana¹¹².

El estudio de los medios de cálculo y representación, se encuentran intrínsecamente relacionados, al constituirse, los medio de representación y de reflexión proyectual, como nexo previo a la materialización de la obra y por consiguiente a la defimición del elemento objeto del cálculo. En este punto interviene la mente del arquitecto, para con los medios propios de un tiempo, dar una respuesta contemporánea¹¹³ a una problemática, social, funcional...

¹¹² En el panorama actual se entiende la necesidad de comedir los costes de la obra, en la línea de la racionalidad constructiva del proyecto. Hace escasos años vivimos un periodo marcado por la aparición de proyectos en los que el factor económico quedaba claramente en un segundo plano, ante la necesidad de innovación y representación dentro del panorama arquitectónico global. Este ciclo de excesos que ha visto nacer obras ciertamente interesantes y en las que la apuesta, tanto por la ruptura con la convencionalidad, como con las limitaciones espaciales socialmente establecidas, se puede dar por terminado, planteándose un nuevo periodo en el que las exigencias van en otra línea. Hoy factores como la economía, la sostenibilidad, el ahorro energético... priman ante el resto, algo que marca la actividad proyectual.

¹¹³ Al referirnos a una respuesta contemporánea, se está haciendo referencia al momento concreto en el que se produce la obra y no referenciada desde el margen temporal actual. Una obra contemporánea podríamos definirla a grandes rasgos, como aquella que da respuesta a una problemática, con los medios pertenecientes a su tiempo, tanto desde el ámbito técnico, como estético y conceptual. Así una obra que dé respuesta con medios técnicos que podemos considerar “*desfasados*” o con una estética

A lo largo de toda la historia, aquellas edificaciones que iban más allá de la cotidianidad constructiva, suponían un reto técnico. Así aquellas obras enmarcadas en el ámbito de las grandes luces, ponían en tela de juicio los modelos edificatorios empleados. Cuando las escuadrías de madera eran demasiado cortas para las dimensiones a conformar, se empleaban modelos estructurales específicamente indicados, como el arco, la bóveda y la cúpula, todos ellos basados en un mismo concepto, que configura un esquema resistente que funciona exclusivamente a compresión¹¹⁴. Así se pasa del dintel al arco y por tanto en la construcción de grandes salas en piedra se pasa de la sala hipóstila¹¹⁵, en la que se suceden uno tras otro los soportes, con las reducidas dimensiones que permiten los dinteles de piedra, apoyados sobre los capiteles de las columnas, a los grandes espacios libres de pilares, que permiten los arcos.

Los dinteles en los que se basaban las construcciones con anterioridad, funcionan a flexión, generándose un arco en su interior, pero esta forma de trabajar origina tracciones en algunos puntos de la piedra, que el material no es capaz de resistir y termina por romperse, como vemos en los restos de los templos Egipcios (Figura 64), como en el santuario de Amón en Karnak, el de Mut y el de Amón en Luxor, entre otros.

La razón de ser del arco, es que la forma del elemento estructural resulte similar a la de la trayectoria de las cargas, trabajando a compresión y reduciendo al mínimo las tracciones, que como hemos comentado llevan con el tiempo al colapso de la estructura, por la incapacidad del material a resistir ese tipo de esfuerzos. Otro factor a contar, es la variación con el tiempo de las cargas y por tanto del antifunicular que forma su trayectoria, este hecho es el que define el grosor del arco, para que

Figura 64. Proceso de colocación y arrastre de dinteles en los templos egipcios.

claramente relacionada con periodos previos, raramente podrá ser calificada en estos términos como contemporánea.

¹¹⁴ Para luces reducidas, habitualmente se empleaban escuadrías de madera, empleándose el arco y la bóveda de piedra o ladrillo, allá donde se exigía una mayor luz. Las vigas de madera son elementos horizontales a flexión, lo que hacía posible la conformación tanto de los forjados, como de las cubiertas. En el caso de las cubiertas pueden aparecer cerchas, como el cuchillo español, compuestas de múltiples elementos de madera enlazados para conformar un elemento estructural único, de mayores dimensiones. Estas cerchas, alcanzan mayores dimensiones, pudiendo disponerse sobre las bóvedas de las catedrales para conformar la cubierta. Los elementos de madera soportan, tanto tracciones, como compresiones, lo que permite una mayor libertad. En el caso de la piedra o la cerámica, los esfuerzos resistidos solo pueden ser compresivos, lo que obliga a la utilización de esquemas estructurales sometidos exclusivamente a compresiones, así el arco, la bóveda y la cúpula se establecen como los modelos resistentes propios de las grandes luces, durante la mayor parte de la historia.

¹¹⁵ Sala hipóstila viene del griego hypóstȳlos -prefijo hypó, “bajo”, y stȳlos, “columna”.

todo antifunicular, que pueda producirse con el tiempo, se encuentre dentro de la sección de la estructura. Esta consideración es la que ha permitido que muchas de estas edificaciones romanas hayan llegado hasta nuestros días y especialmente los puentes, en los que este hecho resulta sumamente gráfico.

Con estas premisas, el Imperio Romano logró ya en el siglo I a.C. (25 a.C.) alcanzar una luz de 43,3 metros en el Panteón de Roma o Panteón de Agripa (Figura 65), ningún otro edificio llegó a alcanzar luces similares hasta 1420 d.C. con el inicio de la construcción de la cúpula de la basílica de Santa María del Fiore, con 43 metros de luz¹¹⁶ y 82 de altura interior y 114,5 exterior. Hay que puntualizar que el Panteón de Roma fue reconstruido entre el 123 y 125 d.C., fecha en la que algunos

Figura 65. Litografía del Panteón de Roma, reproduciendo su estado tras la reconstrucción del siglo II d.C.

escritos parecen datar erróneamente este edificio, contrariamente a la inscripción de la portada de éste, en la que se

atribuye la construcción a Marco Virsanio Agripa, amigo y general del Emperador Augusto, pudiendo enclavarlo en un periodo concreto de las obras realizadas por Agripa, en el entorno de Roma conocido como Campo de Marte en 25 a.C. El Panteón es una obra única, en la que los aspectos técnicos, proporciones y material, se encuentran estudiados al detalle.

Con posterioridad se intentaron erigir grandes espacios, generalmente dedicados a fines religiosos, buscando la arquitectura gótica la optimización de la forma¹¹⁷. Pero la especialización de los elementos constructivos y el afinamiento de las secciones tenía como base el conocimiento empírico, adquirido mediante los sucesivos colapsos estructurales, que ayudaron a dibujar los límites dimensionales de lo realizable y a definir aquellos esquemas resistentes más adecuados al esquema de cargas y la conformación de grandes luces. En estas construcciones, las bóvedas ya no aparecen como elemento de cubierta, sino meramente como una protección al fuego, para la estructura superior de madera, similar a la empleada en las basílicas romanas, siguiendo el esquema de cercha (ya sea del tipo de cuchillo español u otro similar), así el elemento de piedra solo debe de soportarse a sí mismo. Por tanto los empujes horizontales, que son los más difíciles de soportar para este tipo de construcciones, son menores, siendo entorno a la mitad que los resultantes en una bóveda de cañón

¹¹⁶ CHUECA GOITIA, Fernando, *"Historia de la Arquitectura Occidental Renacimiento"*, Madrid, CIE Dossat 2000, 2003, p. 17.

¹¹⁷ En las catedrales góticas la bóveda de piedra ya no conforma la cubierta, sino que sirve de elemento protector de la techumbre de madera conformada sobre ésta. las cubiertas de madera estaban formadas por cerchas que cubrían el ancho de la nave, trasladando las cargas a los muros o soportes laterales. Así se reducen las cargas soportadas por las bóvedas, minorándose en consecuencia la contundencia del elemento estructural.

renacentista. Para trasladar al terreno dichos empujes se disponen exteriormente los arbotantes, siguiendo la trayectoria de las cargas, logrando optimizar los elementos constructivos, que trabajan prácticamente de forma exclusiva a compresión. Incluso cuando estos no aparecen visualmente, podemos ver como con las bóvedas laterales se conforma un arco, que traslada estos empujes horizontales al terreno. Así se emplean arcos apuntados, que reducen la componente horizontal y por tanto buena parte de la problemática comentada.

En estos momentos de la historia aún se carecía de medios de cálculo que permitieran el estudio numérico de las estructuras, hecho por el cual los constructores góticos, basados en las experiencias previas o “*conocimiento empírico*”, establecieron una serie de reglas geométricas (Figura 66), según las cuales se podía garantizar la seguridad de la obra, siempre que no se superaran ciertos límites dimensionales.

El “*conocimiento científico*” de las estructuras tiene su origen en el siglo XVII, en 1660, cuando Robert Hooke (1635-1703), desarrolla la ley de las relaciones entre la fuerza y la deformación de los materiales o Ley de Hooke. Esta ley explica la relación existente entre las fuerzas aplicadas a un cuerpo elástico y las deformaciones producidas. Otro científico coetáneo de Hooke fue Isaac Newton (1642-1727), quien formula la ley de la gravitación universal¹¹⁸, estableciendo las bases de la mecánica clásica, definiendo las leyes que regulan el movimiento de los objetos¹¹⁹. Además Isaac Newton desarrolla el cálculo diferencial e integral entre 1665 y 1666 a partir de su obra “*Analysis per aequationes número terminorum infinitos*”, en la que establece los principios que posteriormente desarrollaría.

Figura 66. Aplicación de las normas geométricas en las catedrales de Gerona (izquierda) y Saint Chapelle (derecha).

Los fundamentos matemáticos para el cálculo de las estructuras se originan en el siglo XVII y XVIII, planteándose en estos siglos todos los principios de aplicación, exponiéndose los teoremas matemáticos y los métodos a lo largo del siglo XIX y XX. Precisamente en estos dos últimos es cuando se implanta el “*conocimiento científico*”, en sustitución del “*conocimiento empírico*”¹²⁰, como base para la toma de decisiones estructurales. Así se pasa de un

¹¹⁸ Hay una polémica abierta en torno a la paternidad de la “*Ley de gravitación Universal*”, ya que Robert Hooke aseveraba que esta idea era originalmente suya. Robert Hooke, se caracterizó por la propuesta de ideas de gran originalidad, que raramente desarrollaba, pudiendo ser ésta una de ellas.

¹¹⁹ Las tres leyes de Newton son: primera ley de Newton o ley de la inercia, segunda ley de Newton o ley de fuerza y tercera ley de Newton o principio de acción-reacción.

¹²⁰ Al respecto de este cambio de mentalidad, encontramos el texto de “*Crítica de la razón pura*”, escrito en 1781 por Immanuel Kant (1724-1804), en este libro realiza una reflexión sobre los procesos resolutivos de los métodos científicos. Los juicios pueden ser a priori (sin experiencia) o a posteriori (tras la experiencia), según Kahn los juicios de las ciencias (física y matemáticas) son a priori y sintéticos.

razonamiento basado en experiencias previas, a un cálculo matemático, que define con precisión el comportamiento resistente de la estructura, posibilitando su dimensionado previo.

“El cálculo estructural ha evolucionado paralelamente al desarrollo de la matemática y de las leyes de la mecánica. La aparición del concreto armado impulsa violentamente el arte de construir porque le permite al constructor mayor libertad para diseñar. Los pórticos que se construían con pesadas piedras monolíticas o con ladrillos trabados para formar las columnas, dinteles y arquivoltas, ahora son sustituidos por el concreto armado, obteniéndose de este modo, elementos verticales esbeltos y dinteles de secciones reducidas. El desarrollo que se logró en las técnicas constructivas fue vigorizado cuando se comenzó a utilizar el cálculo estructural, que se apoyó en los métodos derivados de la mecánica complementada con el análisis matemático, y que sustituyeron los métodos empíricos. Esto fue posible cuando se descubrió que todos los fenómenos naturales se pueden estudiar mediante las relaciones exactas de la matemática, siempre que se establezcan modelos adecuados. Así se abrió el camino para la ciencia moderna y para el desarrollo del cálculo de estructuras, siendo el cálculo integral y el diferencial, un instrumento muy potente para realizar tales operaciones. La estructura ha sido siempre un componente esencial de la arquitectura, por ello, los logros obtenidos en su desarrollo influyen de manera determinante en el planteamiento de nuevas propuestas con técnicas mejoradas y uso más racional de los materiales.”¹²¹

Figura 67. Comparativa entre un puente de arco y un puente resuelto mediante un muro laminar. (a) Puente de Nemours sobre el Loing. (b) (c) Puente sobre el Basento en Potenza (Italia), obra del Ingeniero Sergio Musmeci (1972-1974), formado por cuatro arcos de 69,20 m de luz.

La incorporación de los métodos de cálculo numérico de las estructuras, resultan de vital importancia para comprender las transformaciones espaciales acaecidas durante estos dos últimos siglos (Figura 67). Así aparece el concepto de mínimo, pudiendo establecerse márgenes de seguridad como precaución, para garantizar que la estructura no alcance el punto de colapso en su vida útil. Hasta ese momento el conocimiento empírico definía los límites en los que se producía el colapso, sin márgenes de seguridad. A partir de este momento

¹²¹ ROMERO MARTÍNEZ, Alonso, “Evolución de los métodos de cálculo en las estructuras diseñadas con pórticos de concreto armado para edificios en el área norte de Latinoamérica”, Revista de la Facultad de Ingeniería CUV v.20 n.2, 2005.

solo se construirá lo que el cálculo define como seguro, con la aplicación de unos márgenes de seguridad suficientes, que pronto serían regulados por una normativa específica, como las que se desarrollan para las construcciones en hormigón armado a comienzos del siglo XX. En 1900 en Francia, el Ministerio de Obras Públicas crea *“la Commission du Ciment Armé”*, que elaboraría el texto formado por 25 artículos que salió a la luz en 1906, (*la Circular Ministerial de 1906*), que regula las construcciones de hormigón armado con unos dimensionados sumamente conservadores. Al igual que ésta, se desarrollaron normativas que valiéndose de los medios de cálculo, han buscado el correcto dimensionado de las estructuras con unas garantías.

Los medios de cálculo han sido un factor vital en la superación de los márgenes dimensionales y la conformación de nuevas soluciones estructurales, en materiales como el hierro, el acero, el hormigón armado y el hormigón pretensado. Pero al tiempo han supuesto un factor limitativo, dado que a partir de su implantación, solo se construye aquello que numéricamente se ha determinado como seguro. Así una restricción en los medios de cálculo se traduce en una limitación constructiva. Claro ejemplo de ello lo encontramos en las estructuras laminares de hormigón armado, cuyas formas se ven coartadas a aquellas representables mediante ecuaciones de fácil resolución manual. Solo la aparición de los medios informáticos durante la segunda mitad del siglo XX ha permitido romper la barrera de la limitación del cálculo manual, lo que hoy posibilita resolver grandes sistemas matriciales, inabarcables por medios manuales. Hoy todo es representable y calculable, lo que amplía a límites insospechados las libertades para el diseño espacial.

Hay que poner de manifiesto, que los fundamentos matemáticos empleados en los sistemas informáticos en la actualidad, son considerablemente más antiguos, ya que el Método de Cross, el antepasado del cálculo matricial de la rigidez y del cálculo matricial de la flexibilidad, se remonta a 1930. Además *“Los métodos matriciales de análisis son de una gran simplicidad y se podría decir que no han aportado grandes ideas conceptuales al análisis de estructuras. Son una evolución de las ideas de Maxwell y Mohr de finales del siglo XIX”*¹²².

El método matricial, en el que se fundamenta el cálculo actual de las estructuras, reduce el cálculo estructural a una resolución sistemática. Para la aplicación de éste son suficientes unos conocimientos básicos de álgebra, matrices y vectores. Este método y los medios digitales han transformado por completo la concepción de las estructuras, cambiando nuevamente el panorama arquitectónico, al igual que ocurrió en el siglo XIX con la adopción de los métodos científicos. La evolución arquitectónica está intrínsecamente ligada al cálculo numérico, desde el conocimiento de los entresijos resistentes de la materia, que dan pie a la realización de diferentes diseños fruto de la consciencia resistente. Este conocimiento, modifica las bases conceptuales de la proyectación con mayor rotundidad que cualquier consideración estilística. A lo largo de la historia, el hombre ha materializado los espacios que la técnica le ha permitido, pero el conocimiento numérico es el que hace factible el aprovechamiento del material y la definición de técnicas eficientes, capaces de superar las limitaciones espaciales autoimpuestas por nuestro propio desconocimiento. Si bien aún hoy queda un largo camino por recorrer, el

¹²² PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006, p. 6.

sendero transitado nos ha llevado hasta un punto en el que las limitaciones espaciales distan de las aplicables desde el punto de vista funcional y por lo tanto se suscitan nuevas problemáticas propias de nuestra contemporaneidad.

Hoy se hace imprescindible una puesta en cuestión de cuantos conocimientos y procesos reflexivos lleva asociada la actividad proyectual. Así desde la capacitación técnica y numérica, aparecen factores a interpretar en nuestra producción arquitectónica y en mayor medida en las arquitecturas de grandes luces, como medio límite en el que se producen los mayores cambios y se encuentra las claves de cada tiempo. Así hoy vemos como gran parte de las obras mediáticas recurren a este tipo de soluciones, algo que no resultaba tan patente hace tan solo unas décadas (Figura 68). Las estructuras de grandes luces son un símbolo de nuestra contemporaneidad, pero tienen un amplio recorrido desde sus orígenes que nos permite leerlas de una forma precisa. La alteración de la actividad del arquitecto, inferida por la incorporación de medios de cálculo complejos, para la realización de aquellas obras que hacen uso de las grandes luces, hacen hoy más que nunca, necesaria la colaboración entre el arquitecto y el ingeniero para alcanzar el mayor potencial de la obra. La importancia de esta relación se ve reflejada en que, en la inmensa mayoría de los proyectos de relevancia desarrollados en la actualidad, el arquitecto se encuentra respaldado por una ingeniería estructural. Este hecho no es algo reciente, sino una característica innata a aquella franja proyectual en la que esta relación simbiótica resulta vital.

Figura 68. Metropol Parasol de la Encarnación de Sevilla (España), obra del arquitecto Jürgen Mayer y los ingenieros Finnforest and Arup (2005-2011).

2.3. Exégesis. Influencia de la lectura de la obra en su concepción

El tema del grafismo y los medios de representación en la arquitectura han ido modificándose con el transcurso de los años, pero primeramente debemos ser conscientes de que un medio de representación tan universalmente aceptado como una planta de un edificio, es una compleja representación abstracta, imposible de ver de tal forma fuera del espacio bidimensional del papel, pero que tiene la clara justificación de instrumento de medición, para la realización de los elementos constructivos. Así todo obrero sabrá interpretarlo como elemento de referencia, para la materialización de la arquitectura. De por sí este documento es insuficiente, ya que nos desenvolvemos en un medio tridimensional y por lo tanto para definir la porción de éste, delimitada por la edificación, será necesario definir las alturas y por tanto un nuevo documento, las secciones, definiendo el vacío interior y la delimitación exterior.

La arquitectura es vacío delimitado por materia, que lo cualifica y diferencia del vacío circundante. Podría parecer que con estos documentos ya tenemos definida una edificación, pero faltaría un documento análogo a las secciones, pero dado de forma perimetral a la edificación, a éste lo denominamos alzado. En él se plasman las cualidades de la piel que limita el volumen edificado al exterior. Podemos resumir que la representación que se hace de la arquitectura, tanto en planta como sección y alzado, es un

Figura 69. Planta y sección de un Proyecto de biblioteca, enmarcado dentro de los proyectos de grandes luces.

medio gráfico en el que se plasma la realidad constructiva para establecer el diálogo con el constructor (Figura 69). En otras palabras *"Para el fin de saber ver la arquitectura, esto equivaldría aproximadamente a un método que, para ilustrar una pintura, diese las dimensiones del marco o calculase por separado las superficies de cada uno de los colores"*¹²³.

La representación arquitectónica en estos términos, se reduce a la transmisión de unos datos constructivos, volumétricos y decorativos, sumamente útiles, pero ineficaces para hacer entender el valor de la arquitectura por sí solos, incapaces de transmitir la potencia sensitiva del espacio generado, ya que la relevancia de la arquitectura reside precisamente ahí, en palabras de Bruno Zevi, *"todo lo que no tiene espacio interno, no es arquitectura"*¹²⁴. Precisamente en este punto es donde aparece un concepto expresado por los cubistas, la

¹²³ ZEVI, Bruno, *"Saber ver la arquitectura"*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 20 (Publicado originalmente como *"Saper vedere l'architettura"* en 1948).

¹²⁴ *Ibidem*, p. 26.

“cuarta dimensión”, el tiempo, como sucesión de movimientos que configuran un desplazamiento del ángulo visual, transmitiendo las distintas percepciones de las masa y vacío a través de un desplazamiento espacial. En este punto aparece de la fotografía, pero con un alcance sumamente limitado al representar únicamente uno de los infinitos puntos focales del desplazamiento espacial por el objeto arquitectónico. El descubrimiento de la cinematografía, resuelve este punto al disponer una sucesión de fotogramas (fotografías), que representan un desplazamiento, pasándolas a una velocidad que permite la transmisión del recorrido como una unidad, pudiendo revivir un camino realizado, como parte de una experiencia espacial concreta del espacio arquitectónico.

El arquitecto holandés Rem Koolhaas, pone de manifiesto la riqueza del entendimiento espacial que introduce la cinematografía para la representación del espíritu arquitectónico, que origina las formas y los espacios, como un ente vivo que habla con el paso del tiempo a través de sus paramentos. El documental Houselife¹²⁵ (Figura 70) muestra la Maison à Bordeaux (1998-2000) a través de la cotidianidad, una manera de habitar y sentir los espacios, de una forma cambiante y vital, con sus pros y sus contras, pasando desde la pureza formal y el reto espacial, hasta la cotidianidad y el desorden que en el día a día se puede presentar en el hogar. Demuestra que la casa no es una escenografía pura e inmaculada, sino un lienzo que los ocupantes modifican con el tiempo plasmando su presencia, al punto de complementarse ambos como una entidad dual. En este caso concreto la casa está diseñada como el complemento del propietario, que sufriendo una minusvalía desea que su nueva casa sea según sus palabras: *“yo no quiero una casa sencilla, quiero una casa compleja, porque la casa definirá mi mundo”*.

Figura 70. Koolhaas Houselife es un documental filmado y dirigido por Ila Bêka & Louise Lemoïne (2008). En este documento visual Rem Koolhaas plasma la vitalidad de la arquitectura como ente vivo, que cambia al son de sus habitantes.

Figura 71. Croquis de la Casa de Burdeos, en Burdeos (Francia), obra de Rem Koolhaas (1998-2000).

El dibujo siempre va de la mano del proceso mental de conformación del proyecto, por eso mismo desde tiempos remotos el croquis ha formado parte del procedimiento creativo. En el caso de la Maison à Bordeaux (Figura 71) las ideas organizadoras del proyecto quedan

¹²⁵ El documental “koolhaas houselife”, está producido en Italia por Ila Bêka & Loise Lemoïne en 2008.

claramente patentes, desde la interpretación espacial, al reto estructural que marca toda la obra. En la mente del arquitecto se conjugan al unísono la multiplicidad de factores que intervienen en la conformación del proyecto, un modelo mental, que paulatinamente se materializa en el papel, mediante croquis y planos, realizando tradicionalmente un ensayo tridimensional de la propuesta mediante las maquetas, percibiendo un atisbo de la imagen final de la propuesta. Este proceso hoy ha cambiado de manera radical con la incorporación de los medios digitales de representación en el proceso creativo, no solo facilitando la confección de multitud de planos, que definen con total precisión la propuesta, sino de forma aún más relevante, mediante la aparición de la representación tridimensional. La incorporación de modelos 3D, permiten realizar de forma precisa mediciones, calcular de forma global la estructura..., pero por lo que atañe al punto que se trata, permite confeccionar imágenes cercanas a la realidad de la propuesta construida, lo que posibilita ensayar el proyecto, trabajando, no con conceptos etéreos, sino con realidades virtuales. Si bien esta forma de actuar hace previsible un mayor control sobre el proceso creativo y un mayor acercamiento previo a la solución definitiva, en gran medida ha transformado la forma de proyectar y por tanto el resultado final. En este punto se puede diferenciar entre la concepción tradicional o analógica y la actual o concepción virtual. Esta última es la metodología contemporánea de la proyección arquitectónica y por ende sobre la que se basan los actuales avances que condicionarán la actividad del sector a lo largo de las próximas décadas. En este contexto los medios de impresión 3D (Figura 72) traducen los modelos virtuales tridimensionales en un elemento tangible, cercano a las tradicionales maquetas, aunque con la precisión que otorga la confección digital de los mismos (Figura 73). Como ya se ha reiterado con anterioridad, estos medios de impresión están sufriendo un rápido progreso, que en pocos años podría llegar a transformar no solo el proceso creativo, sino la totalidad del ámbito constructivo, como medio de industrialización global del proceso edificatorio.

Pero antes de sumergirse en el ámbito de la contemporaneidad digital es necesario ser conocedores de nuestro pasado. Para entender la evolución histórica que nos

Figura 72. Modelo de impresora 3D, para la realización de modelos de reducidas dimensiones.

Figura 73. Maqueta realizada mediante impresora 3D del proyecto Jellyfish House, para Treasure Island (Estados Unidos), obra de Iwamoto Scott Architecture (2007).

ha conducido hasta el panorama actual, es necesario estudiar las obras del pasado. Para ello, disponemos tanto del conocimiento directo de las obras que han llegado hasta nuestros días, como de la documentación existente al respecto, sean: planos, tratados, pinturas, fotografías.... Determinando con ello la procedencia de las distintas concepciones espaciales, medios técnicos y soluciones tipológicas. Por ello todo el análisis historio-crítico debe reflejar una serie de factores que influyen en los acontecimientos:

- Los factores sociales: como son la situación económica de un país o del grupo de personas que lo promueven, las costumbres del lugar y relaciones entre los individuos, además de otras circunstancias.
- Los factores intelectuales: estos incorporan además de las aspiraciones sociales y religiosas, los sueños, tanto de la colectividad, como de los individuos.
- Los factores técnicos: los avances que se producen en la técnica, la industria, los materiales, la mano de obra... Este es el campo en torno al que se centra mayormente la presente tesis, ya que los medios técnicos que se encuentran disponibles en cada momento, son los que establecen los límites a los que el hombre puede llegar, estableciendo el marco de lo posible.
- El mundo figurativo y estético: es importante el conocimiento de la ornamentación correspondiente a cada momento histórico, ya que de él depende en gran medida la aceptación por parte de los usuarios de una determinada solución, además de constituir un medio de expresión, ligado a un sentimiento plástico concreto.
- Análisis urbanístico: la arquitectura no solo son los espacios delimitados en el interior de las edificaciones, sino los espacios definidos exteriormente por las mismas, como acción del hombre de transformar el vacío exterior, adaptándolo a las actividades que requiere la sociedad, no debiendo ser éste nunca un elemento residual e irreflexivo.
- Análisis arquitectónico: la principal virtud de la arquitectura es la de transformar el vacío para configurar espacios adaptados a los usos, por tanto este análisis ha de centrarse en la concepción espacial de los mismos, como humanización del entorno.
- Análisis volumétrico: las edificaciones al generar espacios internos, definen una capa que delimita ese espacio, configurando una expresión al exterior, que es, imagen y lectura de la obra arquitectónica. Esta interpretación volumétrica ha conducido a formas de pensar y concebir los proyectos, así como a una lectura universal de toda obra erigida.
- Análisis de los elementos decorativos: los espacios pueden venir acompañados de pinturas y esculturas asociadas. Estos elementos acompañan a la obra, como un traje, que lo encuadra en un marco temporal concreto, haciéndola más bella o socialmente aceptable dentro del marco social. Precisamente este factor ha sido el empleado para estructurar clásicamente el análisis histórico de la arquitectura, hablando de estilos, movimientos... que han condicionado la producción de la arquitectura a lo largo de su extenso recorrido.

- Análisis de la escala: son las relaciones dimensionales del edificio respecto al parámetro humano, ya que el hombre como centro del interés de la obra, es el referente para sus proporciones. Por eso, cuando se emplean por ejemplo ordenes gigantes, se habla de conceptos superiores a la propia presencia del hombre, aunque éste continúe estando como referente.

Todos estos factores nos permiten entender los parámetros en los que se desarrolla la obra¹²⁶ y por tanto acercarnos, en los márgenes de lo posible, al proceso creativo que dio lugar a la obra arquitectónica. En definitiva, el entendimiento del marco en el cual se produjo el proyecto, ya que las limitaciones técnicas marcan los márgenes de lo realizable, mientras el panorama socioeconómico y cultural, definen los parámetros según los cuales se desarrolla el proceso creativo.

A la hora de la crítica de la arquitectura, siempre hay una división entre el análisis personal como *“expresión de lo individual”* y una visión más global, como *“una expresión de una idea impersonal y universal”*. Además la crítica arquitectónica no la encontramos siempre realizada por los propios arquitectos, sino por historiadores, filósofos, estetas... ejemplo de ello sería el filósofo Focillon cuando llega en sus escritos a la conclusión *“el constructor no encierra un vacío, sino una determinada morada de las formas, y, trabajando sobre el espacio, lo modela por fuera y por dentro como un escultor”*¹²⁷.

Anteriormente se ha realizado un análisis histórico, enfocado en el desarrollo de las grandes luces a lo largo de los dos últimos siglos, lo que resulta útil y legítimo, al mostrar los aspectos sustanciales que han llevado a la consecución de avances y descubrimientos que han conducido al estado actual de la arquitectura y que por tanto es imprescindible comprender. Este conocimiento permite establecer unas bases conceptuales, para el entendimiento del panorama arquitectónico actual, así como para encarar el futuro, con una mirada comprensiva. Así los nuevos avances que llegarán, han de entenderse como parte de una línea de investigación enraizada en el pasado. Desde el conocimiento de nuestro pasado, podemos encarar el estudio de nuestro presente y establecer las bases para nuestro futuro. En palabras de Bruno Zevi *“La arquitectura es el aspecto visual de la historia”*¹²⁸.

La arquitectura como aspecto visual de la historia y medio de expresión espacial, se constituye como un reflejo del marco concreto en el que se produce. Este hecho, de forma bidireccional, nos permite, tanto entender los condicionantes que envolvieron la concepción de las edificaciones, como las circunstancias que justifican su aparición. Así hoy las estructuras laminares se conciben como alarde espacial, empleando formas que en otros tiempos

¹²⁶ Según los criterios aquí expuestos, se ha desarrollado el análisis histórico que ha precedido el presente capítulo, en un intento de comprender el sendero evolutivo que nos ha conducido hasta el panorama actual, cuya comprensión nos atañe, para entender el papel de los proyectos de grandes luces en el panorama actual.

¹²⁷ ZEVI, Bruno, *“Saber ver la arquitectura”*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 110 (Publicado originalmente como *“Saper vedere l'architettura”* en 1948).

¹²⁸ *Ibidem*, p. 114.

resultarían inabarcables. Al tiempo este tipo de soluciones se concibieron como medio económico de cubrición de espacios de grandes luces, mientras que en la actualidad suponen un sobre coste considerable, principalmente a causa de la gran mano de obra necesaria para su construcción. A la hora del análisis de los parámetros que condicionan la producción arquitectónica, es imprescindible diferenciar entre varios ámbitos. La suma de las visiones parciales que otorgan cada uno de estos ámbitos, nos da buena cuenta del caldo de cultivo en el que se desarrolla la producción arquitectónica. Este hecho permite encontrar justificación, tanto a los intensos periodos de avance técnico, como aquellos en los que estos se traducen en un amento de las capacidades de conformación espacial, transformando la visión que el hombre tiene de su medio físico y de los límites implícitos a su producción. Claro ejemplo de ello lo vemos en los avances acontecidos en el ámbito de la industria militar durante el periodo de la Segunda Guerra Mundial, que darán lugar a la producción de los periscopios de submarinos, parabrisas, cubiertas y torretas para aviones, realizadas en metacrilato¹²⁹, lo que con posterioridad, permitiría su aplicación en otros ámbitos (Figura 74), entre ellos la arquitectura.

Figura 74. Plexiglas Deluxe Six Ghost Car (1939), este coche de la marca Pontiac resuelto en plexiglás fue presentado en Expo Mundial de Nueva York (1940). Su carrocería transparente en un 93%, fue diseñada por Norman Bel Geddes.

Cada obra arquitectónica podemos enmarcarla desde varios puntos de vista claramente diferenciados, que en conjunto permiten confeccionar una visión fidedigna de los condicionantes

¹²⁹ Los orígenes del metacrilato (polimetacrilato de metilo) los encontramos en el siglo XIX, cuando en 1865 se formula el ácido metacrílico, un derivado del ácido acrílico. De la reacción entre el ácido metacrílico y el metanol surge el metacrilato de metilo. En 1877 Fittig y Paul, dos químicos alemanes, desarrollaron el proceso de polimerización que transforma el metacrilato de metilo en polimetacrilato de metilo.

Ya en 1933 Otto Röhm patenta y registra este producto bajo la marca Plexiglas, comenzando por primera vez su producción a gran escala. Durante el periodo de la Segunda Guerra Mundial este material salió a relucir por sus capacidades, como su alta resistencia al impacto, 10 veces superior a la del vidrio, que hacían aconsejable su uso en ámbitos como los periscopios de submarinos, parabrisas, cubiertas y torretas para aviones, ya que podía sustituir al vidrio y resultaba más flexible y su rotura menos problemática. Así, durante la guerra, se extiende su uso, trasladándose con posterioridad a otros ámbitos, donde resulta ventajoso su empleo, abarcando desde la industria, hasta el hogar.

Este material puede presentarse de múltiples formas, desde planchas, con las que posteriormente trabajar, a tubos, varillas o elementos producidos mediante inyección o extrusión, con formas más complejas. Así mismo sus presentaciones varían desde el color, hasta su transparencia y tacto, pero la característica que mantiene en cualquier presentación es su gran rigidez y resistencia, que lo han convertido en un material tan versátil. Hoy en día, con este material se logran formular, resinas, pastas, gránulos, adhesivos, emulsiones...

En el ámbito arquitectónico, uno de los materiales más empleados basados en el polimetacrilato de metilo es el "*plexiglás*" o vidrio acrílico. Este material se produce por vez primera en España a finales de la década de los 50 en la fábrica de Vitroflex, empleando tecnología importada de Alemania.

proyectuales. El mundo cambia según la visión de cada generación que la observa y esta visión a su vez, está condicionada por factores sociológicos, tecnológicos, ideológicos... Así dichos factores pueden organizarse en varios bloques:

- Política: este aspecto es considerado en casi cualquier documento de historia de la arquitectura, por la dependencia existente entre arquitectura y acontecimientos políticos. Un claro ejemplo de ello lo podemos encontrar cuando en 1933 los Nazis alcanzan el poder en Alemania, marcando el fin del Bauhaus, emigrando consiguientemente los arquitectos modernos alemanes a Inglaterra, de ahí que Gropius y Mendelsohn impulsaran que en este país se desarrollara el movimiento funcionalista.

Al igual que los acontecimientos políticos ejercen una repercusión sobre la producción arquitectónica, hay obras que tras su realización se transforman en símbolos, quedando consciente o inconscientemente enlazados con los sucesos políticos que se produjeron de forma coetánea. Ejemplo de ello es el edificio de la sede de la ONU en Nueva York (Figura 75), una obra realizada por Le Corbusier tras la Segunda Guerra Mundial¹³⁰, como lugar de encuentro de políticos de todo el mundo. Una arquitectura que hoy se ha convertido en símbolo de paz y de un orden global de la humanidad. En este caso concreto, la simbología se encuentra patente en el origen del proyecto, como medio unificador de visiones tan distintas como las que se originan en los diversos puntos del

Figura 75. Sede de la ONU en Nueva York (Estados Unidos), Obra de Le Corbusier, Oscar Niemeyer y Wallace K. Harrison (1949-1952).

¹³⁰ Las Naciones Unidas (ONU) se fundó en 1945 al finalizar la Segunda Guerra Mundial, tras la firma por parte de 51 países de la Carta de las Naciones Unidas. La sede de la ONU fue erigida por Le Corbusier entre 1949 y 1952.

*“Estilo internacional”*¹³¹. La estética empleada, ajena al ornamento según su interpretación clásica, resulta válida en cualquier lugar sin conflictos culturales, lo que le permite conformarse como símbolo de unidad y de un ente que está más allá de los regionalismos.

Casi cualquier régimen político a lo largo de la historia ha llevado asociado un entendimiento estético y espacial de la arquitectura. En la Alemania nazi la arquitectura se empleó como medio de enaltecimiento del régimen, apareciendo fastuosos proyectos como el Welthauptstadt Germania (Figura 76), una ambiciosa reforma de Berlín planeada por Albert Speer (1905-1981), inspector general de los edificios de la capital del Reich. Este proyecto no se llevó a término pero da fe de la relevancia de la arquitectura como medio de expresión espacial y social, intrínsecamente ligado con la política. La arquitectura hasta recientes fechas, se concebía inexorablemente como un ente hecho para durar más allá de la vida del hombre y por consiguiente como símbolo de estabilidad, lo que ha favorecido su empleo como emblema de grandeza y eternidad. Este deseo de permanencia queda patente cuando Adolf Hitler pronuncia en 1939 un discurso en el Reichstag, haciendo alusión al *“Reich de mil años”*¹³², grandeza a través de la permanencia en el tiempo, algo intrínsecamente ligado a la producción arquitectónica. Así mismo, como ya se ha hecho mención, la arquitectura es un lienzo,

Figura 76. Proyecto del Volkshalle, Große Halle o Ruhmeshalle de Welthauptstadt Germania o Berlín (Alemania), obra de Albert Speer. Este proyecto contemplaba la realización de una cúpula de 250 metros de diámetro, remodelando el proyecto las bases de Berlín para levantar una nueva ciudad.

¹³¹ Se denomina *“Estilo internacional”* al conjunto de obras arquitectónicas que emplean los fundamentos estéticos del Movimiento Moderno y en menor medida funcionalistas. Se caracteriza por el empleo de una estética purista, ajena al tradicional uso del ornamento, intrínsecamente ligado con los regionalismos, este hecho es el que ha conducido a su denominación como *“Estilo internacional”*.

¹³² Discurso pronunciado por Adolf Hitler en el Reichstag, el 28 de abril de 1939, en respuesta al telegrama del Presidente Roosevelt.

que lleva asociado un lenguaje, principalmente representado por el ornamento. Por esta razón la arquitectura nazi emplea un estilo neoclásico y art déco.

Los nexos establecidos entre la arquitectura y la política van más allá de la asociación, representando un tiempo, lo que con perspectiva convierte a las ciudades en reflejo de periodos pasados y auténticos “libros” del conocimiento histórico. Las asociaciones pueden ser positivas o peyorativas, pero ajenos a dichas valoraciones, son fiel reflejo de cuanto ha acontecido y una invaluable muestra del conocimiento del hombre a lo largo de los siglos.

El hecho de ser conscientes de este valioso papel de la arquitectura, como símbolo de un momento concreto, permite encarar la realidad constructiva, con la convicción de que, toda obra tienen una lectura en tales términos, encuadrando el paso del tiempo la obra, como parte de los volúmenes históricos que son las urbes. Las grandes luces, generalmente van asociadas a obras de una escala suficiente como para poder adquirir un simbolismo dentro de la trama urbana¹³³, teniendo en cuenta este tipo de consideraciones durante el proceso creativo. Así mismo en la actualidad, el ornamento cargado de significación, ha dado paso a la espacialidad cargada de significación, por lo que las herramientas de diseño espacial asociadas a las grandes luces se han constituido como una de las principales líneas de actuación, en aquellas obras que desean establecerse como elemento icónico o representativo en el marco social.

- Filosófico-religiosa: la arquitectura como aspecto visual de la historia, representa las creencias e ideales de quienes las promovieron. Por eso estas influencias son de gran relevancia y especialmente en edificios de carácter religioso. Aunque esta relación, puede producirse igualmente por una separación de la religiosidad, como ocurre en el neo-platonismo, que muestra una visión filosófica, distanciada de los aspectos religiosos. Un claro ejemplo de ello lo expone Zevi cuando dice que “*si el Renacimiento quiere decir laicismo o protestantismo, es natural que la Iglesia de Roma se rebele y estimule la arquitectura barroca con su fasto antitético al rigor humanista*”¹³⁴. Así la producción arquitectónica se puede concebir en sí misma como la representación de un símbolo.

El esfuerzo de expresión ideológica de la arquitectura, ha sido uno de los puntos más fructuosos a lo largo de toda la historia del hombre, ya sea como muestra ante un poder superior o la conformación de un lugar de culto a éste. En el Antiguo Egipto, los dos materiales predominantemente empleados en edificación eran la roca y el adobe¹³⁵. El

¹³³ La escala de la obra no tiene una relación con el simbolismo o la interpretación icónica, pero pese a ello, las obras de mayor entidad, con suma frecuencia tienen en consideración este tipo de aspectos, en parte por su considerable impacto dentro del conjunto.

¹³⁴ ZEVI, Bruno, “*Saber ver la arquitectura*”, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 115 (Publicado originalmente como “*Saper vedere l'architettura*” en 1948).

¹³⁵ Recientes estudios realizados por Guy Demortier en la Facultad Universitaria de Notre-Dame de la Paix, ponen de manifiesto el uso de hormigón en la construcción de la Gran Pirámide de Guiza, ordenada construir por el faraón Keops, de la cuarta dinastía y construida por el arquitecto Hemiunu

empleo de la piedra caliza era símbolo de permanencia y poder, por lo que su uso generalmente se restringía a tumbas y templos, ambas edificaciones dedicadas a interceder ante los dioses, mediante la ofrenda o la palabra. El resto de edificaciones, desde viviendas, a palacios y fortalezas, se construyeron empleando ladrillos de adobe, por lo que los vestigios de éstas, raramente han perdurado hasta nuestros días, mientras que templos y tumbas permanecen aún en pie, como muestra de la devoción de un pueblo y vademécum de la historia de una civilización. En sus templos se plasman pasajes de su historia y su mitología (Figura 77), concibiendo la arquitectura como un volumen “eterno”, más valioso que las fugaces vidas de los hombres, que viajaban hacia la eternidad del más allá. El factor temporal establece un nexo entre la construcción en piedra y la divinidad, alejando de esta percepción materiales como el adobe, cuya existencia más limitada lo relaciona con la vida de los hombres y por consiguiente, el apropiado para confeccionar los espacios en los que se desarrolla su existencia.

Figura 77. Bajorrelieve de la tumba de Rejmira, conocido como “Instrucciones de Rejmira”, (la tumba TT100 de la necrópolis tebana de Abd el-Qurna, frente a Luxor, Egipto), uno de los primeros documentos constructivos que se conservan. Tradicionalmente se ha interpretado como representación de la fabricación de adobe, aunque hoy hay investigadores que barajan otras posibilidades.

entorno al 2570 a.C.. Esta pirámide, contrariamente a la creencia generalizada, no está formada de grandes bloques de piedra tallada, subidos hasta su posición mediante rampas, sino que están realizadas en hormigón. Estas afirmaciones están demostradas por análisis realizados a los materiales, como: la estructura interna del material, cantidad de humedad, análisis químicos, ph, estratigrafía, erosión...

Los resultados de sus análisis se encuentran publicados en el artículo:

DEMORTIER, Guy, “PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza”, Bélgica, Laboratoire d’Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, 2004.

Si en el Antiguo Egipto este factor determinó una distinción categórica de los materiales y un esfuerzo ímprobo en la producción arquitectónica relacionada, en épocas más recientes encontramos el cristianismo, que partiendo de la tipología de la basílica romana, organizan un espacio dedicado a la oración. Desde el funcionalismo inicial, con el tiempo, se fue produciendo una ampliación de los espacios y formas más complejas, que introdujeron un iconismo a la obra y una función psicológica que enlazaba la grandeza y el sobrecogimiento espacial de la obra arquitectónica, con la fe y la grandeza de dios. Este hecho condujo a la ampliación de las luces empleadas y con ello a la búsqueda de los límites dimensionales de lo técnicamente construible.

Si avanzamos en el tiempo, llegamos a la arquitectura gótica, donde la producción arquitectónica eclesiástica vio su florecer constructivo, cimentada en la racionalidad constructiva. Se produce un afinamiento de los elementos estructurales, cuyas secciones se determinan con precisión, enfocadas a la resolución del esquema resistente (Figura 78). Frente a los arcos Romanos, claramente sobredimensionados, aptos para la sustentación de múltiples esquemas de cargas, se presenta la arquitectura gótica como ejercicio de racionalidad y economía constructiva, disponiendo el material estrictamente necesario, allí donde la sustentación del esquema de cargas concreto a resistir lo exigía. Esto permite la apertura de grandes ventanales en los paramentos, al reducir la estructura al mínimo. Este racionalismo constructivo, permitía emplear casi dos veces y media menos material (piedra) que un edificio romano que cubriera luces similares. Esta construcción resultaba además más sencilla, empleando a su vez sillares de menores dimensiones, más fáciles de transportar que los empleados en el Románico.

Surgida de la austeridad de medios, de un periodo como la edad media, la arquitectura gótica optimiza la construcción y amplía los márgenes espaciales, lo que hace posible un mayor impacto de las catedrales, convertidas en símbolos de la divinidad y la grandeza de las urbes que las erigían. En este panorama marcado por la austeridad de medios, surge una rama religiosa del cristianismo, la orden del Cister, que hace alarde de dicha austeridad. San Bernardo dice en su *“Gran exordio del Cister”*: *“sabed que hay tres cosas que ofenden particularmente los ojos de la soberana majestad, las heredades de tierras demasiado multiplicadas, el lujo en los edificios; y finalmente, la búsqueda de alojamiento en el canto*

Figura 78. Sección de la catedral de Beauvais (Francia), construida entre 1225 y 1272. Esta obra se caracteriza por los 48 metros de altura de su nave central.

*sagrado*¹³⁶. Desde este ideal religioso se establecen las bases de una arquitectura y forma de vida, que permanecerán durante siglos, afinando la técnica con experiencia de las construcciones anteriores, hasta que la resistencia del material era llevada al límite, marcando éste para que las posteriores no alcanzaran el punto de la rotura.

En estas construcciones, las bóvedas ya no aparecen como elemento de cubierta, sino meramente como una protección al fuego, para la estructura superior de madera, similar a la empleada en las basílicas romanas, siguiendo el esquema de cercha. Así el elemento de piedra solo debe de soportarse a sí mismo y por tanto los empujes horizontales, son menores, reduciendo la entidad de los elementos constructivos. Los empujes horizontales de las bóvedas son trasladados al terreno mediante arbotantes o los arcos de las naves laterales, que trasladan las cargas al terreno, siguiendo una trayectoria próxima al antifunicular de las cargas. Este hecho conlleva una optimización de los elementos estructurales, que trabajan prácticamente de forma exclusiva a compresión. Por un razonamiento similar se emplean los arcos apuntados, ya que reducen la componente horizontal en los apoyos y por tanto buena parte de la problemática comentada, minorando el gasto de material requerido. La arquitectura gótica encuentra su significación en la optimización de la forma y el aprovechamiento de los recursos, en obras que buscan un alarde espacial basado en sus proporciones, con escalas superiores a la del hombre, claramente relacionadas con la divinidad a las que están dedicadas.

En este momento no se disponía de sistemas de cálculo, que permitiera un estudio numérico de las estructuras, pero los constructores góticos sabían que las bases se encontraban en la geometría y que es la forma, la que nos permite garantizar el equilibrio estructural. Con estos medios, se fueron estableciendo con el paso de los años, una serie de reglas a emplear como apoyo para el desarrollo del diseño de las estructuras góticas. A este respecto, podemos destacar una figura de especial relevancia en el panorama de la época y de gran valor para el conocimiento de las estructuras góticas y sus procesos de diseño, Rodrigo Gil de Hontañón (1500-1577). Éste, escribió el conjunto de normas de las construcciones góticas más completo que se ha conservado hasta nuestros días. Este autor asume ya un nuevo vocabulario, propio del renacimiento, al encontrarse en un momento de transición entre un gótico tardío y un incipiente renacimiento. El manuscrito, formula de forma sistemática cada uno de los aspectos particulares de una iglesia gótica¹³⁷, diferenciando estas normas en dos grupos:

- Práctica: estas normas servían de base para el diseño de los elementos estructurales de una iglesia gótica.

¹³⁶ MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las Estructuras Antiguas o cuando las estructuras no se calculaban”*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011, p. 112

¹³⁷ La mayor parte de este documento se centra en las bóvedas baídas, que tienen forma de cúpulas, entre costillas muy cercanas, con forma semicircular. Un ejemplo de éstas lo podemos encontrar en la Iglesia de Villacastín en las cercanías de Madrid.

- Investigación: éstas establecían un punto de partida para la realización de análisis y estudios de los contrafuertes y arcos renacentistas.

El conocimiento expuesto por Rodrigo Gil de Hontañón, tiene valor en cuanto al cierre de un periodo y recopilación de cuanto había hasta ese punto. A lo largo de todo el gótico las bases de conocimiento de que se disponían, eran una serie de registros de formas estables, basadas en unas normas de proporcionalidad, aplicables en la mayor parte de los casos y hasta unas determinadas dimensiones máximas, que la práctica había dictado como límites, a los que se podía llegar sin colapsar. No será hasta Galileo, cuando se establezcan unas bases de diseño no proporcionales, que tuvieran en cuenta el aumento al cuadrado de las superficies y el cubico de las cargas, que invalidaban los procedimientos anteriores de proporcionalidad directa y daban explicación a los límites que el anterior método no justificaba, pero tenía en cuenta¹³⁸.

La ciencia de la estática no estaba aún suficientemente desarrollada durante la Edad Media y habría que esperar hasta el siglo XVII para que personajes como Galileo y Hooke, establecieran la teoría necesaria para el cálculo, aunque haría falta casi un siglo para que estos nuevos medios se implantaran, iniciándose su uso en el siglo XVIII, pasándose de un conocimiento resistente empírico, a uno científico.

Los maestros góticos tenían una ciencia y teoría, compendio de conocimientos que les permitían diseñar y construir estructuras seguras. Estas normas y procedimientos, se basaban en una observación empírica de los edificios existentes, aprendiendo tanto de los éxitos, como mayormente de los fracasos que culminaban con el derrumbe. Así el análisis de estructuras colapsadas, se establece como la principal fuente de conocimientos en cuanto a los límites a la proporcionalidad y a la eficiencia de las bases geométricas de diseño¹³⁹. Con el paso de años y siglos, estas bases resultaron tan fiables, que siguiéndolas raramente no se culminaba el edificio con éxito. Hoy podemos ver en muchas de las ruinas, que la causa del colapso era que el grosor de las costillas de las bóvedas de crucería, resultaban excesivamente grandes y pesadas para lo que se podía resistir.

¹³⁸ Precisamente muchas reglas de las presentes en los escritos de Rodrigo Gil de Hontañón, tienen en cuenta esta no proporcionalidad, aunque las consideraciones tomadas aún sean un tanto incorrectas y sin sentido.

¹³⁹ Así en palabras de Rodrigo Gil de Hontañón, podemos ver el condicionamiento existente en la arquitectura gótica, a falta de medios de cálculo apropiados:

“¿Cómo sabemos que tanto es suficiente para un contrafuerte?, la respuesta es, que es necesario mucho, pero no se le da una razón”. (Referencia del artículo de Santiago Huerta Fernández, “Geometry and equilibrium: The gothic theory of structural design”).

Por “razón” se refiere a respuesta científica y de orden capaz de justificar lo que la práctica definía como cierto. Este es un claro ejemplo de la relevancia de los medios de cálculo en el proceso evolutivo de la arquitectura que nos ha conducido hasta nuestros días.

Para poder comprender esta arquitectura hoy, solo disponemos de los edificios que han subsistido y de algunos escritos y tratados de construcción¹⁴⁰ que servían para difundir las bases del diseño que hemos comentado. Las normas que se emplearán posteriormente en el renacimiento son mucho más conservadoras que las góticas, aunque algunas de estas normas góticas, sobrevivieron a través del renacimiento llegando incluso al barroco¹⁴¹.

Ninguna obra gótica logra superar la luz alcanzada en el Panteón, pero resulta sumamente interesante como una situación de carencia y de mínimos, junto con la difusión que puede producir un ideario como el de la orden del Cister, permite optimizar la técnica, llevándola hasta el límite de lo posible y las capacidades del material.

Lo que debemos aprender de este periodo, es la relevancia de la forma de las estructuras en su manera de trabajar, plasmando los conocimientos y métodos de construcción, para que aquellos que llegaran después, basados en sus experiencias, no cometieran los errores del pasado y obtuvieran la seguridad necesaria para la realización en obras del calibre de las catedrales góticas, en las que no cabe atisbo de duda a la hora de su realización. Así desde una iniciativa religiosa se llega a una revolución arquitectónica que cambiaría para siempre la forma de ver las estructuras. La arquitectura religiosa ha marcado un hito dentro de la cultura occidental, estando tan intrínsecamente ligada a su historia, que ambos discursos resultan indisolubles.

La arquitectura religiosa resulta vital para la comprensión de la historia de la construcción, ensayándose en ésta precisamente técnicas y retándose las limitaciones espaciales. Así un intento de crear un espacio a la altura de unas creencias, eleva en sí mismo la espacialidad del hombre y abre nuevos horizontes a la producción arquitectónica. La religiosidad y su papel en la sociedad se han modificado con los años, pero su papel es vital para el entendimiento de gran parte de la producción del hombre.

¹⁴⁰ Algunos de los principales tratadistas relativos a la arquitectura gótica son: Villard de Honnecourt, *Werkmeisterbücher* y Lechler. Villard de Honnecourt, vivió en la época de la construcción de las grandes catedrales góticas, hablando de cuestiones estructurales, ya redactadas en otros tratados de la época. Algunas de estas cuestiones explicadas, eran la obtención de los tamaños de los contrafuertes o las secciones transversales de las costillas de la bóveda. Estas reglas, eran simplemente un registro de las dimensiones adecuadas para diferentes elementos estructurales. Por su parte *Werkmeisterbücher* vivió en el siglo XV, en Alemania, cuando se desarrollaba un gótico tardío, recopilando todas las bases de diseño para una iglesia. Por último Lechler redactó unas instrucciones para el diseño de contrafuertes, bóvedas y torres.

¹⁴¹ Las principales reglas básicas que se conservan de la arquitectura gótica, en la realización de obras renacentistas y barrocas son:

- La obtención de contrafuertes para una bóveda de crucería con el perfil de los arcos transversales, esta regla fue publicada por primera vez por Derand en 1643, en su obra *Architecture des Voûtes*.
- El método para la obtención de las dimensiones de arcos simples y pilares, presente en el tratado de Herman Ruiz el Joven, un arquitecto español del siglo XVI.

Aún en aquellas obras que hacen gala de un laicismo o despegue de este tipo de consideraciones, pueden existir referencias, así como una influencia en la concepción espacial. Las obras enmarcadas en la producción de grandes luces, ven en esta rama de la arquitectura algunas de sus raíces y por eso mismo es necesario considerar su papel como referente y como germen de algunas arquitecturas.

Hoy desde un aparente laicismo de buena parte de la sociedad, se pueden analizar estas obras con perspectiva, apreciando el indudable factor de las religiones en el entendimiento espacial de la arquitectura y las tipologías empleadas. Siendo más patente si cabe dentro del ámbito de las grandes luces, que más allá de los factores meramente funcionales suele buscar la representación de una entidad, unos ideales o un entendimiento de lo que debería ser el entorno del hombre.

En la actualidad, dado que la representatividad de este tipo de edificaciones se ha visto eclipsada por innumerables obras, tales como aeropuertos, estadios deportivos, sedes empresariales... que buscan su resolución y representación a través de herramientas de diseño espacial asociadas a las grandes luces (Figura 79), su influencia dentro del conjunto se ha visto mermada. Pese a este hecho, la influencia de factores religiosos y filosóficos afecta tanto a las edificaciones destinadas a tal uso, como a cualquier otra, por el simple hecho de materializarse en un marco cultural concreto, apareciendo consideraciones particulares, que tiñen las obras y las otorgan una particularidad, que podría asociarse con los bien llamados *“regionalismos”*, aunque estos atiendan a consideraciones más amplias y complejas. En definitiva el entendimiento de la obra se constituye como lectura compleja de la sociedad y las creencias de que hacen gala.

Figura 79. Parking del Aeropuerto de Leipzig/Halle, Leipzig (Alemania), obra del estudio de arquitectura AP Brunnert y el estudio de ingeniería Schlaich Bergermann und Partner (2000). Este edificio tiene 5 vanos de 62,70 metros y un voladizo de 22 metros, que liberan la cota del terreno, gracias a dos grandes vigas de 6 plantas de canto.

- Científica: existe un claro paralelismo entre las concepciones matemáticas y geométricas y el pensamiento arquitectónico, como resulta evidente en los medios de medida y representación, a lo que hay que sumar los avances asociados, que permiten el progreso de la técnica y el cálculo de soluciones estructurales, haciendo factible su resolución.

Anteriormente se ha realizado un recorrido por los dos últimos siglos, en un intento de comprender los entresijos que nos han permitido alcanzar el estadio arquitectónico actual. Para ello, como se ha podido ver, unos de los principales factores ha sido la técnica y el conocimiento matemático. Así estos condicionantes resultan los de mayor importancia para la comprensión de la producción arquitectónica, ya que cuando en otros hablamos de oportunidad, en este caso hablamos de capacidad. El parámetro técnico es el que define las limitaciones a la producción arquitectónica del hombre, si bien es cierto que ésta a su vez depende del marco socio-económico, político, religioso... que posibilitan los términos de su aparición y desarrollo.

En el punto anterior se ha hecho mención a la importancia de la geometría, durante la mayor parte de la historia, para la confección de reglas de diseño que permitieran la construcción de grandes obras dentro de márgenes seguros. Se empleó la geometría como medio de expresión del conocimiento empírico de las estructuras. Solo durante los dos últimos siglos, esta herramienta se ve relegada a un segundo plano cuando aparecen los medios de cálculo que posibilitan el dimensionado previo de los elementos constructivos. Así el gran salto conceptual y cualitativo de la arquitectura, acontece cuando se pasa de un conocimiento de las estructuras empírico a uno científico. Este hecho indudablemente transforma la concepción proyectual, al poder establecer un dimensionado previo de los elementos constructivos, consciente de los límites y de la validez de la solución adoptada antes de la ejecución de ésta. Ya el conocimiento no se cimenta en los colapsos previos sino en la ciencia de materiales.

El viaje en paralelo de arquitectura y conocimiento estructural ha condicionado durante más de dos siglos la producción de ésta, primeramente permitiendo la realización de estructuras hasta entonces imposibles, al tiempo que limitando la producción arquitectónica a los márgenes de lo calculable. A este respecto, durante un largo periodo el hombre estuvo limitado a la realización de esquemas isostáticos, como los característicos arcos triarticulados que definen los proyectos de grandes luces del siglo XIX en estaciones de ferrocarril. Ante la limitación de los medios de cálculo se buscan simplificaciones formales que permitan esquemas abarcables con los recursos disponibles.

Durante la primera mitad del siglo XX las estructura laminares de hormigón vieron su apogeo como medio económico y bello para cubrir grandes espacios con una cantidad de material mínima. Su funcionamiento se basaba en la indeformabilidad de la cubierta, al emplear superficies de doble curvatura. La problemática proyectual residía en las formas a emplear que, tanto por una cuestión matemática, como constructiva, se veían limitadas a las superficies regladas, como: la bóveda de arco parabólico, la bóveda de cañón de arco rebajado, el cascarón de generatriz elíptica, la bóveda formada por la unión reglada de una recta y un arco parabólico, la lámina reglada con directriz catenaria

y el paraboloides hiperbólico¹⁴². Este condicionamiento formal limitó en gran medida los diseños ejecutables, aunque como se puede ver en la obra de Félix Candela Outeriño (1910-1997) la variedad de obras resueltas demuestra sus grandes virtudes (Figura 80).

Habría que esperar hasta las últimas décadas del siglo XX para que con el comienzo de la era digital, herramientas numéricas ya planteadas encontraran al fin su soporte ideal y superaran las limitaciones intrínsecas al hombre. Desde ese momento y con los sucesivos avances, cualquier forma y configuración estructural pasó a ser calculable y con ello dimensionable y ejecutable. Tipologías como las láminas de hormigón ya no están limitadas a las superficies regladas (Figura 81) y las formas analizables van más allá de las calculables por medios manuales¹⁴³.

La ciencia como forma y medio para la comprensión de cuanto nos rodea, es vital para el entendimiento del conjunto. La arquitectura está posibilitada por dicho conocimiento y sometida a éste bajo cualquier luz. Tanto en los límites de lo realizable, como en los márgenes más holgados en los que se desarrollan la mayor parte de las construcciones, el conocimiento influye, tanto sobre la concepción y el diseño, como sobre la percepción de la obra, a modo de ente racional que se ajusta a las necesidades de la sociedad, desde el conocimiento previo y las herramientas propias de un tiempo.

Figura 80. Capilla de Santa Mónica, en San Lorenzo de Xochimancas (México), obra de Félix Candela (1960). La cubierta está compuesta por segmentos de hypars que componen la estructura.

¹⁴² Estos modelos geométricos corresponden a los empleados en la obra de Félix Candela, entendido como el mayor referente dentro del ámbito de las estructuras laminares.

¹⁴³ Los medios manuales de cálculo de láminas, buscaban la reproducción de las superficies mediante una formulación matemática sencilla, que permitiera la determinación de las tensiones máximas y mínimas a las que se encontraría sometida la estructura al actuar sobre ella las cargas.

- Económico-social: *“La arquitectura es la autobiografía del sistema económico y de las instituciones sociales”*¹⁴⁴, mostrando en sus muros las circunstancias que confluyeron para dar origen a la obra arquitectónica. La confluencia temporal de ciertos acontecimientos, hace posible o no el desarrollo de ciertos tipos de arquitectura, como en el caso de las estructuras laminares, que tan en boga estuvieron durante la primera mitad del siglo XX, por su gran economía, hoy prácticamente han desaparecido.

Figura 81. Crematorio de Kakamigahara, en Kakamigahara, Gifu (Japón), obra de Toyo Ito & Associates (2004-2006).

¹⁴⁴ ZEVI, Bruno, *“Saber ver la arquitectura”*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 117 (Publicado originalmente como *“Saper vedere l'architettura”* en 1948).

La influencia socio-económica conjuntamente con la política, han marcado el desarrollo de las civilizaciones y de la arquitectura asociada a éstas. *“Las características principales de la arquitectura se definían por las costumbres, por las hazañas y por los deseos de perdurar en la historia, así se complementan las construcciones lacustres, las edificaciones monumentales como La Gran Muralla China, los grandes castillos e iglesias medievales, (...).*

Es tanta su influencia en las costumbres de los pueblos que de tal manera se unificaban y dividían conceptos claros de arquitectura hasta el punto de convertir dos grandes corrientes en las más comunes y utilizadas en la antigüedad [Arquitectura Antigua y Arquitectura Clásica], (...)

De todas estas manifestaciones de grandes obras materializadas es que nacen los grandes monumentos de la era antigua. Ver estructuras tan impresionantes como el Coliseo Romano, los arcos que reflejaban y enunciaban las grandes hazañas bélicas y sus héroes, los templos religiosos paganos y cristianos que se asemejaban a la egolatría de sus creadores y las obras de ingeniería que se confundían con su arquitectura como el acueducto Romano, la vía Apia, etc., dan para pensar que la arquitectura tuvo un siglo de oro en sus obras, que perdurarían para reconocimiento de sus nombres y clasificación histórica de sus pueblos.”¹⁴⁵

Los condicionantes sociales son en sí, condicionantes ligados a una “civilización” concreta y por ende aparecen regionalismos y consideraciones particulares ligadas a la evolución de éstas. En el caso de las obras pertenecientes a la arquitectura de grandes luces, como elementos extremos, llevan asociadas claras connotaciones que dan justificación al ímprobo esfuerzo de su construcción. Este sobreesfuerzo se ha visto aliviado paulatinamente durante los dos últimos siglos, abriendo el abanico de justificaciones sociales que permiten el empleo de este recurso espacial.

El siglo XX ha sido un periodo convulso marcado tanto por los conflictos militares, como económicos. Precisamente estas rupturas de la continuidad heredada del siglo XIX, fueron el impulso que necesitaba un nuevo material, el hormigón armado, para encontrar su justo lugar en el panorama arquitectónico. En concreto la carestía de acero a causa de los conflictos bélicos y el aumento del precio de este material, durante y tras el fin de estos, dio la oportunidad a las estructuras de hormigón armado de establecerse como sustituto a las estructuras metálicas, con un menor coste e infinidad de posibilidades. Si bien sus orígenes los encontramos enraizados en el siglo anterior, con sonadas patentes, que regularían su empleo como las de Joseph Monier y François Hennebique, en un intento, tanto de difundir las construcciones de este material, como de establecer unas pautas y garantías para su empleo en condiciones de seguridad, ya a comienzos del siglo XX los herederos de estos conocimientos, versados de las limitaciones espaciales que los elementos horizontales tienen, recurrieron al factor de

¹⁴⁵ RODRÍGUEZ HENAO, Andrea, *“La arquitectura como influencia social, política y económica en el desarrollo de una civilización tanto en el poder como en la destrucción ambiental”*, Colombia, SCHEMA (ISSN: 2256-3717), 2014, p. 4-5.

forma. Si bien este proceder no es algo nuevo, ya que arcos, bóvedas y cúpulas han sido los recursos básicos de la arquitectura a la hora de construir espacios de grandes luces a lo largo de los siglos en las edificaciones de piedra, esta vez la diferencia la encontramos en las raíces conceptuales y el esquema de trabajo. Claramente los arcos, bóvedas y cúpulas son esquemas estructurales nacidos de la necesidad de encontrar sistemas compresivos, en los que no aparezcan tracciones, que puedan conducir al colapso de la estructura. Esto llevó a que los avances en el mundo de la construcción se centraran en el afinamiento de los elementos estructurales, desde los gruesos arcos romanos, que eran capaces de resistir multitud de combinatorias de cargas, hasta las estructuras góticas, que basadas en la experiencia empírica, encontraron las formas más eficientes para la combinatoria de cargas previsible, ajustando su diseño estructural para el paso por su interior de un antifunicular de cargas concreto. La importancia del marco temporal, es vital para el entendimiento de las limitaciones acompañadas a la producción arquitectónica, justificando un proceder constructivo, como expresa claramente Antonio José Mas-Guindal Lafarga cuando dice: *“Hoy no se puede hacer el gótico de entonces. Ni las condiciones laborales son repetibles, ni existe hoy la sabiduría de los magister operis de entonces”*¹⁴⁶. Frente a la optimización formal de las estructuras compresivas, justificada por el empleo de un material como la piedra, incapaz de resistir tracciones, el hormigón armado puede soportar, tanto compresiones, como tracciones, lo que modifica sustancialmente las reglas básicas a tener en cuenta para el diseño. Las estructuras laminares frente a las bóvedas, están sometidas, tanto a compresiones, como a tracciones, trabajando como una membrana, que transmite superficialmente sus esfuerzos hasta los apoyos. Este hecho abre un nuevo mundo al diseño de las cubiertas de grandes luces, pudiendo aumentar el repertorio de formas a las que poder recurrir.

Ya en este punto los medios de cálculo permitían conocer con cierta precisión las solicitaciones internas de la estructura, determinando los esfuerzos máximos para los que ha de estar dimensionada. Precisamente la capacidad de cálculo es uno de los principales factores que determinan las formas realizables, como ya se ha puesto de manifiesto, limitándose el diseño a aquellas cuya función conocida permite su cálculo, lo

Figura 82. Capilla de Lomas de Cuernavaca (México), obra de Félix Candela (1958). Imagen de la cimbra empleada en la construcción.

¹⁴⁶ MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las Estructuras Antiguas o cuando las estructuras no se calculaban”*, España, Munilla-Lería, 2011, p.111

que impedía una libertad real para el diseño de la forma de las láminas. Este hecho se hace evidente en los diseños de las famosas cubiertas realizadas por Félix Candela a lo largo de su amplia trayectoria, en los que logró sorprendentes diseños empleando las bases geométricas comentadas, cubriendo grandes espacios con finas láminas, llegando a ser incluso de 15 milímetros en su parte más fina. Sus estructuras marcaron una época en el panorama arquitectónico.

Las estructuras laminares, pese a ser una solución estructuralmente correcta y eficaz, en la actualidad prácticamente ha sido relegada al desuso. Tanto en el origen como en el fin de una tipología estructural, encontramos múltiples circunstancias específicas que justifican tal acontecimiento y le dan sentido en el panorama global de la construcción.

Una de las principales causas¹⁴⁷ para la práctica desaparición de las estructuras laminares en la actualidad, lo encontramos en el factor socio-económico. El proceso constructivo de este tipo de cubriciones requiere una gran cantidad de mano de obra,

¹⁴⁷ Si bien los factores socio-económicos han sido una de las principales razones de la práctica desaparición de las estructuras laminares en la actualidad, hay otros dos igual de relevantes:

- La adecuación climática: a lo largo de toda la historia de la arquitectura se reconoce un proceso evolutivo de la adecuación climática, que con el paso de los años y la experiencia, han generado un profundo conocimiento de los factores, que influyen en las condiciones de confort para el desarrollo de las distintas actividades del hombre a lo largo de su vida. Si comparamos por un momento las estructuras laminares, con aquellas edificaciones que históricamente han logrado una mejor adecuación climática en países como el nuestro, vemos que la diferencia más significativa es la inercia térmica de los paramentos y el aislamiento. Esta falta de adecuación supone un mayor coste en medios auxiliares de climatización, que en muchos casos, a duras penas, logran mantener el rango de confort en el interior.

De esta manera, al pensar en realizar una de estas construcciones, primeramente se debe tener presente las condiciones particulares del entorno, conociendo las limitaciones de la solución estructural para generar espacios habitables. Las estructuras laminares únicamente son apropiadas para climas templados, en los que las temperaturas mínimas y máximas no resulten extremas. Este hecho delimita de partida los márgenes espaciales en los que se pueden presentar este tipo de obras.

Por su parte México, el país donde más ampliamente se encontró extendido el uso de las cubiertas laminares de hormigón armado, resulta en general apropiado para la implantación de estas edificaciones con un confort climático adecuado, optando por medios sencillos y económicos. Así en México no podemos argumentar que este factor haya sido relevante a la hora de prescindir del uso de las estructuras laminares, como ha ocurrido en el caso de España.

- La durabilidad: actualmente este factor influye a la hora de la toma de decisiones en el proyecto, ya que ésta se encuentra directamente relacionada con el espesor del recubrimiento del hormigón, que sirve de capa protectora para las barras de acero del armado, susceptible de sufrir corrosiones que conduzcan a desperfectos puntuales o incluso al colapso. Por esta razón, en la mayor parte de los casos son objeto de tratamientos superficiales, que en la medida de lo posible garanticen la impermeabilidad, lo que conlleva un mantenimiento más intenso que otras soluciones de cubrición de grandes espacios.

por lo que solo se puede entender la competitividad de estas soluciones, en un marco donde los sueldos resulten bajos con respecto al coste de los materiales, dado que precisamente esta solución es donde tiene su principal virtud. En el momento en el que se desarrolla la obra de Félix Candela en México, los materiales resultan costosos y la mano de obra económica, lo que convertía a estas soluciones en uno de los principales recursos para la consecución de grandes luces en obras de cualquier índole, desde almacenes y mercados, a iglesias y escenarios.

La optimización no es un hecho ni mucho menos gratuito, ya que para ello era necesario la construcción de un encofrado continuo (Figura 82) que reflejara la forma definitiva de la estructura, lo que requería mucha mano de obra especializada, capaz de realizar esa

Figura 83. Estación de Autobuses del Casar de Cáceres (España), obra de Justo García Rubio y Jaime Cervera Bravo (1998-2004).

estructura previa correctamente, para disponer posteriormente el armado con el trazado y densidad, precisos, según resultan de los cálculos previos realizados en el estudio, vertiendo finalmente la fina capa de hormigón que configura la cáscara. Durante las últimas décadas nos encontramos ante un panorama sumamente distinto, en el que el aumento de los sueldos en relación con el coste de los materiales, ha ascendido hasta el punto de prevalecer la reducción de la mano de obra frente al consumo de materiales. Pero si bien durante los últimos tiempos esto resulta más evidente, ya en 1964 a partir del decreto que marcaba un salario mínimo para los albañiles mexicanos, las estructuras laminares dejaron de ser la opción más económica de cubrir grandes luces en ese país, lo que paulatinamente conduciría a que dejaran de ser económicamente rentables, llevándolas a su extinción. La evolución de la relación del coste de materiales y mano de obra, es claramente la justificación del paso generalizado a sistemas, que aunque menos óptimos, no requieren encofrados tan complejos y tanta mano de obra para su construcción. Esto se hace patente incluso en algunos de los ejemplos actuales que recurren a las láminas para la conformación espacial, empleando encofrados producidos de forma industrial, aunque personalizada, solo recurriéndose a los, hoy caros, encofrados de madera, cuando se desea desde la concepción proyectual, esa textura tosca y natural, que durante tantos años ha caracterizado las estructuras de hormigón, creando un lenguaje propio y reconocible. En la Estación de Autobuses del Casar de Cáceres (1998-2004) (Figura 83), obra de Justo García Rubio y Jaime Cervera Bravo, se emplea el material con la tosquedad y rotundidad que otorgan los encofrados de madera en la conformación de la suntuosa lámina de hormigón armado blanco, que conforma la cubierta para los autobuses y la cafetería. El grácil gesto de la lámina, representa un claro intento de convertir el edificio en una figura icónica, estableciéndose como referente dentro del entorno urbano, pese a la pequeña escala de la actuación. Las estructuras laminares han pasado de ser soluciones funcionales y económicas, a alardes formales, que llevan asociado un considerable esfuerzo económico. Así los factores socio-económicos, no solo impulsaron la implantación de una técnica, sino incluso su desaparición¹⁴⁸.

Hoy se conciben estas edificaciones únicamente como parte de su historia arquitectónica, solo materializable en un caldo de cultivo muy concreto, perteneciente a la franja central del pasado siglo. Este cambio de concepción social de una tipología estructural, convierte a las obras que actualmente acometen el reto de emular los espacios logrados en aquellos años, en un gesto de ostentación expresiva, claramente enfatizada dentro del proyecto.

La observación de los condicionantes socio-económicos, como se ha visto, permite justificar por ejemplo la adopción de ciertas soluciones. Además, este tipo de factores en sí mismo, pueden emplear la arquitectura como medio lingüístico de expresión, de forma pareja a lo que ocurría en el caso de los factores políticos y religiosos. Este hecho

¹⁴⁸ Debemos reconocer que aún hay numerosos países en los que los sueldos continúan siendo lo suficientemente bajos, como para justificar el empleo de este tipo de soluciones, compartiendo así mismo un clima benigno que permita su empleo.

lleva asociado una representatividad de las formas, como es el caso del imperialismo, del que se dice que *“la arquitectura de la compensación: ofrece piedras grandilocuentes a un pueblo a quien ha sustraído el pan y el sol, y todo aquello que es digno del hombre”*¹⁴⁹. Una vez más vemos como los muros de la arquitectura son un auténtico libro en el que ver el pasado, al tiempo que se vislumbra el futuro.

A lo largo de la historia, han acontecido innumerables sucesos que han influido decisivamente en la concepción técnica y espacial de la arquitectura, así como en el resto de ámbitos de la actividad del hombre. Solo en este último siglo, los dos grandes conflictos que han asolado el viejo continente, han mancado periodos de intensa transformación. Periodos de carestía que condujeron a la implantación de nuevas técnicas que resultaran más económicas, como en el caso del hormigón armado. Durante la Segunda Guerra Mundial, la investigación en múltiples ámbitos para la aplicación militar, ha permitido que tras la contienda se hayan producido sorprendentes avances, como en el campo de los materiales, con el desarrollo de los plásticos, un conjunto de sustancias sin las que hoy no concebimos el panorama actual.

Los factores socio-económicos marcan de forma global el marco en el que se desarrolla la producción arquitectónica, así como la percepción y lectura que hacemos de la urbe, pautas de conducta... en definitiva el entendimiento del espacio y la forma en que se habita. Como se ha dicho, cada obra arquitectónica se entiende gracias al conjunto de circunstancias en las que se conformó, pero de todas ellas el factor socio-económico sería el ente estructurador en el que se engarzan el resto de las piedras del crisol del marco temporal que rodea al proyecto, como integrante de una civilización.

- Geográficos: desde este punto de vista, se encuadra la obra dentro de un marco físico concreto, con unas características específicas, que condicionan su materialización. Toda arquitectura está sometida al lugar en el que se asienta, tanto a causa de los parámetros meteorológicos como la temperatura, precipitaciones..., como a los medios materiales disponibles en dicho margen territorial, madera, piedra... Estos y otros condicionantes establecen unos parámetros de partida que configuran los márgenes para el diseño de la obra. En estos términos aparecen los regionalismos, como adaptación de la producción arquitectónica a un medio.

En todo lugar las tipologías edificatorias tradicionalmente realizadas y especialmente en el caso de la vivienda, nos hablan de una adaptación desde los materiales a los colores. Dentro del territorio español, en las regiones del sur las edificaciones buscan guarecerse del intenso calor, con muros encalados¹⁵⁰ y regular la temperatura y humedad de los interiores mediante estrechas calles y patios interiores, en los que la vegetación y las fuentes actúan como medio de regulación natural. Frente a esta situación, en el norte las viviendas buscan un mayor aislamiento para los meses de frío, de forma que en los

¹⁴⁹ ZEVI, Bruno, *“Saber ver la arquitectura”*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 119 (Publicado originalmente como *“Saper vedere l'architettura”* en 1948).

¹⁵⁰ La pintura tradicionalmente empleada para cubrir los paramentos de blanco, es el encalado, aplicando cal viva mezclada con agua.

grandes caseríos, dispersos por el paisaje, generalmente con tres niveles, en el inferior se guarecen los animales, que actúan de fuente calorífica y en el superior se guarda la paja, que actúa como aislante, permitiendo un mayor confort en el nivel intermedio en el que se emplazan las zonas habitables. En ambos casos se reflejan situaciones pertenecientes a otros tiempos, pero dan fe de los condicionantes intrínsecos al lugar. Cuando hoy en día vemos aplicada una misma respuesta para dos marcos tan claramente diferenciados, se asume un mayor coste energético en su funcionamiento. Así cuando hoy, como dictan las circunstancias, buscamos una mayor eficacia energética de las intervenciones, es vital ser consciente de la tradición arquitectónica del lugar, para desgranar sus virtudes y emplearlas con los ojos y herramientas propias de la contemporaneidad.

Otro claro ejemplo de adaptación climatológica es la adaptación de las cubiertas según la pluviometría, así en Egipto son planas, mientras que en Grecia y Roma tienen una leve pendiente, que aumenta según ascendemos, hasta las cubiertas más inclinadas en Inglaterra. En estos razonamientos podemos encontrar incluso las causas por las que el gótico se desarrolla por un periodo más largo en los países Nórdicos, al adaptarse perfectamente a la entrada de los rayos solares, casi perpendicular en el interior del espacio, siendo más eficaz para el empleo de la luz como instrumento arquitectónico.

Anteriormente comentamos la práctica desaparición de las estructuras laminares en la actualidad, razonando su inadecuación al panorama socio-económico actual, pero una de las causas concretas que han limitado su uso y en particular en ciudades como Madrid, es su escasa adaptación a un marco climático, como el nuestro, ya que pese a proporcionar un espacio fresco en sombra en verano, que puede encontrarse bien ventilado, en los meses invernales resulta prácticamente imposible mantener el confort interior, dado el escaso aislamiento térmico que proporciona¹⁵¹.

Parasoles y otros recursos similares tienen especial relevancia en latitudes donde la incidencia del sol requiere de medidas especiales. En México, país donde mayor desarrollo han tenido las estructuras laminares, climáticamente resulta el entorno más propicio, proporcionando la arquitectura, más una protección ante las inclemencias meteorológicas, que un ambiente interior plenamente independiente, como ocurre en otras latitudes. Este tipo de entornos permiten dar cabida a una tipología estructural claramente condicionada por el factor geográfico, aunque su escasa repercusión en la actualidad se encuentra motivada por los elevados costes que conlleva la cuantiosa mano de obra necesaria para su construcción. De este hecho se deduce la relevancia del

¹⁵¹ Claro ejemplo de los problemas de climatización que presentan estas edificaciones en Madrid, lo encontramos en las iglesias, resueltas en cerámica armada, que realiza Eladio Dieste (1917-2000) en Alcalá de Henares. Estas obras resultan ejemplos parejos a las estructuras laminares de hormigón, con problemáticas equiparables. La parroquia de San Juan de Ávila (Alcalá de Henares), presenta serios problemas para mantener el estado de confort, tanto en los meses de verano, como de invierno, según demuestra la experiencia empírica. Este hecho hace reconsiderar la propiedad geográfica de la intervención, ya que en otras latitudes una propuesta pareja resultaría perfectamente adecuada, así es el caso de Uruguay, donde se concentra la obra de Eladio Dieste.

marco que rodea la producción arquitectónica para justificar su existencia y sus implicaciones en un momento y lugar concreto.

El entorno por lo tanto, no solo da sentido a la propuesta, como nexo con el medio, que hace al proyecto participe del conjunto, sino que condiciona en gran medida los parámetros de diseño bajo los que se plantea la propuesta, tiñendo de una u otra manera al proyecto de los condicionantes propios del lugar. En este punto, las grandes luces se ven marcadas por la capacidad para optar por determinadas soluciones, así como para la adecuación al entorno, que puede exigir salvar obstáculos o confeccionar formas más apropiadas para la funcionalidad del proyecto¹⁵².

Figura 84. La Halle des Machines de París (Francia), obra de Ferdinand Dutert y el ingeniero Victor Contamin (1889). Fue la mayor luz lograda en arquitectura con 114,38 metros, fre a los 520 metros del puente Firth of Forth.

¹⁵² Un ejemplo claro de proyecto de grandes luces condicionado por el entorno, serían los edificios puente, que nacen conceptualmente con la intención de unir extremos mediante un espacio puramente arquitectónico. El Colegio Maravillas de Alejandro de la Sota (1913-1996), en otras circunstancias plantea una solución pareja, con una gran cercha en la que se organizan las aulas, para dejar bajo ellas el espacio del polideportivo, todo ello originado por el considerable desnivel del solar, que llevó al arquitecto a considerar un esquema en sección tan peculiar.

- Técnica: como se ha hecho hincapié a lo largo de todo el estudio, el hombre se ve supeditado a lo que la técnica demarca como posible en cada momento de la historia. Por consiguiente la relevancia de este punto se encuentra sobradamente explicada, siendo de vital importancia especialmente para aquellos proyectos demarcados en el ámbito de las grandes luces, ya que dependen, en mayor medida, de los avances acontecidos. Los proyectos de grandes luces se sitúan en el ámbito extremo y experimental de lo desconocido, por lo menos durante buena parte del siglo XIX, ya que posteriormente las dimensiones son limitadas por la funcionalidad y economía, en lugar de la técnica. Desde hace ya más de un siglo, los límites espaciales a lo realizable, debemos buscarlos en la ingeniería civil y en particular en los puentes (Figura 84). En este caldo de cultivo centrado en las consideraciones puramente técnicas, es donde encuentran su origen y evolución las técnicas que emplea la arquitectura a diario. Este hecho permite que en la actualidad dispongamos de un amplio abanico de soluciones, siendo la elección entre ellas, ya de por sí un acto de reflexión proyectual que marca de principio a fin el proyecto.

A lo largo de la historia cuando ha comenzado a emplearse un material nuevo o no empleado en cierta tipología edificatoria, sus formas han respondido a una traslación de la que tenía el material al que ha venido a sustituir. Esto se puede ver claramente en los órdenes griegos, que son una traslación al mármol de los modelos de madera empleados con anterioridad. Esto lo vemos no solo en el campo de la arquitectura, sino también en otros como el del automóvil, al disponer el motor en la parte delantera, pese a los problemas de la transmisión, siendo ésta una traslación directa de la disposición tradicional de la fuerza motriz en el coche de caballos, delante del conductor.

El estadio técnico en cada momento de la historia, ha condicionado la producción arquitectónica. Así desde la aparición de los medios informáticos, la capacidad de cálculo y diseño se ha incrementado de manera sorprendente más allá de las capacidades físicas del hombre, lo que entre otras cosas ha permitido que técnicas que se veían coartadas por lo calculable, hoy puedan aparecer con una libertad considerablemente superior, tanto desde el punto de vista dimensional, como formal. El mejor ejemplo de esto lo encontramos en una técnica contemporánea como es el pretensado, que empleamos de maneras muy diversas, desde la confección de grandes elementos horizontales, a formas complejas, como elemento de control de deformaciones...¹⁵³

En cada momento la aparición de una solución técnica o los avances sobre ésta, han transformado la forma de concebir la arquitectura, al tiempo que sus límites. Actualmente los sistemas de impresión digital están llegando al punto de poder imprimir

¹⁵³ Desde los mismos orígenes del pretensado, encontramos en la obra de Eugène Freyssinet ejemplos de: grandes elementos horizontales en gran número de sus puentes y elementos de control de deformaciones como la cimentación del Puerto de Brest (1935-1940). La gran diferencia, es que en la actualidad esta técnica ha pasado del ámbito experimental a la cotidianidad constructiva, al tiempo que los avances, tanto a nivel técnico, como de cálculo, permiten un mayor control del proceso resistente.

de forma global la obra arquitectónica, un avance que en años o décadas sin lugar a duda transformará la concepción del proyecto, la urbe y el conjunto de los espacios en los que habitamos, supeditados a un nuevo tablero de juego (Figura 85), dictado por las reglas de la nueva técnica. Todo proyecto es una resolución técnica a un problema previo, por lo que las variaciones relativas a los sistemas constructivos, modifican la concepción de la obra y por consiguiente han de ser uno de los principales factores, tanto a la hora de la interpretación de la obra construida, como en la ideación proyectual.

- Psicológicas: este factor resulta más intangible, en cuanto nos referimos a las sensaciones que transmite la arquitectura y su capacidad para influir sobre el usuario. De esta manera actúa como medio de expresión, suscitando reacciones en el cuerpo y el estado de ánimo del espectador. ¿Quién puede negar que el Taj Mahal no representa el amor, mejor que cualquier poema, música o pintura?

La Teoría de la Empatía Simbólica de *Einfühlung*, expresa la capacidad del hombre de comprender en base a expresiones y signos externos, la vida mental de otros. Especialmente en arquitectura, el hombre tiende a proyectar las estructuras de su propio cuerpo (espacio, frontalidad, vertical, horizontal, equilibrio etc.) y sus propios sentimientos cuando está llevando una carga. Este tipo de rasgos, en un edificio inconscientemente despierta una empatía o simbolismo. Así tras cada

Figura 85. Start-up MX3D quiere construir el primer puente impreso en 3D sobre un canal de Ámsterdam, empleando unos robots, que se desplacen por la estructura imprimiéndola a su paso. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo con resultados muy prometedores.

forma plasmada en la arquitectura, hay un trasfondo ligado con el propio artífice, buscando su expresión a través de este medio.

Posteriores investigadores como: Melanie Klein, Hannah Segal y Adrian Stokes han encontrado los siguientes símbolos arquetípicos en las edificaciones:

- línea u objeto horizontal = descanso
- vertical = acción, trabajo, desafío/audacia
- objeto anguloso o escarpado = hombre
- figura moldeable o suave = madre
- habitación = útero
- vano de puerta = nacimiento
- ventana = ojo; conversación
- espacio abovedado = cooperación
- espacio avanzado = competición, querella

Así las formas más allá de funcionalismos y estéticas, buscan la transmisión de un trasfondo sentimental en el usuario. Este hecho se hace claramente patente en proyectos como el Caixa Forum de Madrid obra de Herzog & De Meuron, donde la materia parece levitar, comprimiendo el aire bajo de sí, transmitiendo una intensa sensación al usuario, que marca su experiencia vital de la obra. Aquel que pasa bajo el Caixa Forum siente la intensidad de la materia (Figura 86), que su mente consciente percibe levitando, en contradicción con su comprensión cotidiana de las formas y la transmisión de las cargas al terreno. Un reto gravitatorio que rompe los esquemas comprensivos de los usuarios, que sin los conocimientos necesarios para la entendimiento del funcionamiento interno de la estructura, se ven sorprendidos ante la configuración volumétrica de la obra. Así el esfuerzo estructural, se traduce en un esfuerzo expresivo, que va más allá de la consecución de una imagen, buscando el interés de quien pasa ante él, una solución que redunda en el éxito proyectual, dada la

Figura 86. Cota del terreno bajo el volúmen suspendido del Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron y NB35 ingeniería (2002-2008).

dependencia del volumen de usuarios que acceden a él, para su correcto funcionamiento.

La transmisión de sensaciones del proyecto al usuario es algo que ha estado ligado a la arquitectura desde sus orígenes y por consiguiente un aspecto más a considerar en la compleja labor que se lleva a cabo en los estudios de arquitectura, sopesando las repercusiones de la obra, sobre los usuarios y la urbe.

- Forma: esta interpretación se fundamenta en el conjunto de *“leyes”, “cualidades”, “normas” y “principios”*, que la humanidad ha impuesto a la producción arquitectónica a lo largo de los siglos. La arquitectura tradicionalmente se ha concebido a través de la composición de las formas, como expresa al propio Le Corbusier (1887-1965), cuando dice que *“La arquitectura es el juego sabio, correcto y magnífico de los volúmenes bajo la luz”* o *“¡La arquitectura es el juego de formas más genial, correcto y magnífico que existe!”*.

La fundación de las Academias para el estudio de las artes en el siglo XVIII, responden al nuevo espíritu, precursor de la revolución francesa y de los cambios que marcarían los tiempos desde entonces. En el caso concreto de la arquitectura, se estudian las herramientas compositivas y se contemplan modelos, centrados en la tradición arquitectónica. El estilo *“Beaux Arts”* o Estilo Arquitectónico Clásico Académico, versa sus estudios sobre la simetría, la jerarquía espacial y el uso del color, empleando referencias estéticas historicistas y eclécticas, desde lo particular a lo general. Si bien, esta línea de estudio no va encaminada hacia un progreso de la concepción arquitectónica, sí establece unas preocupaciones compositivas propias de un tiempo y contempla las referencias históricas, como un lenguaje y medio de expresión social.

Este tipo de percepción de la arquitectura basada en conceptos geométricos, ha estado patente a lo largo de toda la historia, pudiendo diferenciarse varios conceptos, en los que se ha centrado el discurso compositivo a través de los siglos:

- Unidad: es la expresión en un trabajo de una idea única, transmitiendo un carácter de ligazón entre todas las partes que lo constituyen.
- Simetría: es una herramienta geométrica para la consecución de un equilibrio de carácter axial, transmitiendo un estado de proporciones, asociado clásicamente a la búsqueda de la belleza de las formas.
- Equilibrio: en un rango superior al de la simetría, permite que una arquitectura aformal pueda tener un balance entre las partes que la constituyen, siendo necesario que a uno y otro lado, haya masas que tengan el mismo *“peso”*.
- Énfasis: en toda composición aparece un punto focal o centro de interés visual, que marca en la visión del usuario una referencia que permite comprender el resto de la obra, su uso, función o incluso un origen para su lectura conforme a las bases de diseño impuestas por el artífice de la obra.

- Contraste: el diálogo entre opuestos, permite que la arquitectura goce de vitalidad, por ejemplo entre vacíos y llenos o entre verticales y horizontales, rompiendo así la monotonía que produciría una composición que solo incorporara una familia de elementos, sin establecer el contrapunto de lo opuesto.
- Proporción: es la relación de cada una de las partes entre sí y con el conjunto del edificio.
- Escala: es un factor esencial para el juicio arquitectónico, tomando al hombre como medida de todas las cosas, estableciendo así una unidad de referencia dimensional, con la que establecer un marco para el diseño, en función del uso y función espacial, así como de la representación.
- Expresión o carácter: es la exigencia expresiva que se impone a la arquitectura, como transmisora de emociones e imágenes a los usuarios.
- Sinceridad: es la postura ejercida por el arquitecto, empleando los elementos arquitectónicos según dicta su función natural, sin engaños, en palabras de Bruno Zevi, *"la verdad, tanto en la arquitectura como en la vida, tiene que ir controlada por la propiedad"*¹⁵⁴.
- Propiedad: precisamente es el empleo de los elementos para la función que tienen preconcebida, por ejemplo la propiedad de un suelo, es caminar sobre él.
- Urbanidad: es la cualidad espacial de las edificaciones que respetan a las que le rodean, estableciendo un diálogo con éstas sin imponerse.
- Estilo: es el lenguaje de representación empleado en la resolución de un problema arquitectónico, como un conjunto de elementos que se engloban en una lengua concreta, por ejemplo estilo antiguo..., estableciendo unos principios de diseño.

Todos estos términos son conceptos atemporales, que han marcado la producción arquitectónica así como el discurso establecido sobre ella. Por esta razón, tanto cuando analizamos la producción arquitectónica previa, como cuando concebimos los proyectos, estas consideraciones están presentes, siendo parte del lenguaje empleado a la hora de expresar los conceptos arquitectónicos. *"La arquitectura es cuestión de armonías, una pura creación del espíritu. Empleando piedra, madera, hormigón, se construyen casas, palacios; eso es construcción: el ingeniero trabajando; pero en un instante, tocas mi corazón, me haces bien, me siento feliz y digo: esto es hermoso, esto es arquitectura, el arte entra en mí"*¹⁵⁵. La arquitectura se expresa mediante el dibujo, de forma más rápida que mediante el habla, por eso mismo los términos en que se expresa resultan similares. La arquitectura es un ente formal y por tanto esa es la base para todo lenguaje expresivo, tanto al nivel bidimensional de los paramentos o tridimensional de

¹⁵⁴ Zevi, Bruno, *"Saber ver la arquitectura"*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 140 (Publicado originalmente como *"Saper vedere l'architettura"* en 1948).

¹⁵⁵ Frase de Le Corbusier.

la espacialidad arquitectónica. Así podemos interpretar los términos lingüísticos de la forma, como el medio básico de diálogo espacial y por tanto los términos en los que se traduce cualquier otro de los factores tratados.

- Función: la arquitectura siempre ha tenido un sentido práctico, ya sea en respuesta a una necesidad previa o como medio para transformar el entorno. El hecho de tener una finalidad, aunque ésta resulte abstracta, es su razón de ser y por ende el germen de su existencia. *“En general, podemos decir que la participación que regula la interacción humana forma parte del cometido del edificio. Los edificios y las ciudades unen y separan a los seres humanos; y se crean 'medios' adecuados a diferentes actividades públicas o privadas. Un medio se caracteriza por sus posibilidades para la vida social. Las posibilidades de realizar actividades y percepciones variables deben satisfacer las exigencias ambientales. Al usar la palabra 'posibilidades' queremos señalar el hecho de que nuestra experiencia del medio no es sólo función de lo que realmente hacemos sino, todavía más, de lo que podríamos hacer si quisiéramos”*¹⁵⁶.

El objetivo de una edificación, la cualifica y caracteriza en lo que se ha denominado como tipologías edificatorias. Una manera práctica de diferenciar los distintos tipos de edificaciones y sus características, atendiendo a su función. Este recurso se ha empleado de forma generalizada a lo largo de toda la historia, ya que sirve, tanto para entender el funcionamiento interno de los espacios, como para definir la edificación de forma precisa para unos fines.

“Afirmando que la utilidad debe satisfacerse de manera precisa, con exactitud, y reduciendo su resolución a un problema de distributio, es decir, a procurar “el debido y mejor uso posible de los materiales, y el menor coste de la obra conseguido de un modo racional y ponderado,” Vitruvio establece, en la Roma de Augusto, algunos de los criterios fundamentales de la idea moderna de funcionalidad. [...] Hacer útil la arquitectura es uno de los objetivos de cualquier mentalidad que pueda denominarse racionalista. Resulta impensable una arquitectura racional que no sea útil. Pero el problema de la función en la arquitectura consiste, fundamentalmente, en su indefinición o, dicho de otra manera, en la pluralidad de facetas que puede abarcar su significado: del estricto programa de actividades a la función psicológica, representativa o simbólica.

En su nivel más primario, la arquitectura ha de preocuparse por dar satisfacción a las necesidades básicas de cobijo, que, como ya se ha tratado, se descubre en sus orígenes; y se mantiene a lo largo de la historia, no sólo como una constante ideológica que da testimonio de la esencia del hecho arquitectónico, sino también como una permanente demanda a la que dar respuesta. En su nivel más espiritual se limita a conmover; tal

¹⁵⁶ NORBERG- SCHULZ, Christian, *“Intenciones en arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1979), p. 77-78.

*como expresaba Adolf Loos al narrar la impresión recibida por un paseante en un bosque ante un pequeño túmulo sepulcral*¹⁵⁷.

Atendiendo a su finalidad se han definido grandes grupos, como la vivienda, los hospitales, estadios deportivos..., cada uno de ellos con unas características espaciales concretas, que si bien no suponen una limitación, sí se constituyen como unas directrices de actuación que definen un compendio edificatorio, que determina la regla. Así de forma particular un recurso espacial como las grandes luces, se encuadra en mayor medida en aquellos espacios que por sus finalidades así lo requieren, como es el caso de estadios, edificios deportivos... Así mismo otros como estaciones de ferrocarril o aeropuertos, funcionalmente no lo requieren, pero sí desde el punto de vista representativo, al tiempo que facilitan el flujo de personas que acomete este tipo de edificaciones. La diferenciación y definición en función de la finalidad por lo tanto, es un medio pragmático de enfocar el diseño edificatorio, así como de optimizar los esfuerzos organizativos, hacia determinadas pautas de comportamiento que la práctica ha determinado como eficientes.

De todas estas opciones, la mayor parte de las historias de la arquitectura escritas, se centran en tres aspectos, la funcionalidad, las interpretaciones psicológicas y las formalistas. Todas las lecturas de la historia de la arquitectura que se han efectuado, se organizan como suma de varias de estas interpretaciones, buscando relatar una definición coherente de los acontecimientos, lo más cercana posible a la realidad. Todas las interpretaciones históricas realizadas son visiones parciales, ya que la consideración de todos los factores comentados al unísono resulta excesivamente complejo. Así es inviable la confección de una línea argumental única, al estar compuesta la historia por infinidad de actos y consideraciones, que se entrelazan para definir la imagen concreta de un tiempo.

La consciencia de la multiplicidad de facetas que intervienen en la definición arquitectónica, nos permite, *“Tomar posesión del espacio, saberlo ver, constituye la llave de ingreso a la comprensión de los edificios”*¹⁵⁸. De esta lectura se pueden aprender, tanto los entresijos de los avances acontecidos hasta la actualidad, como del propio proceso mental que conduce hasta la definición del proyecto en el día a día de la actividad del arquitecto.

¹⁵⁷ SOLÁ-MORALES RUBIO, Ignasi, OLIVERAS SAMITIER, Jordi, GRAELLS, Antoni y GRAELLS, Ramon, *“Introducción a la Arquitectura. Conceptos fundamentales”*, Barcelona (España), Edicions UPC, 2009, p. 109, 112.

¹⁵⁸ Zevi, Bruno, *“Saber ver la arquitectura”*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, p. 20 (Publicado originalmente como *“Saper vedere l'architettura”* en 1948).

2.4. Materiales. Gestación de marcos limitativos y condicionantes, derivados de la ciencia de materiales

Los avances acontecidos en los ámbitos técnicos a lo largo de la historia, han sido los principales artífices de la sorprendente evolución arquitectónica de los proyectos de grandes luces durante los dos últimos siglos. Como ya se ha mencionado, la creación de una obra se encuentra envuelta por un marco de condicionantes que justifican su existencia, entre los que se encuentran los avances técnicos, materiales, gráficos... Estos campos han sido un factor vital durante los últimos dos siglos y especialmente durante los últimos años, cuando más patente se ha hecho la interdependencia de las investigaciones científicas y los avances en el campo de la arquitectura.

Los materiales hasta el siglo XVIII aparentemente un referente inerte e invariable en el tiempo, desde el siglo XIX se han convertido en un factor variable y vital. A través del conocimiento se han modificado las características y capacidades de los materiales, abriendo nuevos horizontes dimensionales y recursos proyectuales. Hoy se puede organizar este conocimiento en función de los tipos de materiales:

- **Materiales cerámicos avanzados**

La cerámica es uno de los materiales de uso más extendido en sus formas clásicas, como ladrillos (Figura 87), bovedillas, tejas, cerámica sanitaria, pavimentos cerámicos, porcelana, loza... Durante las últimas décadas la mayor parte de los avances en el sector han ido enfocados hacia su automatización, optimizando los procesos productivos, reduciendo los consumos de tiempo y energía, necesarios en su fabricación.

Los procesos productivos de este material antes de la crisis del petróleo de 1973 eran muy rudimentarios, pero a consecuencia de la concienciación generalizada que se produjo desde ese momento sobre la necesidad de reducir los consumos energéticos, se introdujeron cambios sustanciales en este ámbito, que modificaron tanto los procesos de fabricación como el producto final.

Figura 87. Muro romano de hormigón, empleando el ladrillo como encofrado.

“Aun siendo los materiales cerámicos los primeros que aparecen en la historia del hombre, muy por delante de los metales, el nivel en que se encuentra su desarrollo a principios de los setenta puede ser calificado de muy rudimentario.

*Por ello, podemos afirmar que lo que hoy entendemos por cerámica estructural tiene su origen no hace más de treinta años. Es, por tanto, un campo muy reciente de investigación y desarrollo.”*¹⁵⁹

Así dentro del contexto de la ciencia de materiales, aparece la *“ciencia del procesamiento cerámico”*¹⁶⁰, que busca la mejora de las cualidades del material. Se investigan los métodos para la reducción de defectos en el producto, un aumento de la resistencia mecánica, así como un método para minimizar la fragilidad característica de este tipo de materiales. Esto último se logra gracias a la incorporación de elementos microestructurales no lineales, partículas de criconia parcialmente estabilizada (ZrO_2)¹⁶¹, que refuerzan las matrices cerámicas por un proceso similar al producido en el templado de los aceros. La reducción de la fragilidad del material, lo convierte en una opción más atractiva¹⁶².

Por su parte, el aumento de la tenacidad de las cerámicas, se logra por tres medios:

- Desviando la grieta mediante refuerzos: al encontrarse la grieta con obstáculos o refuerzos a lo largo de su trayectoria, ésta debe aumentar su recorrido y en consecuencia se aumenta el nivel de esfuerzo requerido para su propagación.
- Rotura de la fibra: las fibras mantienen el material unido, hasta que el incremento de las tensiones producen su rotura, prosiguiendo la grieta, pasando de una a otra fibra.
- Extracción de las fibras: las fibras producen una fricción entre sí mientras se aumentan las tensiones hasta el punto de rotura, absorbiendo parte de la energía empleada en la progresión de la grieta, minimizando su impacto al requerir una mayor energía para su propagación. Precisamente en este punto reside la

¹⁵⁹ MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, *“Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI”*, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007, p. 13. (Afirmación realizada por José Serafín Moya).

¹⁶⁰ El origen de la *“ciencia del procesamiento cerámico”* se encuentra en un meeting realizado en los años 70, cuyo contenido queda reflejado en la publicación:

Y. ONODA, George y L. HENCH, Larry, *“Ceramic processing before firing”*, Estados Unidos, University of Florida, Wiley, 1978.

¹⁶¹ GARVIE, R. C., HANNINK, R. H., PASCOE, R. T., *“Ceramic Steel?”*, Australia, Nature nº 258, 25 de diciembre de 1975, p. 703-704.

¹⁶² Los materiales cerámicos se caracterizan por su alta estabilidad química, su dureza y refractariedad, cualidades que lo han establecido como el más apto para determinados fines.

importancia de contar con una correcta interface fibra-matriz, para absorber la energía empleada en propagar la grieta durante la rotura del material.

Actualmente las cualidades de los materiales cerámicos, están claramente determinadas por las características de su microestructura, por lo que a la hora de buscar un determinado comportamiento, deformación, dureza... cualquier actuación está centrada en dicha microestructura, pudiendo incorporarse partículas metálicas, nanopartículas, microfibras, microplaquetas... que vienen a modificar las cualidades finales del material, definiendo un producto concreto, enfocado para una determinada finalidad. Un claro ejemplo de los tremendos avances acaecidos en el sector, lo encontramos en el módulo de rotura de los materiales cerámicos con una fase dispersa de circonia, pasando de $\sigma_f=500\text{MPa}$ en 1970 para los materiales compuestos de alúmina, hasta los $\sigma_f=2500\text{MPa}$ obtenidos a finales de los 80 con materiales compuestos de alúmina-circonia parcialmente estabilizada con itria¹⁶³.

Podemos definir varios grupos de cerámicas en función de los compuestos que entran a formar parte de su microestructura:

- Los materiales basados en la circonia parcialmente estabilizada: (Y-TZP, Mg-TZP, alúmina/Y-TZP, mullita/Y-TZP). Estos materiales, caracterizados por una gran resistencia mecánica, se emplean para aplicaciones como: boquillas de extrusión de perfiles de acero, bombas y válvulas para ambientes corrosivos... donde requieren unos esfuerzos extremos y las características específicas de los materiales cerámicos.
- Los materiales basados en nitruro de silicio: carburos, boruros y nitruros. Estos materiales se caracterizan por su gran módulo elástico y elevada dureza, empleándose especialmente en aplicaciones estructurales a elevada temperatura: cojinetes, herramientas de corte...

La ciencia de materiales ha permitido avanzar gracias a la experimentación, en las características del material, abriendo el abanico de aplicaciones así como ajustando sus características a las exigencias técnicas del mercado.

Si bien los materiales comentados están enfocados en aplicaciones muy específicas y no en el general del ámbito constructivo, si muestran las capacidades de un material y los avances en un campo, que pueden llegar a ser de aplicación. Por poner un claro ejemplo de ello, las cubiertas de láminas cerámicas realizadas por Eladio Dieste podrían verse favorecidas por estos avances entre otros, pudiendo ampliar tanto los

¹⁶³ La resistencia a compresión de algunos de los principales materiales cerámicos son: ZrO_2 (Mg-PSZ) 1.758MPa, Al_2O_3 85% 1.930Mpa, Al_2O_3 90% 2.480Mpa, Al_2O_3 94% 2.013Mpa, Al_2O_3 96% 2.067Mpa, Al_2O_3 99,5% 2.618Mpa, Al_2O_3 99,9% 3.790Mpa, $\text{SiC}\alpha$ 2.500MPa, B4C 2.855MPa y TiB2 5.700MPa.

Por su parte los valores de las resistencias a tracción de dichos materiales son considerablemente inferiores: ZrO_2 (Mg-PSZ) 352MPa, Al_2O_3 85% 155Mpa, Al_2O_3 90% 220Mpa, Al_2O_3 94% 193Mpa, Al_2O_3 96% 193Mpa, Al_2O_3 99,5% 262Mpa, Al_2O_3 99,9% 310Mpa, $\text{SiC}\alpha$ 307MPa, B4C 155MPa (a 980°) y TiB2 300-400MPa.

rangos dimensionales, como por otros medios el aislamiento térmico. Así una solución, hoy descartada por el mercado, podría llegar a presentar una nueva línea de actuación en un futuro.

Actualmente los elementos cerámicos empleados en construcción se encuentran basados en arcilla y sílice, centrando el uso de los avances tecnológicos en los procesos de fabricación. Caso aparte son las cerámicas especiales que hemos expuesto, cuyo marco actual de actuación resulta más especializado.

Otra de las líneas de investigación va orientada a los materiales cerámicos nanoestructurados, reduciendo la microestructura del material por debajo de $1\ \mu\text{m}$ (Figura 88), eliminando la porosidad residual, mediante procesos de sintetización no convencionales, ya sea al vacío o mediante presión asistida por pulsos eléctricos ("*Spark Plasma Sintering*"). Cuando se emplean materiales cerámicos oxídicos monofásicos (alúmina, circonia, mullita, espinela), el elemento resultante goza de una mayor resistencia mecánica y dureza, al tiempo que sus características hacen que sea transparente. Este tipo de materiales se plantean como una de las opciones para equipos aeroespaciales, que deben combinar transparencia, alta resistencia mecánica ($\sigma_f=1\text{GPa}$) y elevada dureza ($H_v>20\text{GPa}$). Por su parte cuando se emplean materiales del tipo óxido/nano-óxido, óxido/nanometal, óxido/nano-carburo y carburo/nano-carburo, brindan un amplio rango de posibilidades para el futuro desarrollo de "*biomateriales*", componentes estructurales y materiales súper duros.

Por lo tanto, el ámbito de las cerámicas desde hace 40 años, se encuentra en un constante proceso de innovación, tanto en el ámbito constructivo, como primordialmente en respuesta a las exigencias de otros ámbitos técnicos. Aunque la los orígenes de

Figura 88. Cerámica ultraliviana que puede deformarse y recuperar su forma. La microestructura varía sus propiedades en función de la anchura de los tubos que la conforman.

la cerámica tradicional se remontan a más de 25.000 años, es en estas últimas décadas donde se han concentrado los avances, tanto en el producto final, como en los medios de producción. Dados los progresos en este campo, no se puede descartar que parte de los materiales de aplicación en otras áreas productivas, encuentren nuevos usos en el sector constructivo y supongan un cambio conceptual en el proceso proyectual.

- Nuevos materiales metálicos

Como ya se ha puesto anteriormente de manifiesto, los grandes avances acaecidos durante estos dos últimos siglos en el ámbito constructivo, se deben en buena parte a la introducción del hierro y posteriormente el acero dentro del panorama arquitectónico, ya que hasta ese momento aparecían como elementos auxiliares u otras funciones no relacionadas con la arquitectura¹⁶⁴. *“El descubrimiento de que la fusión y mezcla de metales cambiaba drásticamente las propiedades de estos constituyó un hito en nuestro desarrollo, que dejaba entrever el valor estratégico, comercial y vital de los metales. El advenimiento de la Revolución Industrial y sus posteriores desarrollos tecnológicos nunca hubieran sido posibles sin el concurso de los materiales metálicos”*¹⁶⁵.

Figura 89. Comparación entre la interpretación espacial de dos estaciones de ferrocarril con más de un siglo de distancia. (a). Estación del Mediodía o Atocha en Madrid (España), obra de Alberto Palacio (1892) (b). Estación de ferrocarril de Wuhan (China), obra de Amenagement, Recherche, Pole d'Echanges (AREP), Cuarto Estudio y Diseño del Instituto de China, map3 y SNCF-IGOA (2005-2013).

¹⁶⁴ El empleo de los metales ha marcado la historia del hombre al punto de darle nombre: Edad del Cobre (7.000 a.C.), Edad del Bronce (2.800 a.C.), Edad del Hierro (1.500 a.C.). Con el paso de los siglos se produjeron numerosos avances en los procesos de fabricación, que llevaron asociada una mejora de las cualidades del metal. Pero estas materias se empleaban para construir herramientas, utensilios, armas... sin embargo en el ámbito constructivo no tuvieron mayor aplicación que: herrajes, tornillería, clavos, grapas, cadenas... que actuaban como componentes o elementos auxiliares. Habría que esperar hasta el siglo XVIII para encontrar obras producidas enteramente en hierro, como material base.

¹⁶⁵ MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, *“Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI”*, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007, p. 21. (Afirmación realizada por Juan J. de Damborenea).

Los materiales metálicos han cambiado radicalmente el panorama arquitectónico durante estos dos últimos siglos (Figura 89). El hierro y posteriormente el acero, frente a la piedra, no es un material estático en el tiempo, cuyas características sean iguales a lo largo de los años, sino que en este caso, al depender de un proceso productivo previo, los avances introducidos, paulatinamente han modificado sus características. Este hecho permite que con un mismo material y esquema constructivo, con el paso de los años aumente, tanto la resistencia, como los márgenes dimensionales alcanzables. Los metales en su conjunto pertenecen al campo de la ciencia de materiales y son resultado de una investigación y avances acontecidos a lo largo de los años. Durante estos dos últimos siglos, el panorama socio-económico ha favorecido el desarrollo de nuevas soluciones. Por lo que respecta al ámbito arquitectónico y estructural hay varios factores de especial relevancia: el aumento de las propiedades mecánicas (límite elástico, carga de rotura, dureza, resistencia a la fatiga y al desgaste y tolerancia al daño), resistencia a la oxidación y corrosión, además de la reducción de los costes, que permite la competitividad, tanto del material, como de los elementos con éste producidos¹⁶⁶.

En el caso de los metales, para modificar sus características se procede mediante la constitución de aleaciones y la microestructura del metal. Así se actúa desde dos puntos de vista, *“composición y microestructura”*, optimizando las propiedades del material resultante.

Los metales actualmente empleados, son el resultado de la combinación de varias sustancias de características físicas muy distintas. A lo largo de los ciclos térmicos, empleados durante el proceso productivo, se modifican su estructura y transforman parcialmente el material, constituyendo una microestructura específica tras el tratamiento térmico.

El acero, tal y como hoy lo concebimos, se inició en 1855, con la revolución siderúrgica producida con Henry Bessemer (1813-1898), con el Proceso Bessemer y los Hornos Thomas-Bessemer (Figura 90). Este avance dio lugar a un material económico y con unas altas capacidades resistentes, lo que le permitió entrar en el ámbito constructivo, como una de las opciones más ventajosas, lo que a su vez atrajo un mayor interés sobre el desarrollo de las capacidades y potencialidades de

Figura 90. Horno Thomas-Bessemer.

¹⁶⁶ Dentro de las consideraciones económicas se engloban todos los condicionantes productivos, como la disponibilidad y costes de los materiales constituyentes de la aleación, la energía requerida en su producción y las sustancias que intervienen en este proceso.

este material. Así, el acero se constituye como uno de los mayores avances en los materiales durante el siglo XIX, al igual que el hormigón pretensado marca el siglo XX.

Actualmente al hablar del acero como material, es necesario especificar el tipo y características del mismo, ya que existen más de 2.000 variantes. En la obra se puede elegir un único tipo de acero para los diferentes perfiles que constituyen la estructura o bien, como ocurre en obras con una mayor especialización y refinamiento estructural, se pueden emplear diversos tipos de acero¹⁶⁷. Las torres, dado el esfuerzo

estructural que supone su construcción y en mayor medida aquellas que alcanzan cotas reseñables, son claro ejemplo de la especialización, tanto de los elementos estructurales, como de los materiales que la conforman. Un ejemplo de esta especialización lo encontramos en la Torre Taipei 101 (1999-2004) construida en Taipéi (Taiwán) (Figura 91), con sus 508 metros de altura y 101 plantas sobre rasante. Esta obra emplea grandes soportes, con un espesor de acero de hasta 80 mm, así como cinco tipos distintos de acero, que desde la planta 62 permiten, gracias a su alta resistencia y ductilidad, soportar las deformaciones debidas al sismo, así como las causadas por el viento¹⁶⁸.

Los aceros empleados en

Figura 91. Torre Taipei 101, Taipei (Taiwán), obra de C.Y. Lee y el ingeniero estructural Thornton Tomasetti (1999-2004). Esta torre alcanza una altura máxima de 508 metros, con 101 plantas.

¹⁶⁷ A este respecto, en las construcciones con estructura de acero atornillada de uso convencional, se emplea un tipo de acero para las perfilierías y aceros de alta resistencia para las tornillerías, dadas las mayores tensiones a las que se ven sometidos estos elementos.

¹⁶⁸ Esta torre cuenta así mismo en su parte superior con una esfera de acero de 5,5 metros de diámetro y 660 toneladas, suspendida de ocho cables de 42 metros de longitud y 9 centímetros de diámetro, posada sobre unos amortiguadores. Esta gran mole, emplazada entre las plantas 87 y 92, permite

esta obra son resultado del proceso TMCP (Thermo-Mechanical Control Process), que permite un control de la resistencia mecánica, tenacidad y soldabilidad del elemento final, mediante una modificación de la microestructura del material. Los aceros TMCP se producen mediante un proceso de laminación y un posterior recalentado y enfriamiento rápido que modifica las cualidades del acero. Una de las grandes ventajas de los aceros TMCP, es que no se produce ningún ablandamiento en las zonas circundantes a las soldaduras, no ocasionándose reducciones de resistencia en éstas, siempre y cuando el enfriamiento de ésta se produzca con rapidez o mediante la introducción de calor de forma moderada. De otra forma, el enfriamiento lento de la zona soldada, produciría una merma de sus capacidades resistentes.

Los aceros se encuentran actualmente en plena evolución, ejemplo de ello es el avance producido en la década de los 80 con los aceros HSLA (High-Strength Low-Alloy Steels). Este material en concreto, permitió la reducción de los pesos de las carrocerías de los automóviles hasta en un 35% respecto a sus predecesoras, al tiempo que aumentaba considerablemente su resistencia mecánica. Pero los aceros HSLA solo han supuesto un escalón evolutivo más, ya que los actualmente empleados, frente a las 550 MPa de límite elástico, alcanzan los 1.500 MPa de límite elástico con los aceros de “fase dual” o los aceros TRIP (Transformation Induced Plasticity)¹⁶⁹.

Actualmente los mayores avances en el campo del acero se están produciendo en los aceros superbainíticos y los aceros TWIP (Twinning Induced Plasticity), estos últimos, con un extremadamente alto contenido en magnesio, que puede alcanzar el 25%, logrando combinar muy alta resistencia, con extrema ductilidad. *“Este nuevo tipo de aceros [TWIP] presenta complejas microestructuras, mezcla de martensita, bainita y/o austenita retenida que permiten el tan deseado efecto de endurecimiento por transformación. Los aceros superbainíticos libres de carburos fundamentan sus excelentes propiedades de resistencia (~2,2GPa) y tenacidad (capacidad de absorber energía sin romperse) en la formación de microestructuras nanoestructuradas.*

No cabe duda: estamos en la Edad del Acero, ¿qué será lo próximo que nos presente este nuevo material?.”¹⁷⁰

amortiguar las deformaciones debidas a las cargas de viento y los sismos. Éste es considerado el mayor amortiguador de masa adaptativo del mundo. Para realizar esta esfera se soldaron 41 placas de acero de 12,5 centímetros de espesor.

¹⁶⁹ Los aceros TRIP tienen una gran ductilidad, lo que permite la conformación de formas de geometrías complejas, algo relevante en el campo del automovilismo y en otros tantos ámbitos industriales, que gozan de una mayor libertad de diseño gracias a los avances en el material. Además estos aceros tiene la virtud de que al deformarse se produce un endurecimiento por transformación martensítica, lo que resulta una gran ventaja sobre las capacidades mecánicas del elemento final.

¹⁷⁰ MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, *“Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI”*, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007, p. 24. (Afirmación realizada por Juan J. de Damborenea).

El acero es el material que ha liderado los cambios estructurales y en consecuencia espaciales, acontecidos en la arquitectura e ingeniería civil durante los dos últimos siglos. Pese a su largo recorrido, aún están en plena evolución, demostrando que el esfuerzo investigador en el campo de la ciencia de materiales, tiene mucho que ofrecer para aumentar las capacidades resistentes y mecánicas de los materiales, más allá de lo que hace unas décadas se hubiera considerado posible. El acero, ya sea como material protagonista de la estructura o embebido dentro del hormigón, ya sea armado o pretensado, es vital en la actual concepción proyectual. Hoy no podemos imaginarnos un panorama constructivo sin la presencia del acero. Así toda mejora en sus capacidades redundará en una mayor eficacia de las soluciones constructivas adoptadas, al tiempo que una mayor libertad de actuación.

A partir de los aceros al carbono y los aceros inoxidable se han desarrollado una serie de materiales conocidos como “*superalaciones*”. Estos nuevos materiales se caracterizan por una excelente resistencia mecánica y fluencia, así como resistencia a altas temperaturas, estabilidad y una gran resistencia a la oxidación y corrosión. Las superaleaciones se caracterizan por tener una matriz austenítica¹⁷¹ y un elemento de superaleación de base de aleación, siendo generalmente: níquel, cobalto o níquel-hierro. Las aleaciones basadas en níquel, por regla general, poseen una composición química compleja, que puede llegar a incluir de 12 a 13 componentes¹⁷², en cantidades sumamente equilibradas para lograr las características requeridas. Las superaleaciones basadas en níquel, son las más empleadas en la actualidad por sus características mecánicas y físicas (alta resistencia, estabilidad, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y oxidación). Por su parte, las superaleaciones basadas en cobalto o “*estelite*” se emplean para la producción de herramientas de corte y aquellas que requieren una gran resistencia al desgaste.

Otro tipo de aleaciones sobre las que se está trabajando, son las de titanio, como las Ti-Al-V con adiciones de cromo y circonio, principalmente en el sector aeroespacial y la biomecánica, entre otras, por su resistencia mecánica a altas temperaturas, su resistencia extrema a la corrosión y resistencia al desgaste. Hay múltiples líneas de desarrollo en torno a las aleaciones basadas en el titanio, todas ellas sumamente específicas enfocadas en usos que requieren capacidades extremas del material. Solo los avances producidos en la ciencia de materiales y las líneas de investigación en curso, pueden ofrecer un contexto apropiado para muchos de los progresos acontecidos en los últimos años. Si bien la mayor parte de ellos se produce en sectores

¹⁷¹ La austenita, también conocida como acero gamma (γ) es una forma de ordenamiento específica de los átomos de hierro y carbono. Esta forma es estable a temperaturas entre los 900 y 1400°C. La austenita tiene una estructura cristalina cúbica, de caras centradas.

¹⁷² Las superaleaciones basadas en níquel contienen elementos como: cromo (Cr), aluminio (Al), titanio (Ti), cobalto (Co), boro (B), circonio (Zr) y carbono (C). A veces, los aleantes pueden ser: molibdeno (Mo), wolframio (W), niobio (Nb), tántalo (Ta) y hafnio (Hf). Además contienen pequeñas trazas de: selenio (Se), telurio (Te), plomo (Pb) y bismuto (Bi) e impurezas de: silicio (Si), fósforo (P), azufre (S), oxígeno (O) y nitrógeno (N).

como la aeronáutica, biomecánica... de todo ello se nutre la arquitectura, si no directamente, con el paso de los años y la adopción de materiales y técnicas. Si bien comienzan como medios ajenos, pronto se transforman en recursos vitales, capaces de modificar nuestro entendimiento de las limitaciones espaciales y las soluciones técnicas a adoptar.

Los productos derivados del acero, son vitales para el entendimiento del estadio tecnológico actual, así como para la comprensión del panorama arquitectónico y los rangos dimensionales actualmente empleados en arquitectura e ingeniería civil.

Además del acero, el otro gran material que interviene en el ámbito arquitectónico es el aluminio. Este material no va tanto enfocado a la consecución de grandes obras y grandes luces, sino más bien a la reducción del peso propio de la estructura¹⁷³, con resistencias similares a las de algunos aceros. Una reducción generalmente motivada por la itinerancia de la edificación, lo que condiciona cualquier decisión proyectual y constructiva, partiendo del material. Además este material tiene un mejor comportamiento ante la corrosión, ya que el aluminio en contacto con la atmosfera reacciona rápidamente con el oxígeno, cubriendo su superficie una delgada capa de óxido, que evita la corrosión.

El aluminio tiene un corto recorrido, enmarcado en los dos últimos siglos. Este material fue obtenido mediante electrólisis por primera vez en 1825 por Hans Christian Ørsted (1777-1851). La gran dificultad que entraña la producción del aluminio, es la gran cantidad de energía que requiere su producción, lo que llevó a que en 1900, aún fuese un desconocido, del que se consumían unas 8 toneladas al año. Actualmente la situación es muy distinta y este material se encuentra presente en todos los ámbitos productivos. En 2014, la producción mundial de aluminio alcanzó los 53,127 millones de toneladas¹⁷⁴, *“pudiendo considerarse como el gran competidor del acero para algunos usos estructurales”*¹⁷⁵.

“El aluminio estructural se empleó por primera vez en la construcción de puentes en 1933, para reemplazar el tablero colgado (incluyendo vigas, nervios, calzada y aceras) de las dos celosías lenticulares de 110 m. de luz del puente Smithfield Street, sobre el

¹⁷³ La densidad del acero es de 7.800 kg/m³ y la del aluminio 2.700 kg/m³, una diferencia que si la comparamos con la resistencia a tracción de los perfiles habitualmente empleados en construcción, la resistencia del aluminio oscila entre 370 y 520 N/mm² (perfiles laminados de acero A37, A42 y A52), mientras que la del acero oscila entre 250 y 300 N/mm². Así comparativamente para resistir un mismo esfuerzo, el peso de la estructura se ve considerablemente minorado. Esta reducción de los pesos convierte al aluminio en una de las principales opciones en automoción y aeronáutica, entre otros muchos campos.

¹⁷⁴ La producción mundial de aluminio ha sido obtenida de la web del International Aluminium Institute (www.world-aluminium.org).

¹⁷⁵ MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, *“Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI”*, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007, p. 26. (Afirmación realizada por Juan J. de Damborenea).

*Monongahela, en Pittsburg, construido cincuenta años antes*¹⁷⁶. Pero menos de dos décadas después ya se encuentran ejemplos de puentes realizados en este material: “El primer puente de carretera todo de aluminio se comenzó en el año 1948 y se terminó en 1950. Es un arco de 88 m. de luz sobre el río Saguenay, en Arvida, Quebec”¹⁷⁷. El ámbito de los puentes es un marco extremo de exigencia resistente, encontrándose proyectos durante estos años que emplean este material por su ligereza.

Al igual que en el acero las características del material van en función de los elementos con los que se combina para producir la aleación, en este caso: litio, magnesio, silicio, manganeso, cobre, cinc. Así cada una de estas aleaciones irá enfocada a un uso específico en función de sus características. En ellas se está avanzando para lograr mejorar las capacidades propias de cada uno, como en el caso de las Al-Li, que desde su aparición en los años 80 están superando el problema de baja tenacidad que lleva asociado, para ello se están buscando nuevas sustancias que intervengan en la aleación, así como tratamientos termomecánicos. Una de las grandes ventajas que llevan asociadas estas nuevas aleaciones es su soldabilidad, lo que abre nuevas líneas de aplicación y cambia el diseño de soluciones en este material. En arquitectura, las estructuras de acero pueden ser atornilladas o soldadas, una distinción que hasta hace escasos años no podía realizarse.

Actualmente los materiales no surgen de la prueba sobre el terreno, sino como un producto de laboratorio, fruto de una intensa investigación científica, que busca nuevas líneas para la producción futura. Ejemplo de ello sería un nuevo material basado en una microrretícula metálica, constituida por estructuras tubulares huecas, desarrollado por la empresa estadounidense Boeing¹⁷⁸ (Figura

Figura 92. Microrretícula metálica desarrollada por Boeing (2011).

92). Esta configuración espacial, le permite ser resistente, al tiempo que resulta 100

¹⁷⁶ BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979, p. 382.

¹⁷⁷ Ídem.

¹⁷⁸ Este material descubierto en 2011, tiene una microretícula regular, frente a otros materiales, como aerogeles, espumas metálicas... que tiene una estructura celular aleatoria, absorbiendo menos energía ante impactos, al tiempo que otorgan menor resistencia. La empresa Boeing ha hecho públicos sus resultados en el desarrollo de este material el 6 de octubre de 2015, exponiendo sus virtudes y potencialidades para futuras aplicaciones.

veces más ligero que la espuma de poliestireno (unos 200g/m^3). Este material permitiría, siguiendo una estructura similar a la de los huesos, constituir el interior de un material compuesto, que concentra el aspecto resistente de forma superficial, constituyendo elementos estructurales de gran ligereza. Este material tiene claras aplicaciones en la industria aeronáutica, pero otros medios de transporte y la arquitectura podrían llegar a aprovechar las ventajas que implica, tengamos en cuenta que en estructuras como los puentes, según se amplían los rangos dimensionales, el peso propio de la estructura adquiere mayor relevancia a la ahora del dimensionado, por lo que reducir este factor modifica las reglas del juego, ya sea ampliando los rangos dimensionales u otorgando mayor importancia a las cargas variables. Pero el conocimiento científico logrado en el laboratorio, tiene un largo recorrido hasta que su aplicación se hace efectiva en el marco productivo, por lo que muchos avances se dilatan considerablemente en el tiempo, mostrándonos al unísono las características de los materiales de los que dispondremos en un futuro cercano, así como las posibles líneas de actuación. Así precisamente en el conocimiento de estos avances, aún en un ámbito teórico o experimental, es donde encontramos las pinceladas de un futuro en ciernes y las claves para vislumbrar el marco en el que se desenvolverá la actividad proyectual en unos años.

- **Polímeros avanzados**

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de moléculas de menor tamaño o monómeros, que se encuentran conectados entre sí por enlaces covalentes. Generalmente los polímeros son de origen natural. Su uso no es algo reciente, ya que la madera, el cuero, las resinas, gomas y fibras naturales (lana, algodón y seda), se engloban dentro de este concepto. Pero durante el siglo XX, se han desarrollado polímeros sintéticos que han cambiado radicalmente la visión del mundo y los objetos

Figura 93. Fluid Vehicle Bus Station en Hoofddorp (Países Bajos), obra de NIO Architects (2003). Imagen del proyecto y el proceso de fabricación de los módulos de espuma de poliestireno en el taller.

cotidianos. Los primeros polímeros vinílicos, el neopreno, el estireno, el nylon... comenzaron a desarrollarse en la década de 1930.

Los polímeros sintéticos son plenamente un material del siglo XX y por tanto, como nuevos materiales exclusivos de los últimos tiempos y en pleno avance, son el conjunto que mejor define las características particulares de la contemporaneidad. Hoy todo el desarrollo digital resultaría impensable sin estos materiales, así como los objetos con los que convivimos a diario. Por su parte, la arquitectura ha adoptado este tipo de materias de manera más tangencial, como elementos auxiliares y de acabados, pero no como recurso estructural conformador de una solución global. En los albores del siglo XXI esta familia de materiales se está abriendo paso, aún de forma experimental en el ámbito arquitectónico, pero demuestran las virtudes de los nuevos materiales y las técnicas de trabajo que llevan asociadas. La Fluid Vehicle Bus Station (Figura 93) en Hoofddorp (Países Bajos) (2003), de NIO Architects es un claro ejemplo de la potencialidad expresiva de los nuevos materiales. El color y las formas empleadas dan buena muestra del reto volumétrico y las capacidades del material, producido mediante máquinas de control numérico en taller, desarrollando complejas superficies de doble curvatura, empleando como material base espuma de poliestireno, con un acabado exterior de poliéster. La imagen del proyecto transmite monolitismo, al tiempo que una percepción desvirtuada de su masividad, aparentando un gran peso propio, aunque realmente es sumamente ligero. Es una muestra sutil de las virtudes de una técnica, formando una imagen dinámica, con una clara función icónica.

Para comprender el desarrollo de los polímeros, primero hay que entender que son la suma de monómeros, unidos en largas cadenas mediante unos enlaces covalentes para formar grandes moléculas¹⁷⁹. La formación del polímero se basa en la repetición de unas unidades monoméricas¹⁸⁰, que condicionan todas las propiedades del material resultante. Todos los polímeros presentan una serie de características comunes a nivel molecular: una gran longitud, una gran anisotropía y una gran flexibilidad. Estas tres características son las que condicionan el comportamiento de los materiales poliméricos. En general presentan átomos de carbono como base de su estructura, siendo en su mayor parte derivados del petróleo.

En los polímeros, una de las principales variables a considerar, es el peso molecular, ya que este factor va directamente ligado con las propiedades físicas del material resultante. El alto peso molecular de los polímeros empleados, es lo que les confiere sus virtudes: gran viscosidad en disolución o fundido, capacidad de formar fibras o

¹⁷⁹ El proceso de unión de los monómeros para dar lugar a la cadena de polímero se denomina polimerización.

¹⁸⁰ Los monómeros son los compuestos de bajo peso molecular a partir de los cuales se obtienen los polímeros. La unidad monomérica es la unidad estructural o conjunto de átomos que se repite a lo largo de una macromolécula.

filmes, configuración de materiales elásticos¹⁸¹... Cuanto mayor sea el peso molecular, mayores serán sus virtudes físicas, al tiempo que se dificulta su procesamiento.

Hay dos grandes métodos para la síntesis de polímeros: la polimerización por adición y la polimerización por condensación¹⁸². La polimerización por adición se produce cuando el polímero se forma por la suma de monómeros sin pérdida de átomos, mientras que durante la polimerización por condensación se pierden átomos, generalmente en forma de pequeñas moléculas, como las de agua. Empleando estos dos procedimientos, la química orgánica ha logrado producir una gran cantidad de polímeros, con propiedades diferentes. Este hecho ha permitido que en los últimos tiempos este tipo de materiales se hayan universalizado, estando presentes en cualquier aspecto de la vida, actualmente vivimos en la *“Era de los Polímeros”*¹⁸³.

En función de los monómeros empleados en la formación de la macromolécula durante el proceso de polimerización, se puede distinguir entre:

- Los homopolímeros, aquellos en cuya formación de la macromolécula solamente ha intervenido un tipo de monómero, este tipo es el más sencillo y el más empleado.
- Los copolímeros¹⁸⁴, son aquellos en los que la macromolécula se forma a partir de dos o más tipos de monómeros distintos (2 monómeros - copolímero y 3 monómeros - terpolímero), en este caso las características del material resultante son una combinación de las que hubieran tenido los homopolímeros correspondientes a cada uno de los monómeros. Esto permite la confección de materiales con características previamente definidas por los usos a los que van a ser destinados. Las propiedades que pueden controlarse por este proceso son: el módulo de elasticidad, la tenacidad, la viscosidad en fundido y la estabilidad térmica. Este procedimiento guarda ciertas similitudes con los procesos desarrollados durante las aleaciones en metales, para lograr las características requeridas al metal resultante.

¹⁸¹ Al referirnos a materiales elásticos en este punto, nos referimos a materiales como el caucho, con una gran capacidad de alargamiento y alta resistencia a la rotura.

¹⁸² Algunos ejemplos de polimerización por adición son: el polietileno, el PEAD, el PEBD, el polipropileno, el PVC (Cloruro de polivinilo), el poliestireno, el policianuro de vinilo (poliacrilonitrilo), el PMMA (polimetimetacrilato de metilo), el teflón (politetrafluoroetileno)... Por su parte algunos ejemplos de polimerización por condensación son: las poliamidas como el Nylon, los poliésteres, las siliconas...

¹⁸³ El término *“Era de los Polímeros”* se ha acuñado durante los últimos años para definir nuestro periodo histórico, claramente marcado por la aparición de un nuevo tipo de materiales, los polímeros sintéticos, nacidos en el siglo XX y aún en pleno auge.

¹⁸⁴ Existen varios tipos de copolímeros dependiendo del proceso de polimerización y de las fracciones de las unidades monoméricas, distinguiéndose entre: copolímeros al azar, copolímeros alternados, copolímeros en bloque y copolímeros de injerto.

- Los polímeros entrecruzables se forman cuando el número de grupos reactivos del monómero es superior a dos, produciéndose durante la polimerización ramificaciones que llevan a uniones entre las diferentes cadenas. Así las diferentes cadenas reaccionan entre sí, dando lugar a una molécula gigante, insoluble e infusible. Este hecho hace que solo se pueda transformar el polímero una vez y ya no resulte reciclable. Sin embargo este tipo de materiales gozan de unas propiedades mecánicas y de resistencia química y térmica que los hacen insustituibles en muchas aplicaciones. Un ejemplo de este tipo de polímeros son las bakelitas, uno de los primeros polímeros comercializados. Hoy uno de los más empleados de este tipo, son las resinas epoxídicas, unos adhesivos empleados en diversos ámbitos, entre ellos la construcción.

Dos de las aplicaciones de mayor interés en el panorama actual son: las fibras de alto módulo elástico y las membranas.

- Fibras de alto módulo elástico: La capacidad de cristalizar de los polímeros depende de la regularidad interna así como de las fuerzas intermoleculares y factores cinéticos. Los polímeros cristalinos presentan extraordinarias propiedades mecánicas, ejemplo de ello son las fibras como: las fibras de carbono¹⁸⁵ y otras fibras de altas prestaciones, como las poliamidas aromáticas, entre las que destaca el Kevlar. En ambos casos se trabaja con módulos mecánicos parejos a los del acero, pero con densidades considerablemente inferiores, en el caso del Kevlar 1.450 kg/m^3 frente a los 7.800 kg/m^3 del acero¹⁸⁶. Esto lo convierte en una clara opción de futuro, pudiendo definir por ejemplo estructuras laminares que conformen cubiertas de grandes luces, con espesores y pesos sorprendentemente bajos. Actualmente existen aplicaciones del kevlar como revestimiento en columnas de puentes y edificios a modos de refuerzo, de forma paralela a las aplicaciones de la fibra de carbono.

Actualmente las fibras de carbono, en el ámbito estructural, se suelen emplear como un recurso de refuerzo en rehabilitación (Figura 94), dados los costes, que impiden la definición de un sistema global. Pero ya se han experimentado soluciones como pasarelas de bandas tesas (Figura 95) que aprovechan las capacidades del material y ofrecen vías de futuro para su aplicación. Las fibras de carbono son un recurso puntero, del que la industria se está nutriendo, aunque actualmente se encuentra en sus albores y quedan décadas para su empleo económico de forma generalizada.

¹⁸⁵ Las fibras de carbono se pueden dividir en función de sus propiedades, distinguiéndose: fibras de ultra-alto módulo (UHM) ($G_f > 450 \text{ GPa}$), fibras de alto módulo (HM) (G_f entre $350 - 450 \text{ GPa}$), fibras de módulo intermedio (IM) (G_f entre $200 - 350 \text{ GPa}$), fibras de bajo módulo y alta resistencia a tracción (HT) ($G_f < 100 \text{ GPa}$ y resistencia tracción $> 3 \text{ GPa}$) y súper alta resistencia (SHT) (resistencia a tracción $> 4,5 \text{ GPa}$).

¹⁸⁶ Con densidades ligeramente mayores la fibras de kevlar aumentan considerablemente su módulo mecánico. Si con densidades de 1.450 kg/m^3 se tiene un módulo de 150 GPa , con densidades de 1.900 kg/m^3 se alcanzan los 400 GPa .

- Membranas: una de las aplicaciones que actualmente resulta de mayor importancia es la desalación de agua. Desde los años 70 se ha producido su desarrollo industrial ligado a los métodos de preparación de membranas asimétricas por inversión de fase. Estas membranas, conforman una fina película porosa, con una alta resistencia mecánica que le permite soportar la presión del paso del agua de mar.

De forma pareja a como se filtra el agua de mar en las desaladoras, se emplea también para la separación de gases de interés industrial, principalmente: oxígeno, nitrógeno, amoníaco, cloro, etileno y propileno, estando estos gases entre los 10 productos más importantes a nivel industrial.

Los polímeros son la familia de materiales, que originados en el siglo XX, han marcado el comienzo del siglo XXI. Presentes a todas las escalas, son un recurso sin el que hoy no imaginamos nuestro entorno, condicionando nuestra forma de pensar y proyectar, aunque en el ámbito estructural no se encuentren presentes más que en contadas ocasiones y con un carácter aún experimental o accesorio. Pero dadas sus capacidades y los continuos avances que se producen en el sector, es cuestión de tiempo que un mayor abaratamiento o cambio de los condicionantes que coartan su uso, den paso a un nuevo recurso plenamente implantado en el panorama arquitectónico-estructural. Dadas las capacidades resistentes de las fibras de carbono y las poliamidas aromáticas como el Kevlar, su presencia claramente ha de ir ligada al marco de los proyectos de grandes luces y la reducción de las cargas de peso propio de la solución. La adopción en un futuro cercano de este tipo de materiales augura, entre otras cosas, una mayor libertad en la confección de arquitecturas ligeras.

Figura 94. Refuerzo estructural con el uso de Fibra de Carbono en el Puente Tollocan, en Toluca (México).

Figura 95. Puente de banda tesa, resuelto mediante cables de acero y losas prefabricadas de hormigón pretensado.

Durante los dos últimos siglos, los avances acontecidos en los materiales han justificado, en su mayor parte, el sustancial avance en la arquitectura e ingeniería civil, que han visto como los márgenes dimensionales en los que se desenvolvía su actividad, sufrían un incremento sin precedentes. Materiales como el hierro, el acero y el hormigón armado y pretensado han marcado la historia de la construcción, modificando la concepción arquitectónica y los términos en los que se define la espacialidad del hombre. Actualmente nos encontramos ante

un nuevo impasse, con los polímeros sintéticos, que han extendido su presencia a todos los aspectos de la vida del hombre, al tiempo que han marcado una línea en la que nuevos materiales gozan de características sorprendentes, de las que se puede valer la industria y la construcción.

“A pesar de que los materiales que nos rodean (metales, plásticos, cerámicas, cementos, etc.) son tan familiares, la Ciencia de Materiales es una ciencia nueva. Fue aceptada por primera vez como verdadera disciplina científica y académica en 1958.

Fue necesario el espectacular desarrollo de la física, la química y de otras ciencias básicas en el siglo XIX y primer tercio del siglo XX para que el conocimiento y uso de los materiales dejaran de ser un conjunto de habilidades tecnológicas, más o menos artesanales, heredadas de la experiencia acumulada.

El desarrollo científico y tecnológico y los avances en comunicaciones, tecnologías de la información, transporte, salud, ingeniería civil, industria energética, bienes de consumo, etc., de los últimos cincuenta años, no hubieran sido posibles sin el desarrollo de materiales, algunos de ellos desconocidos con anterioridad, como nuevas aleaciones metálicas, cerámicos avanzados, nuevos vidrios, polímeros, fibras sintéticas y materiales compuestos.

Hoy, la Ciencia de Materiales es una ciencia multidisciplinar, reúne los conocimientos y experiencias procedentes de la física y la química del estado sólido, la metalurgia, la química orgánica, ingeniería química, la geología e incluso de la biología.

En el futuro, el reto es conocido. El mundo posible que viene necesita forzosamente desarrollar tecnologías sostenibles de producción y consumo de energía, de transporte y comunicaciones. Necesita, además, extender los beneficios de este desarrollo al conjunto de la población mundial. Estas tecnologías requieren, entre otras cosas, nuevos materiales hoy inexistentes, con nuevas propuestas específicas cada vez más sofisticadas.

A pesar del camino recorrido, todo hace suponer que estamos sólo en el comienzo de una verdadera revolución, la de los Medios Materiales.”¹⁸⁷

Como bien expresan Carmen Mijangos y José Serafín Moya, la ciencia de materiales está en pleno avance y muchos de los productos aún no han demostrado todas sus aplicaciones, ni ha trascendido su auténtico potencial. Hoy los polímeros avanzados, son un referente y demuestran allá donde se aplican sus virtudes. A buen seguro su uso irá en aumento durante las próximas décadas y tomarán un papel más relevante dentro del panorama arquitectónico.

¹⁸⁷ MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, “Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI”, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007, contraportada.

2.5. Medios de representación. Cambios conceptuales ligados a los avances informáticos

La era digital, en la cual hoy vivimos, tuvo su momento de auge entre el gran público en los años 90, pasando las herramientas informáticas, de ser recursos sumamente costosos y especializados, con unas limitaciones aún muy marcadas, a elementos de fácil acceso, presentes a todas las escalas de la sociedad y con ello, incorporadas dentro de los márgenes de la cotidianidad¹⁸⁸. Este hecho, permitió la aparición de programas informáticos para el cálculo de las estructuras, en aplicación de los métodos de cálculo matricial existentes y los medios analíticos digitales precedentes. Así mismo vieron su apogeo los medios de representación digital¹⁸⁹ en sistemas 2D, que facilitaban la tradicional labor de los delineantes, que frente a los tiempos empleados anteriormente para el desarrollo de los planos, pueden producir un mayor compendio documental en un tiempo menor. Por su parte, los medios de representación 3D, han permitido definir arquitecturas que anteriormente solo podían existir en la mente de los arquitectos. Así en la década de los 90 comienza realmente la era digital¹⁹⁰, “trasladándonos

¹⁸⁸ Durante la década de 1990 los medios informáticos se universalizaron entre la población, pasando de ser elementos presentes en industrias y oficinas, a un elemento más en el hogar. Por su parte, durante la década del 2000, los medios informáticos han sufrido un proceso de humanización, pasando de los lugares de trabajo y el hogar, a formar una parte más del hombre, que lo complementa e integra dentro de la globalidad digital que se ha generado en los últimos tiempos.

¹⁸⁹ Si hay una compañía y un producto que podemos considerar como referente en el ámbito de la representación digital en arquitectura, es el programa AutoCAD de Autodesk. La compañía Autodesk fue fundada en 1982, pero sería necesario esperar a 1992 para ver la primera versión de AutoCAD y 3 años más tarde en 1995 la primera versión de éste para el sistema operativo Microsoft Windows. Éste fue el origen de un programa de representación gráfica que ha marcado la producción arquitectónica durante las dos últimas décadas.

Antes de que Autodesk sacara el programa AutoCAD basado en la plataforma Sun en 1992, esta empresa sacó en 1985 MicroStation, un programa de diseño asistido por computadora (*Computer Aided Design* o CAD), marcando las bases para el desarrollo de los programas de representación digital, tanto en el ámbito arquitectónico, como en otros.

¹⁹⁰ Como ya se ha mencionado con anterioridad, el primer “computador” fue desarrollado en 1936 por Honrad Zuse, se le llamó Z1, aunque había intentos previos, éste es el primero en poder ser denominado de esta manera. En 1942 la empresa ABC Computadores vio el potencial de este invento e invirtió en él, desarrollando un ordenador con fines comerciales el “*Harvard Mark I*”. Durante los siguientes 10 años, la investigación en este ámbito se intensificó y con la aparición del transistor se revolucionó éste, surgiendo ordenadores como el ENIAC 1, que requerían de 20.000 válvulas para funcionar. En 1953 aparece una nueva empresa que influirá decisivamente en la evolución de los ordenadores, IBM (International Business Machines), que desde su primer ordenador el “*IBM 701 EDPM*” intentó introducir los ordenadores en el mercado de las empresas. A partir de este punto las empresas dedicadas a este sector se fueron multiplicando, sumando avances hasta alcanzar el nivel tecnológico ante el que hoy nos encontramos.

de un mundo de átomos a un mundo de bits”¹⁹¹, la proyectación se traslada a este soporte e influye sobre la propia concepción arquitectónica (Figura 96). Como expresa Richard Moreta Castillo¹⁹² cuando cuenta que *“para ejecutar un proyecto de diseño hace uso de premisas de diseño, es decir conceptualiza su estudio y prioriza aspectos como la función, el contexto, las variables culturales, las condiciones socio-económicas, la tecnología que debe aplicar, y finalmente, crea una convergencia armónica entre estos factores”*¹⁹³.

Hay una serie de hitos clave a la hora de comprender los orígenes de la era digital, tal y como la concebimos hoy en día:

- La invención del algoritmo, como *“conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema”*¹⁹⁴. Un recurso bien conocido desde hace muchos siglos, que en estas últimas décadas ha sido la base para la creación de los conjuntos de rutinas sobre los que se estructuran los sistemas informáticos.
- La invención de la computadora, desde el primer ejemplo desarrollado en 1936, se ha producido un incesante aumento de sus capacidades, así como una reducción de los precios y tamaños necesarios. De este proceso parte primeramente en la década de los 90, la citada universalización de dichos medios, apareciendo con el cambio de siglo una humanización de estos elementos, paulatinamente dejan de ser solo herramientas a las que se recurre, para formar parte de nosotros mismos y nuestra forma de vida. Este punto influye, tanto sobre la concepción

Figura 96. Infinity Tower, la torre principal del nuevo Centro de Conferencias de Grand Cancún, Isla artificial (Cancún, México), un proyecto de Richard Moreta Castillo (2012).

Por lo tanto, se contempla la década de los 90 como el comienzo de la era digital, en base a la universalización de dichos medios, pasando de los sistemas analógicos a los digitales.

¹⁹¹ NEGROPONTE, Nicholas, *“Ser Digital”*, Barcelona (España), Ediciones B, 1995.

¹⁹² Richard Moreta Castillo ha centrado su trabajo en el ámbito de la arquitectura digital. Sus diseños han llegado a enmarcarlo como *“escultor de monumentos”*. Es uno de los pioneros en el mundo de la arquitectura digital, hecho que le ha dado prestigio dentro del panorama internacional.

¹⁹³ GARCÍA, Daniel, *“Arquitectura digital”*, Bogotá (Colombia), Revista AXXIS, 2014.

¹⁹⁴ Definición de algoritmo según el diccionario de la Real Academia Española.

de los espacios arquitectónicos del siglo XXI y la presencia e interacción con estos medios, como la influencia sobre las pautas de conducta de la gente y la modificación de medios y parámetros para el diseño de los proyectos.

- Los lenguajes de programación¹⁹⁵, desde sus orígenes, han sido el conjunto de procesos por los cuales se rigen las computadoras, estableciendo las bases para el aprovechamiento de este soporte. En base a ellos se instauran el conjunto de rutinas por las cuales se hace posible por ejemplo el cálculo matricial informatizado o los medios de representación, herramientas que en conjunto han influido de forma incuestionable en el panorama arquitectónico.

¹⁹⁵ Los lenguajes de programación son considerablemente más antiguos que las computadoras. Uno de los primeros ejemplos lo encontramos en 1801, con la máquina del telar de Jacquard, cuyos movimientos estaban dictados por los orificios marcados en unas tarjetas perforadas, pudiendo modificar el patrón, cambiando la correspondiente tarjeta. Éste es un primer ejemplo de programación de una máquina, al que le seguirían muchas otras.

Charles Babbage (1791-1871), un matemático británico inventó una “*maquina analítica*” (1833-1842), una máquina capaz de ser programada para realizar cualquier tipo de cálculo, considerada la primera computadora de la historia, basada en el sistema de tarjetas perforadas. A Babbage se le considera como el padre de la computación.

El sistema empleado por Babbage a principios del siglo XX encontró nuevas aplicaciones, logrando codificar información en tarjetas, aplicable en los ticket del tren o en el control de las jornadas de los obreros.

Los primeros lenguajes de programación estaban marcados por las limitaciones del sistema de tarjetas, por lo que para encontrar un lenguaje de programación moderno ya tenemos que remontarnos a la aparición de las primeras computadoras en la décadas de 1940, como propuestas e intentos que darían lugar en las décadas de 1950 y 1960 a los primeros lenguajes de programación modernos: FORTRAN (1955), LISP (1958), COBOL (1959), RPG (1959), APL (1962), Simula (1962), SNOBOL (1962), BASIC (1964) y PL/I (1964), entre otros.

La mayor parte de los lenguajes de programación empleados actualmente se originaron a finales de la década de 1960 y la década de 1970: Logo (1968), Pascal (1970), Forth (1970), C (1972), Smalltalk (1972), Prolog (1972), ML (1973), Scheme (1975), SQL (1978). Estos lenguajes se consolidaron y perfeccionaron durante la década de 1980, dando lugar a algunos de los lenguajes más importantes, que continuarían en la siguiente década: C++ (1980), Ada (1983), Common Lisp (1984), MATLAB (1984), Eiffel (1985), Objective-C (1986), Erlang (1986), Perl (1987), Tcl (1988), Mathematica (1988)...

Durante la década de 1990 se produjo un nuevo cambio con la aparición de internet, modificando el terreno de juego, apareciendo lenguajes de programaciones para esta plataforma totalmente nueva. Uno de los lenguajes que rápidamente se hizo popular, integrándose en los navegadores web, es Java (1995) y JavaScript (1995). Durante esta década no se produjeron grandes novedades, pero sí un perfeccionamiento de conceptos previos.

Este campo continua evolucionando para dar respuesta a las problemáticas contemporáneas, ya con unas bases claramente asentadas.

- Implantación de internet y la World Wide Web. Durante la década de 1990 las computadoras dejaron de ser entes aislados, para pasar a formar parte de un inmenso conjunto, en el que el tráfico de información ha hecho posible, entre otras muchas cosas, la difusión de obras y conocimiento con una celeridad y alcance, como los medios analógicos habían sido incapaces de alcanzar. Así mismo este soporte al que se le ha denominado como *“la nube”*, es un medio en el que todo el mundo se encuentra conectado. En respuesta a las exigencias que a este respecto se presentan en los albores del siglo XXI, la arquitectura responde con sistemas y aplicaciones que permiten el control de la domótica de la vivienda, a través de estos medios. Se modifican las interacciones entre el hombre y la arquitectura, al tiempo que ésta se transforma a todas las escalas, desde la concepción hasta las pautas de utilización¹⁹⁶.

La era digital por lo tanto, ha supuesto una liberación de las limitaciones innatas a la humanidad, que claramente nos impedían el avance más allá de lo analizable y representable. Desde esta perspectiva la arquitectura, al igual que otros campos, ha sufrido una revolución. Libre de sus cadenas, la proyección de la arquitectura en las últimas décadas, se ha caracterizado claramente por un marcado énfasis y ensalzamiento de las nuevas proezas factibles, lo que en muchos casos ha ido ligado a un ensalzamiento de la técnica que la hace posible. Este hecho ha dado lugar a arquitecturas sorprendentes, enmarcadas claramente en un periodo histórico de optimismo y superación de horizontes. Pero hoy nos encontramos ante un panorama distinto, con un margen digital y técnico a cada momento más avanzado, pero con grandes limitaciones económicas y exigencias marcadas por la situación social. Este panorama exige del proyectista un esfuerzo reflexivo, entendiendo el acto proyectual como aquella respuesta enfocada en el cumplimiento de unas exigencias previas y un aporte personal ligado a la superación de un estadio previo o un aporte que redunde en una mejora de la espacialidad del hombre, todo ello tomando con mesura los alardes técnicos, ajustados a las necesidades funcionales, representativas...

Si bien, actualmente las posibilidades expresivas de los medios digitales son claramente un hecho liberador para la proyección arquitectónica, en términos generales la definición proyectual mediante planos, no ha cambiado radicalmente frente a los medios manuales anteriores. Los planos son producidos por otros medios y permiten la definición de formas anteriormente inviables, pero conceptualmente han permanecido firmes, como medio de definición proyectual. Hoy los sistemas BIM (Building Information Modelling) representan un cambio global en el entendimiento de la representación proyectual, el modelo 3D desarrollado por medios digitales, ya no solo es una representación virtual de la obra acabada o un instrumento reflexivo durante la fase de ideación, sino que se constituye como elemento único de referencia en el proyecto. Un cambio en el modelo, instantáneamente modifica todos los planos del proyecto, así como el cálculo de la estructura, eficiencia energética, mediciones... En definitiva es una virtualización de todos los aspectos constructivos del proyecto (Figura 97),

¹⁹⁶ La domótica es el conjunto de sistemas que tienen por objeto la automatización de la vivienda, gestionando aspectos como: la energía, seguridad, factores higrotérmicos y comunicación. Estos sistemas redundan, tanto en un mayor bienestar de los usuarios, como en un mayor control e interacción con la arquitectura.

al punto de convertirse en un elemento único de referencia, que otorga unas garantías de la congruencia de toda la documentación, facilitando además la producción de ésta. Los sistemas BIM conceden un mayor control del proyecto, que permite a su vez un diálogo más fluido entre el estudio de arquitectura y las constructoras, facilitando la competencia y el control del gasto.

Hoy los sistemas BIM permiten unificar todos los aspectos concernientes al proyecto, unificando el acto proyectual en un único modelo, al tiempo que se evitan las interferencias e incompatibilidades que pueden llegar a producirse mediante la concepción del proyecto por partes, diferenciando estructura, instalaciones, espacialidad y acabados, al tiempo que se estiman los gastos de funcionamiento de la edificación durante su vida útil.

Los sistemas BIM son el medio de representación de la edificación del siglo XXI, incorporando a la construcción todas las ventajas de los medios digitales, sin el lastre de las concepciones predigitales de los procesos de proyección (Figura 98). El programa ArchiCAD¹⁹⁷ incorpora el concepto BIM desde 1987, mientras que Autodesk lo hace desde 2002¹⁹⁸. Aunque los orígenes conceptuales del BIM los encontramos ya en la década de los 70, no es hasta los comienzos del siglo XXI cuando se difunde su uso. Aunque actualmente es una minoría la que lo emplea, los cambios de concepción son un proceso lento y llevará un tiempo la adopción unánime de este proceder, como cambio en los procesos de proyectación en el estudio de arquitectura.

Figura 97. Representación mediante un software BIM del conjunto de instalaciones de un edificio.

Figura 98. Representación mediante un software BIM del conjunto de la estructura de un proyecto de grandes luces, pudiendo ver instantaneamente las distintas secciones del proyecto desde el modelo 3D.

¹⁹⁷ El programa ArchiCAD, pertenece a la empresa húngara Graphisoft. La incorporación inicial del concepto BIM en su programa se originó en 1987, apareciendo bajo el nombre “Virtual Building”.

¹⁹⁸ La empresa Autodesk compró a Revit Technology Corporation en 2002, incorporando con ello entre sus programas en concepto BIM.

Hoy las capacidades para conformar cualquier tipo de espacialidad y más si cabe en el margen de las grandes luces, resultan un factor liberador, influyendo en el factor económico y la ética constructiva, siendo los que dictaminan los márgenes en los que se desenvuelve la proyección arquitectónica actual.

Como se ha visto, el otro factor decisivo que ha marcado los comienzos del siglo XXI y claramente progresa en ese sentido, es la integración de los medios digitales como parte del hombre, conectándolo mediante una serie de dispositivos a internet. Al tiempo la arquitectura, aún de forma lenta, sigue esa tendencia con los actuales productos que ofrece la domótica, aunque con el rápido progreso de ésta, este tipo de actuaciones se han visto superadas con celeridad¹⁹⁹, marcando una clara tendencia, en la que a través de dispositivos móviles, los usuarios son capaces de establecer un control sobre su entorno e interactuar con la arquitectura de una forma desconocida hasta hace escasos años. Este hecho impone nuevas exigencias, añadidas a los condicionantes previos del proyecto, así como un nuevo campo para el desarrollo arquitectónico. Estando el proceso proyectual en ese mismo impasse, entre la tradición y la adopción del entorno digital como marco único de trabajo y pensamiento, en el que no solo se representan volumetrías, sino entornos funcionales.

Por lo que respecta a las grandes luces, los medios digitales han supuesto una liberación formal de las actuaciones. A eso hay que añadir la ampliación de los límites espaciales, debida al profundo conocimiento del comportamiento interno de las estructuras que otorgan estos medios. En este aspecto ha resultado menos relevante, sobre las limitaciones dimensionales, ya que los esquemas previamente desarrollados y con medios de análisis abarcables para el cálculo manual, ya alcanzaban las limitaciones impuestas por los materiales, por lo que de estos depende dicha frontera.

Soluciones técnicas como el arco, son sobradamente conocidas y eficientes a la hora de conformar grandes luces, los medios informáticos aunque en algunos casos pueden haber influido en su conformación y diseño, son conceptualmente un invariante, gracias a que sus formas se fundamentan en un razonamiento resistente, universal y atemporal. Hoy hay innumerables soluciones técnicas y formales que hace unas décadas pertenecían al campo de la imaginación del arquitecto, cuando hoy son una realidad gracias a los medios digitales. Se abre el abanico para la implantación de nuevas técnicas, diseños y procesos de proyectación, en definitiva es un factor vital para la comprensión de los condicionantes que actúan en la actualidad en el estudio a lo largo del proceso proyectual y en especial en aquellos proyectos pertenecientes al ámbito de las grandes luces (Figura 99).

Todo el conjunto de avances acaecidos durante los dos últimos siglos justifica gran parte de los cambios acontecidos en edificación y en especial durante las últimas décadas, en las que los

¹⁹⁹ Al introducir la domótica, el control informático de varios aspectos del funcionamiento de ésta y estar conectada a internet, al igual que ocurre con otros dispositivos, hace a este sistema vulnerable a los ataques de hackers, que pueden llegar a tomar el control de la vivienda, oficina... Así a la hora del desarrollo de las soluciones domóticas, aparece sumado al hardware el software, un aspecto en el que a día de hoy queda más camino por recorrer, hasta lograr convertir este tipo de soluciones en la vía general para la producción espacial del nuevo siglo.

avances conceptuales de la arquitectura en general han sido muy limitados, más allá de la adopción de las ventajas de materiales, técnicas, medios digitales... fruto de la investigación científica. Si antaño el hombre basaba su producción en las experiencias acumuladas, hoy lo hace en los avances frutos de la investigación científica. Este hecho no solo modifica la forma en que se adoptan y producen los cambios, sino en el proceso de pensamiento y los condicionantes que marcan la producción arquitectónica. La arquitectura y la ingeniería civil, pasan de ser un campo de pruebas del que surgen técnicas y materiales, a un consumidor de unos avances, en muchos casos producidos en respuesta a una necesidad previa, presentada desde estos mismos ámbitos.

Figura 99. Veles e Vent en Valencia (España), obra de David Chipperfield Arquitectos y b720 Arquitectos (2005-2006). Este proyecto consta de varias losas postensadas de gran canto, que cubren luces de 30 metros y voladizos de 14 metros, generando la imagen de “*planos flotantes*”.

3. Taxonomía proyectual ligada a los proyectos de grandes luces

Cuando se realiza un proyecto arquitectónico nos encontramos ante un problema complejo, que debe dar respuesta a aspectos muy diversos, configurándose como un ente interdependiente del marco social, dando una solución global a las exigencias del hombre y a aspectos funcionales concretos. A diario habitamos este mundo que paulatinamente hemos ido transformando, para adaptarlo a nuestras necesidades, pero pocas veces nos planteamos los procesos que han llevado a que el mundo sea tal y como hoy lo concebimos. En este aspecto las estructuras de grandes luces forman una parte sustancial de nuestra realidad. En capítulos anteriores hemos visto como las estructuras de grandes luces han evolucionado hasta nuestros días y la importancia que este proceso tiene en nuestra forma de percibir el mundo. Ha llegado el momento de preguntarse cuales son los factores que influyen en el empleo de las grandes luces en la arquitectura de las últimas décadas. Desde este punto de vista es imprescindible el análisis y clasificación de los proyectos, atendiendo al tipo de proceso germinal, que rigió sobre el desarrollo de su concepción, ya que este proceso puede llegar a clarificarnos las herramientas con las que cuenta un estudio de arquitectura cuando acomete un proyecto de grandes luces y las ventajas que estos tienen sobre uno de luces convencionales. Esta taxonomía permite, entre otras cosas, establecer un orden en los procesos de pensamiento que dan lugar a los proyectos de grandes luces, como medio de interpretación de las obras arquitectónicas y una vía para la comprensión los factores que las originaron. Esta ordenación de los procesos de proyectación, puede servir de referente a la hora de acometer nuevos proyectos de grandes luces, pudiendo conocer las herramientas con las que se cuenta, así como las complejidades que cada uno de los tipos proyectuales expuestos lleva asociado.

Todo proyecto arquitectónico es resultado de un marco complejo y un amplio abanico de consideraciones que determinan su conformación. Este hecho resulta sumamente patente en el ámbito de las grandes luces, como marco extremo, tanto de la técnica, como del diseño espacial. En los extremos se hacen más notorios los conceptos estructurantes del proyecto y por consiguiente, las líneas de actuación. Bajo esta premisa se pueden dividir los proyectos en función de las consideraciones en torno a las que se ha estructurado la propuesta. Así el proyecto puede analizarse, tanto desde su concepción exterior, en terminos volumétricos, como desde el interior, atendiendo a su espacialidad. Por otra parte las grandes luces pueden tener una finalidad distinta de la conformación espacial o volumétrica pura, atendiendo a factores representativos, haciendo de la conformación visual el marco para un diálogo enfatizado con el entorno y con las personas que contemplan la obra. Todos estos factores no son excluyentes los unos de los otros, sino distintas visiones de un objeto, entre las que se distingue la más representativa y definitoria de la obra. Así la conformación de un volumen exterior claramente representativo, puede conjugar que en su interior se desarrolle una propuesta espacial de un nivel parejo, para conformar la unidad compleja que es el proyecto.

Desde el punto de vista de la espacialidad exterior de la obra, se trabaja en términos dialécticos, siendo vital la comprensión de la obra desde el entorno. La interpretación de los volúmenes, establece un proceso paralelo a la clásica lectura de las fachadas, que han constituido los paramentos en las urbes como reflejo de su historia y las preocupaciones y circunstancias relativas a un momento concreto. En este caso el proyecto juega con la percepción que el usuario tiene de la gravedad y la espacialidad cotidiana, estableciendo un contrapunto, que marca la lectura que éste hace de la obra, así como su atracción sobre ésta. Se puede hablar de obras que buscan su lugar en la trama urbana o en el entorno, así como un nexo con el usuario, ajeno a su interior.

La espacialidad interior, busca en el usuario de la obra una reacción, al tiempo que responde a problemáticas funcionales. Se hace posible el desarrollo de actividades deportivas bajo cubierta, así como el tránsito de personas sin interferencias... Pero el hecho de conformar espacios de grandes luces, lleva generalmente relacionada una intencionalidad representativa, como claramente se percibe en las estaciones de ferrocarril, que usa este recurso espacial, pese a no resultar necesario desde el punto de vista estrictamente funcional. En las estaciones de ferrocarril o los aeropuertos, se aplica este recurso espacial, como acto representativo de la urbe en la que se encuadra o una proyección de lo que se considera la espacialidad ideal pensada para el cumplimiento de una función. Proyectos como el de la Terminal 4 Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, bien podrían resolverse con mallas de pilares de un rango dimensional medio, pero en su lugar suelen emplear estructuras de grandes luces, que hacen del interior un microcosmos que sirve de tránsito entre el entorno y el medio de transporte al que se encuentra dedicado.

Como ya se ha comentado, el uso de las grandes luces, lleva en buena parte de los casos, asociado un deseo de representatividad, pudiendo llegar a ser este hecho parte estructurante del proyecto, ya sea como medio de expresión de la idea materializada o de una entidad ajena a la propia construcción. A lo largo de los siglos, los templos han honrado, a través de este recurso espacial, a una entidad superior, al tiempo que han materializado unos espacios a la altura de las creencias de un colectivo y donde poder profesar sus oraciones. Se logra ensalzar la relevancia de unas creencias a través de la producción arquitectónica, como reflejo de la propia fe. Hoy de forma pareja se erigen sedes de corporaciones, que ajenas a la religiosidad buscan ensalzarse a través de la producción arquitectónica. Si siglos atrás el poder se expresó a través de los paramentos, hoy se expresa con los volúmenes y los espacios, que empleando las herramientas espaciales de las grandes luces, establecen un claro reto a la cotidianidad y medio de ensalzamiento de quien lo ostenta.

A continuación se procederá a explicar, en detalle, cada una de estas tipologías proyectuales, en función de aquel germen ideológico en torno al que se estructura el proyecto, siendo conscientes de que raramente es una línea única, siendo el resultado proyectual una combinación de varias de las consideraciones expresadas posteriormente.

3.1. Volumen exterior. La arquitectura como configuración de volúmenes bajo la luz

Cuando hablamos de volumen y espacio diferenciamos entre continente y contenido. En estos términos al tratar sobre el volumen se estudia la expresión del continente, esté o no relacionada formalmente con los espacios que alberga en su interior. El volumen definido por las edificaciones es, tanto la expresión de la obra arquitectónica al exterior, como el límite del espacio público, una distinción que puede resultar esencial, en tanto en cuanto se trabaja en esta barrera como fundamento proyectual. El espacio público es el área en el que todos convivimos en mayor medida, apareciendo las edificaciones como matizaciones dentro de la trama. Se constituyen extremos como las viviendas, representación máxima de los espacios privados e íntimos de la vida humana, así como otros espacios de carácter semipúblico o público. Todos estos espacios arquitectónicos ejercen como un apéndice de la espacialidad urbana, con funciones específicas que actúan como órganos, que posibilitan el funcionamiento del conjunto. Según este entendimiento de la ciudad y del entorno, se percibe la volumetría de las edificaciones como medio dialéctico de expresión al exterior. Las edificaciones pueden mostrar su función, o matizar la experiencia de la urbe, sirviendo de foco de atención que aglomere usos. Este tipo de expresión mediante las grandes luces, es empleado, tanto por obras de carácter público, como privado, pudiendo llegar a aparecer en un campo como la vivienda, como medio de interpretación social de la espacialidad semipública de los espacios intermedios entre la edificación y la ciudad.

Las tipologías espaciales enmarcadas en el ámbito de las grandes luces, se constituyen en la actualidad como entes dialécticos, que buscan una expresión volumétrica de la idea arquitectónica. Este hecho se encuentra en todo caso enlazado con el mismo uso de la edificación y sus capacidades de éxito, como propuesta concreta a una problemática preestablecida, así como proposición espacial. A lo largo de los siglos las edificaciones se han vestido de ornamentos en busca de una expresión concreta al entorno, mostrando: ostentación, poder, austeridad... Con esta interpretación tradicional se concibieron los espacios de grandes luces a lo largo del siglo XIX, mostrando este tipo de recursos como elementos de integración en el panorama arquitectónico del lugar. Esta perspectiva cambió radicalmente a comienzos del siglo XX, con la aparición del Movimiento Moderno, lo que supuso una ruptura con la expresión tradicional, mostrando las formas puras de la arquitectura. Este racionalismo arquitectónico trajo consigo una nueva interpretación del papel de los volúmenes edificados como medio de expresión, encuadrándose las grandes luces como un reto gravitatorio y medio de exaltación máxima de la forma construida. Por lo tanto, este recurso establece un énfasis expresivo que marca puntos de atracción y hace de la obra un icono, suscitando un mayor interés y persuasión sobre los viandantes, que no necesariamente usuarios de la edificación.

Si bien en los comienzos del Movimiento Moderno era un medio apenas empleado por la complejidad que implicaba su incorporación en el proyecto, actualmente estos recursos de

diseño espacial se encuentran enmarcados dentro de los límites de lo abarcable para la inmensa mayoría de las tipologías funcionales de las edificaciones, así como desde el factor económico. Este último punto, si bien resulta determinante a lo largo de toda la historia, es más relevante en el panorama definido por nuestra contemporaneidad constructiva. La importancia de la interpretación volumétrica de la arquitectura establecida por el Movimiento Moderno, queda patente en las palabras de Le Corbusier al decir que *“La arquitectura es el juego sabio, correcto y magnífico de los volúmenes bajo la luz”* o *“¡La arquitectura es el juego de formas más genial, correcto y magnífico que existe!”*. La conformación volumétrica de la edificación, sustituye dialécticamente a todo ornamento y las grandes luces forman parte vital de este nuevo lenguaje.

Por todo lo comentado anteriormente, queda patente que al atender el estudio al volumen exterior de la edificación, se trabaja principalmente en la *“imagen”* de ésta, pasando los espacios por ella conformados a formar parte de esta lectura exterior, que busca dar voz a la materia. Al encarar este reto, se enfrenta la comprensión tradicional de los espacios y de la transmisión de cargas al terreno, heredera de los muros de fábrica y sistemas compresivos, cuyas formas y funcionamiento se encuentran en el subconsciente colectivo, con los sistemas estructurales actualmente disponibles, que pueden hacer de este hecho interpretativo una labor menos directa. Se pasa de una piedra apoyada en otra, a elementos que contrariamente a su masividad no parecen encontrar un sustento proporcional. Así el volumen se expresa a través de la conformación de su masa y su sustentación como medio de establecer un diálogo con el entorno y el transeúnte.

Desde un apartado perceptivo, podemos diferenciar distintos tipos de conformaciones volumétricas básicas, atendiendo a la relación del volumen con el terreno y por tanto con la imagen de la transmisión de las cargas. Esta gradación puede diferenciar tres categorías estructurantes:

3.1.a. Volumen suspendido

En esta tipología proyectual, prevalece ante el resto de condicionantes la *imagen de ingravidez*. Ésta puede ser representada, tanto por un volumen ligero que parece flotar como parte de su propia naturaleza o bien por un volumen claramente masivo aparentemente levitando. Así se produce la representatividad del volumen edificatorio mediante la contraposición de opuestos. Las masas y los vacíos actúan como dos polos, cuya variación modifica radicalmente la lectura del conjunto. Desde el punto de vista de la materialidad de la obra, se diferencia entre los extremos de lo ligero a lo masivo. En cada caso se establece un menor o mayor distanciamiento con su opuesto. Así el aire bajo el volumen elevado y sobre el que visualmente parece sustentarse, adquiere una nueva significación. De esta manera aquellos volúmenes más ligeros, como en el caso de las cubiertas ligeras, desarrolladas en las últimas décadas por Schlaich Bergermann und Partner, emplean formas de gran liviandad que parecen alzarse en el aire como si una simple brisa las elevara. Un ejemplo de este hecho es la cubierta del Estadio Olímpico de Múnich (Alemania) (Figura 100), realizado por los arquitectos Günther Behnisch y Frei Otto y los ingenieros Jörg Schlaich y Rudolf Bergermann. En este caso concreto, la malla de cables pretensados configura una estructura similar a las láminas de hormigón, pero buscando prevalecer el estado tensional opuesto, sustentando una piel consistente en

Figura 100. Estadio Olímpico de Múnich (Alemania), obra de los arquitectos Günther Behnisch y Frei Otto y los ingenieros Jörg Schlaich y Rudolf Bergermann (1968-1972).

una lámina de poliéster revestida de PVC²⁰⁰, esta solución genera una imagen etérea del elemento constructivo, que parece desvanecerse y flotar sobre los graderíos. Nos encontramos ante una cubierta ligera que se eleva como si de un globo se tratase, algo aparentemente acorde con su naturaleza. El caso opuesto lo encontramos en aquellos volúmenes cuya masa los relaciona en mayor medida con el terreno, como parte de éste que se alza y por un tremendo virtuosismo lograra escindirse de éste, sustentándose sobre una franja de aire que se ve claramente comprimida y según se produce un alejamiento de la cota del terreno va modificando su esencia y su impacto visual. Podríamos encontrarlos delante de una montaña, algo masivo, que levita sobre nuestras cabezas, como la razón no nos permite comprender. El material grávido se presenta al espectador aparentemente levitando, sin dejar entrever las leyes que rigen su funcionamiento, negando su propio reto contra la gravedad, como si dicha lucha no resultase un esfuerzo ímprobo que condiciona cada decisión del proyecto. De esta manera, al ocultar tras el velo de la confusión las herramientas de la razón, nos encontramos con la magia y la emoción, cual magos en un espectáculo de prestidigitación. Ejemplo de ello es el ya citado Caixa Forum de Madrid (Figura 101), obra de Herzog & de Meuron, donde el museo se alza y se entierra para dejar la cota de calle libre, como parte del espacio público, incitando a la gente a acercarse y contemplar el reto espacial de la obra, como un desafío a su propia concepción de las reglas constructivas, que han de contemplar como algo “mágico”, resultado del estadio técnico sorprendente en el que nos encontramos.

Los proyectos así concebidos, centran todo su interés en este efecto, que generalmente suele percibirse desde el exterior, quedando los espacios interiores en un segundo plano, que si bien son la razón de la existencia del edificio, y por tanto de relevancia, no pueden entenderse como prioritarios desde el punto de vista conceptual, ya que incluso desde ellos resulta extraño que llegue a percibirse ese reto a las leyes que rigen nuestra existencia.

Si realmente queremos entender los entresijos que se ocultan tras el ilusionismo gravitatorio, debemos ser conscientes de partida de la importancia de la gravedad en nuestra percepción del mundo, ya que *“El hombre experimenta el espacio en el que vive como asimétrico. Entre las infinitas direcciones del espacio tridimensional en las que puede moverse en teoría, una dirección se distingue por la fuerza de gravedad: la vertical. La vertical actúa como eje y sistema de referencia para todas las demás direcciones”*²⁰¹. De ahí su importancia como referencia espacial para nuestra lectura del mundo. Tan sistemáticamente se produce esa lectura, que a simple vista se puede discernir si algo es estable o inestable, posiblemente este proceso haya surgido a lo largo de la evolución como un medio de supervivencia, que nos evita

²⁰⁰ Actualmente para la cubrición de este tipo de estructuras podemos elegir entre varios materiales que se clasifican en función de su impacto económico sobre el proyecto, englobando el tejido empleado, el revestimiento y la capa de acabado: Poliéster + PVC + Acrílico (Muy bajo), Poliéster + PVC + PVDF (Bajo), Poliéster + PVC + Tedlar (Bajo), Fibra de vidrio + Silicona (Medio), Fibra de vidrio + PTFE + FEP (Alto), PTFE + PTFE (Muy alto), ETFE (Muy alto).

Por su parte la durabilidad de estas soluciones varía, desde los 10 años de la más económica, a 30 años en las soluciones de mayor coste.

²⁰¹ ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), p.30. (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

correr riesgos innecesarios al distinguir lo que supone un peligro en nuestro entorno. Precisamente porque este proceso se encuentra tan enraizado en nuestra psique, ciertas actuaciones pueden resultar tan perturbadoras. Un ejemplo clásico de ello, es el campanario de la catedral de Pisa²⁰², que con su fallo de cimentación ha llegado a estar inclinada 4° con respecto a la vertical, una desviación suficiente, no solo para que de proseguir pueda estar en riesgo su estabilidad, sino para que además nuestra mente lo entienda como algo anómalo y peligroso, que reta las formas dictadas por la gravedad, de verticales y planos horizontales. Por lo tanto, el reto de este tipo de estructuras no es solo con la mencionada gravedad, sino con nuestra percepción de la misma.

Este tipo de proyectos suelen servirse de la utilización de grandes voladizos, que impiden la percepción de los medios de sustentación, como ocurre en la Maison à Bordeaux (Figura 102), obra de Rem Koolhaas, en la que se concibió como un volumen que “*debía flotar*”, contando con la experiencia de ARUP y, en concreto, de Cecil Balmond, quien fue el encargado del cálculo y diseño de la estructura de esta vivienda. Este hecho supuso un factor clave, que permitió que ese punto de partida acabara siendo realmente la imagen final que se nos presenta. Para que este efecto fuera real, lo primero fue determinar dónde debía apoyarse, disponiéndose en un extremo un pórtico, mientras que en el otro se descolgaba de una viga de

Figura 101. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron y NB35 ingeniería (2002-2008).

²⁰² Vulgarmente denominada Torre de Pisa.

cubierta apoyada en un mástil descentrado, contando en uno de los extremos de la viga con un tensor que centra las cargas en el soporte. La suma de todos estos elementos configura una imagen no solo ingrátida, sino incluso con un aparente desequilibrio, como si se encontrara al borde de la inestabilidad, que lo haría caer. Este efecto no solo es el deseado, sino que hace referencia al propietario y su estado de salud²⁰³, alusión que el propio Koolhaas hace al respecto, sobre el equilibrio cogido con alfileres que representa la vivienda. Pero tan importante como el cuidado de los medios de sustentación, es la concepción del volumen superior, como un prisma de hormigón, al que se le realizan pequeñas perforaciones circulares, otorgándole al elemento un aspecto masivo, resuelto gracias, entre otros factores, al empleo del postensado y la concepción del muro perimetral como viga de canto, en un esquema de difícil lectura intuitiva. Esta obra ejemplifica a la perfección el intento de esta tipología proyectual de sorprender al espectador y poner sus instintos en cuestión con lo que ven sus ojos.

En las edificaciones catalogadas como *“volumen suspendido”*, el volumen edificatorio ha perdido los nexos visuales con el terreno o han sido relegados a un segundo plano, apareciendo la edificación como un juego de volúmenes, masas y gravedad. Por ello como se ha expuesto podemos distinguir entre:

Figura 102. Maison à Bordeaux, Burdeos (Francia), obra de Rem Koolhaas / OMA (1994-1998).

²⁰³ El propietario que encargó la realización de la Casa de Burdeos (1994-1998), obra de Rem Koolhaas / OMA, había tenido un grave accidente de coche que lo dejó en silla de ruedas, hecho que le llevó al encargo de esta vivienda, como un lugar especial que no le recordara su minusvalía y que cumpliera el deseo que transmitió al arquitecto cuando le dijo, *“yo no quiero una casa sencilla, quiero una casa compleja, porque la casa definirá mi mundo”*.

- Ligereza

En este caso el volumen suspendido se encuentra claramente definido por su liviandad, lo que encuadra el elemento construido en un apartado más acorde con su esencia aérea. El reto gravitatorio pasa a un segundo plano ante la contundencia formal y la desmaterialización de la misma frente a los modelos clásicos de cubrición. En este apartado las estructuras pasan de la resistencia física a la resistencia de la forma. Empleando los fundamentos expuestos en las estructuras laminares se conforma una amplia familia de cubiertas ligeras, donde forma y resistencia son parte de un mismo concepto. Este tipo de soluciones configuran sólidos casi inmateriales, que se disponen como cubiertas de patios²⁰⁴ u otro gran número de aplicaciones prácticas. Este tipo de estructuras llevan el material al límite, exigiéndole al arquitecto e ingeniero un *“esfuerzo superior de un espíritu mecánico que descubra nuevas formas de armazones resistentes para la actual construcción”*²⁰⁵. Así se configuran cubiertas tan sumamente ligeras que parecen pañuelos inmóviles, flotando sobre la edificación, basando su resistencia en el factor de forma, lo que permite la optimización de la cantidad de material.

La ligereza se puede entender como un *“factor material”*, tal y como se ha expresado, o en una lectura más amplia, como aquellas, que encontrándose o no optimizada busquen un juego perceptivo, en el que el volumen construido parezca tan liviano, como si su naturaleza fuera levitar en el aire. Así parecería como si su esencia estuviera construida en el viento y éste pudiera arrastrarlo en su corriente. Precisamente estas dos lecturas, la ligereza real y la ilusoria, configuran los dos grupos que podemos diferenciar en esta tipología proyectual. Esta diferenciación surge conjuntamente de la expresión sincera de la estructura y la forma resistente, planteándose de forma paralela proyectos que encuentran en este apartado su medio de expresión formal, que no razonamiento resistente.

Ligereza real

Este tipo de proyectos se encuentran estrechamente ligados a la optimización de las estructuras, para lograr hacer *“más con menos”* y en consecuencia el factor de forma resulta un punto vital a tener en cuenta, ya que como decía Eduardo Torroja: *“La obra mejor es la que se sostiene por su forma y no por la resistencia oculta de su material. Esta última es siempre fácil, es la primera por el contrario, la que es difícil. En ella reside*

²⁰⁴ En el caso de proyectos como las cubriciones de patios, el contacto entre la edificación y la cubierta, así como la transmisión de cargas a estos se hace patente, aunque se percibe como independiente de la edificación a la que se encuentran enlazadas, hecho por el cual se encuadran en este apartado. El espacio generado bajo estas cubiertas es un interior, aunque tiene un carácter cercano al de un exterior, guarecido de las inclemencias meteorológicas por la etérea presencia de la cubierta.

²⁰⁵ CARDELLACH, Félix, *“Filosofía de las estructuras”*, Barcelona (España), Editores Técnicos Asociados S.A., 1970, p.8

*el mérito, la fascinación de la búsqueda y la satisfacción del descubrimiento*²⁰⁶. Esta búsqueda de optimización nos lleva a las estructuras laminares de hormigón²⁰⁷, que si bien no las podríamos englobar en la categoría proyectual que nos atañe, representan los orígenes de las estructuras laminares de doble curvatura.

Por otra parte los avances en los materiales y en la industria, producidos tras la Segunda Guerra Mundial, posibilitaron que a mediados del siglo XX, Richard Buckminster Fuller erigiera la primera cúpula geodésica del mundo, de 4,2 metros de diámetro, construida empleando tubos de aluminio y unas láminas de vinilo en forma de tetraedro, como superficie exterior. Este ingeniero visionario, desarrolló durante el resto de su vida impresionantes sistemas de cúpulas geodésicas, que representaron un avance considerable en la concepción espacial y de la ligereza de las estructuras, que podían cubrir un gran espacio, con una cantidad mínima de material.

Por lo que respecta a las mallas tubulares o de listones, conformadas como superficies laminares de doble curva, nos

Figura 103. Reforma del British Museum, Londres (Reino Unido), obra de Foster and Partners (1999).

²⁰⁶ TORROJA MIRET, Eduardo, opinión citada en la Tesis doctoral de Don Jesús Anaya Díaz *“La búsqueda de un modelo industrial. El acceso de una nueva concepción técnica a la arquitectura española de la primera mitad del siglo XX”*, Madrid, E.T.S. Arquitectura (UPM), 2004, p. 329.

²⁰⁷ Las estructuras laminares de hormigón son un medio eficiente para cubrir grandes espacios con un uso mínimo de material. Ciertamente este tipo de soluciones se pueden encuadrar dentro del concepto de *“cubiertas ligeras”*, aunque en el marco técnico actual resultan una opción considerablemente más masiva que las soluciones enmarcadas dentro del ámbito de las cubiertas ligeras, que emplean el acero como material resistente, ya sea como barras o cables y la cubrición materializada mediante vidrio o mayormente aquellos materiales como: Poliéster + PVC, Fibra de vidrio + Silicona, ETFE... Así si bien los principios resistentes orientan a encuadrar este tipo de solución dentro de este término, la percepción material impide tal catalogación dentro de nuestra clasificación en los términos en los que se está tratando.

referimos en este punto, como el refinamiento y condensación de diversas técnicas, que logran realizar superficies casi inmateriales, para cubrir grandes espacios. Una vez tenemos claro el ámbito técnico que da lugar a esta tipología proyectual, es necesario tener en cuenta la exigencia que motivó su utilización, estableciendo el control del peso como el factor y condicionante fundamental del proyecto. Actualmente encontramos un buen número de proyectos que se hallan en esta problemática, al intentar cubrir patios de edificios existentes y en la gran mayoría de los casos con un valor histórico indiscutible, que limita la intervención sobre los mismos. Así se plantea el problema de cubrir un espacio sin influir en el medio que lo soporta. Este tipo de estructuras logra un curioso resultado estético, al establecer una tensión entre el edificio inmóvil a través de los años y la nueva cubierta, que tamiza la luz que llega al edificio. Se establece una dialéctica constructiva entre las técnicas empleadas en cada momento histórico y los resultados estéticos asociados a cada periodo, como representación de lo aceptable y deseable socialmente. Un buen ejemplo de ello es la cubierta del patio del British Museum (1999) (Figura 103), realizada por Foster and Partners, que modifica radicalmente la concepción de este patio, transformándolo en un nuevo interior²⁰⁸, apareciendo la edificación casi como uno de los lienzos que en él se exponen. Para materializar esta superficie de doble curvatura de trazado toroidal, se ha empleado una malla triangulada, partiendo los radios de la edificación situada en el centro del patio, otorgándole una

Figura 104. Marquesina en el acceso a la estación de ferrocarril de Ulm (Alemania), obra de Schlaich Bergermann und Partner (1992).

²⁰⁸ El espacio conformado tras la implantación de la cubierta conceptualmente se encuentra en un punto intermedio entre un exterior y un interior, aunque de forma estricta sería un interior. Entendido como exterior, la cubierta aparecería como un volumen casi inmaterial, que permite regular las condiciones higrotérmicas y transformar radicalmente la experiencia bajo ella.

mayor importancia visual, ya que el firmamento que cubre el patio te orienta hacia dicho volumen como foco de atención. Éste es un gran ejemplo de cubrición de patios de edificios históricos. Esta tipología proyectual es mucho más amplia y atañe a cuantas obras buscan, al igual que en la que hemos visto, una ligereza extrema, con el fin de no interferir en el resto del conjunto edificatorio.

Las cubiertas ligeras cuentan con grandes ventajas, desde el menor gasto de material y menor impacto estructural sobre el medio en el que se implanta, hasta las repercusiones sobre el usuario, tanto desde el apartado visual, como la lectura que de ellas se realiza en términos espaciales. Como se ha visto esta tipología resolutive engloba desde grandes estadios, a patios y obras de diversa índole, como marquesinas, como en el caso de la Marquesina de la Estación de ferrocarril de Ulm (Alemania) (Figura 104). En este caso los soportes extremos se duplican para formar un triángulo que conforme un punto de anclaje fijo a la altura de la cubierta, sustentando en cada extremo unas vigas de las que se descuelgan unas bandas tesas de 24 metros de luz, sobre las que se apoyan los paneles de vidrio. Ésta es una solución estructuralmente muy optimizada, reduciendo el gasto de material al mínimo, generando una superficie curva que parece levitar ante la gran diferencia escalar con los medios de sustentación empleados, que visualmente resultan nimios en comparación. Las bandas tesas son un medio radicalmente distinto de resolución estructural, pero al igual que en las estructuras laminares, hacen uso de la forma para resistir, aunque en este caso esté determinada por las cargas y las tensiones introducidas. La resolución estructural, se ve como medio de expresión de la idea arquitectónica, la solución técnica se percibe como un elemento bello. En este caso concreto, la marquesina, exenta en la plaza se percibe casi como una tela tensada desde sus extremos, aunque la realidad resulte alejada de dicha materialidad. Se matiza un fragmento de la plaza, guareciendo de las inclemencias meteorológicas, al tiempo que su presencia casi inmaterial hace del espacio comprimido bajo ésta un ambiente lleno de disparidades dialécticas (compresión y liviandad), que lo convierten en un espacio rico. Las

Figura 105. Cubierta del Estadio Marschweg, Oldenburgo (Alemania), obra de Kulla Herr und Partner y la ingeniería Schlaich Bergermann und Partner (1995).

reducidas dimensiones de la intervención no merman su impacto en el lugar, marcando el acceso a la estación, expresándose la forma a través de la técnica. Obras como ésta son vívido ejemplo de las virtudes de un entendimiento de la producción arquitectónica, propio de nuestro tiempo.

El mencionado Estadio Olímpico de Múnich pertenecería igualmente a esta categoría, al concordar su esencia resistente con la expresión visual, que hace de la volumetría de la cubierta una manifestación de ligereza y racionalidad constructiva, empleando técnicas y materiales punteros en el momento de su ejecución.

Los ejemplos comentados se basan en superficies de doble curvatura, capaces de resistir gracias a este hecho con el empleo de soluciones de gran ligereza, que combinan barras metálicas y elementos superficiales, sean de vidrio o de polímeros. Frente a ellos se encuentran las arquitecturas textiles, que mediante el empleo de barras y cables pretensados logran tensar la tela para conformar la cubrición con un aspecto igualmente liviano, aunque con un carácter bien distinto. Ejemplo de ello sería la cubierta del Estadio Marschweg, Oldenburgo (Alemania) (Figura 105), en la que la membrana textil modular, desde el perímetro rectangular de cada módulo desciende hasta el soporte, logrando la curvatura y tensión necesarias. Cada uno de estos módulos de 23 metros de largo y 9,25 de ancho se sustenta sobre un único soporte, dejando un vuelo de 17,6 metros en una dirección y 5,6 metros en la otra. En la cara entre módulos se dispone un tubo que permite el tensado de la tela teniendo en cuenta, para su funcionamiento, la presencia de los módulos laterales, siendo imprescindible en los extremos la disposición de un elemento auxiliar que ejerza la tensión equivalente. Esta solución otorga una imagen de gran ligereza, que claramente recuerda a estructuras como la del Hipódromo de la Zarzuela de Eduardo Torroja Miret, (diseñado en 1934-1935 y construido entre 1935 y 1941) (Figura 106), que con

Figura 106. Hipódromo de la Zarzuela, Madrid (España), obra de Eduardo Torroja, Carlos Arniches Moltó y Martín Domínguez Esteban (1934-1941).

láminas de hormigón armado enfrenta una problemática espacial similar²⁰⁹, estableciendo un antecedente histórico, aunque en el caso de la estructura textil, la membrana tiene que estar sometida a un pretensado para el mantenimiento de su forma y la resistencia de las cargas, recurriendo a cables cuyo tensado establece un control preciso sobre el estado tensional de la estructura. Así el método para la resolución estructural se fundamenta en un concepto resistente distinto, pero ambos tienen una conformación espacial similar. En los dos casos su lectura es bien distinta dada la patente ligereza de los materiales empleados en la solución del estadio Marschweg, frente a la cubierta de Eduardo Torroja, en la que la masividad del material se ve reducida gracias a la fineza estructural de la lámina. En el caso de la estructura textil de la que se habla, existe una interdependencia entre los módulos, para el tensado lateral, en el caso de la estructura laminar de hormigón se contaría con esta misma interdependencia, si cada uno de los módulos no contara en la parte superior con unas barras de acero que permiten compensar los esfuerzos laterales, haciendo de cada unidad un ente autónomo. En el caso de la estructura laminar el usuario no puede percibir el canto de toda la sección, solo observando el del perímetro, que marca la imagen del proyecto, en cambio en las estructuras textiles se hace patente el espesor, así como las costuras y refuerzos que indican de forma inconsciente los puntos de mayor concentración de tensiones, dotando a la imagen de la cubierta de una sinceridad resolutive, que hace gala del apartado técnico, la conformación espacial y la ligereza intrínsecamente ligada a estos sistemas estructurales. Entre uno y otro ejemplo han cambiado los materiales y la resolución técnica, aunque en ambos el esfuerzo espacial va en una línea común. Las cubiertas ligeras son un conjunto proyectual reciente que hace uso de las capacidades propias del momento y esto marca su conformación y lectura, imposible en otros tiempos.

El pretensado y el factor de forma se establecen como las herramientas estructurales básicas para las cubiertas ligeras. Ambos términos originarios del siglo XX y vitales en el marco arquitectónico de las últimas décadas, donde los materiales, los medios de cálculo y los sistemas digitales han configurado el panorama ideal para que aparezcan soluciones de este tipo, como respuesta a un abanico de problemáticas en las que la optimización de la estructura y la consecuente liviandad son aspecto esencial para su funcionamiento e implantación. Este tipo de soluciones se establecen como una respuesta plenamente contemporánea, encontrando sus orígenes históricos en la década de 1960, aunque sus principios se remontan a fechas anteriores, en otros marcos tipológicos.

²⁰⁹ Es necesario recordar que en el caso del Hipódromo de la Zarzuela se carecía de medios de cálculo suficientes para su correcta resolución numérica, por lo que se opta por el ensayo de modelos a escala 1:1. En palabras del Propio Eduardo Torroja: *“para un ojo medianamente acostumbrado a este tipo de estructuras resultaba claro que esta forma de lámina era apta para resistir bien los esfuerzos y el fenómeno estructural que se le pedía (...) quizás lo más interesante de esta estructura era la imposibilidad de desarrollar un cálculo analítico perfecto de la misma, pero que ello no justificaba una negativa a su empleo, ya que las ventajas de ligereza, de adaptabilidad al fenómeno resistente y de efecto estético parecían evidentes.”*

Actualmente el panorama arquitectónico exige una racionalidad constructiva, que permita una contención de los costes, este tipo de soluciones van en esta línea, al tiempo que posibilitan una expresión formal y un claro impacto sobre los usuarios de la edificación. Ha de hacerse notar, que en las obras de este tipo, el estudio de arquitectura ha de actuar conjuntamente con el estudio de ingeniería encargado de definir al detalle la resolución estructural de la propuesta, ya que el campo de trabajo exige una gran especialización para su correcta resolución. La relevancia de dicha colaboración resulta evidente al contemplar las obras de este tipo realizadas hasta la fecha, ya que el papel de los ingenieros estructurales se hace evidente y estudios como ARUP, Schlaich Bergermann und Partner o NB35 ingeniería, entre otros, adquieren un papel igual de relevante que el del estudio de arquitectura responsable del proyecto. La relación entre ambos actores, en la labor proyectual, debe ser una suma de valores y no una imposición infructífera entre ambos, como erróneamente parece haberse entendido en muchas ocasiones. El arquitecto goza del conocimiento para la conformación espacial y la coordinación de todos los factores que hacen del proyecto un ente vital, capaz de transmitir emociones a los usuarios al tiempo que responden a una funcionalidad. Por su parte los ingenieros estructurales, pueden adaptar esa proposición a una realidad resistente, ajustando el recorrido de éstas y la conformación material de los elementos atendiendo a los análisis numéricos que muestran una realidad paralela a la contemplada por los arquitectos. La suma de ambos hace de la obra un ente unitario bien coordinado, como la maquinaria de un reloj, que encuentra en su precisión y expresión funcional la belleza y manifestación formal.

Ligereza ilusoria

Esta tipología resolutive centra su atención en el gesto, dejando el apartado de la resolución estructural como elemento secundario. La expresión arquitectónica surge de una formalización de una idea arquitectónica, no influenciada condicionalmente por las consideraciones resistentes, que en el apartado anterior eran las que justificaban la materialización proyectual como una línea de pensamiento única, coincidente con la resolución formal. La exteriorización de la ligereza emplea las referencias visuales de la anterior, aunque no goce de una optimización tan extrema de los elementos resistentes. En este ámbito tipológico nos encontramos ante volúmenes²¹⁰ y una masa visual muy inferior a la que le correspondería, aparentando ser menos densos que el aire, lo que conlleva a que asociemos en nuestra percepción que dichos objetos flotan. La resolución estructural suele ser igualmente ligera, aunque esa consideración pasa a un apartado secundario frente a la materialización del efecto perceptivo de “*ligereza*”.

²¹⁰ En el apartado anterior tratamos superficies, que tenían una expresión volumétrica, frente a los proyectos englobados en el apartado “*ligereza ilusoria*”, que conforman volúmenes, percibidos desde el exterior como elementos de gran ligereza de forma independiente a su resolución, pudiendo ser ésta realmente una solución ligera o no.

La resolución de este tipo de proyectos suele ir enfocada a la conformación de volúmenes, cuya materialidad es generalmente blanda, como las estructuras textiles, disponiendo éste a una altura elevada, que lo desliga del suelo, empleando medios de sustentación aparentemente insuficientes para el volumen conformado, generando el efecto de que la edificación tuviera una densidad menor a la del aire y en lugar de sostener los soportes la cubierta, realmente estuvieran anclándola al terreno para que no saliera volando. Se materializa una metáfora arquitectónica expresada con las herramientas técnicas propias de la contemporaneidad y consideraciones en los márgenes de la libertad expresiva de los últimos años.

Encontramos numerosos ejemplos de esta tipología, en muchos casos logrados con cubiertas textiles, sustentadas por medios muy diversos, desde cables a cerchas. Un gran ejemplo de ello es el Guthrie Pavilion (1995-1998) de Ken Yeang (Figura 107). En este proyecto se erigen tres grandes soportes, de los que descuelgan los cables que sustentan las vigas perimetrales de acero de las que se tensan las telas. Pero esta estructura perimetral sería incapaz de resistir las tensiones transmitidas por las telas sin la incorporación de unas cerchas interiores que permiten mantener la forma del conjunto inalterable. Toda esta tramoya resistente permanece oculta tras la membrana textil que da terminación inferior al volumen. Por lo que respecta a la cara superior del volumen, está conformada mediante una chapa plegada²¹¹, que otorga impermeabilidad al conjunto. Así se combinan dos tipos resolutivos por un deseo expresivo puramente volumétrico, ya que la lámina textil sería suficiente para la resolución técnica de la

Figura 107. Guthrie Pavilion, Selangor (Malaysia), obra de TR Hamzah & Yeang (1995-1998).

²¹¹ La parte superior del volumen emplea chapa plegada por la imposibilidad de emplear telas, ante la falta de adaptación de su forma de trabajo y la conformación volumétrica deseada, ya que de emplear telas, éstas deberían anclarse a las cerchas perpendiculares, lo que desvirtuaría la imagen tersa y unitaria deseada por el arquitecto.

propuesta, pese al problema para el drenado del agua, derivado de la elección formal. Por su parte la superficie superior de la cubierta, de forma independiente resultaría igualmente autónoma, sin problemáticas relativas al funcionamiento, aunque sin la entidad expresiva que logra en conjunto la solución empleada. En este proyecto se potencia la expresión de la cubierta, al entenderse como elemento exento e independiente del resto de la edificación. El edificio se configura como una entidad libre en el territorio, en respuesta a un requerimiento funcional, que encuentra su expresión en el entorno, mientras sobre ella permanecen inmóviles dos volúmenes alargados, que como si de unas nubes se trataran guarecen a la edificación de las inclemencias del lugar, proporcionando sombra y refugio, así como una lectura más amplia desde el territorio. La cubierta está pensada para ser contemplada, tanto desde el lugar, como desde la lejanía. El esfuerzo formal y estructural relativo a esta *“ligereza ilusoria”*, permite transformar, tanto el entendimiento de la edificación, como ampliar su rango visual, estableciendo un icono en el territorio, que sirve de carta de presentación ante el mundo, denotando libertad y poder, ante el claro reto a los estándares gravitatorios que han establecido el entendimiento clásico de las formas en arquitectura. La cubierta asemeja a un ave que se hubiera posado y en cualquier momento pudiera levantar el vuelo, actuando como elemento unificador del conjunto, de control climático y componente estético capaz de materializar la metáfora de la nube que se convirtió en arquitectura y agració al hombre con sombra y frescor allá donde se necesitaron. Así el esfuerzo económico requerido para la conformación de esta cubierta, innecesaria desde el punto de vista meramente funcional, se ve claramente recompensado, suponiendo un foco de atracción así como un manifiesto arquitectónico de libertad expresiva²¹², solo factible en las últimas décadas.

Eladio Dieste (1917-2000) decía, *“No veo «modelos» por imitar; veo algo mucho más incitante: un camino y sé que tengo brújula”*. Este ingeniero uruguayo desarrolló a lo largo de su trayectoria la cerámica armada como un nuevo entendimiento estructural, generando láminas similares a las desarrolladas por Eduardo Torroja o Félix Candela, pero empleando fábrica de ladrillo y una armadura metálica. En su obra emplea en ocasiones soluciones postensadas, similares a las de Eugène Freyssinet. Ante él se presentan recursos que emplea magistralmente haciendo del factor técnico el centro de su obra y su expresión arquitectónica. Al igual que Dieste, en el marco arquitectónico se nos presentan gran número de recursos técnicos y materiales, los cuales debemos ver con la mente del explorador, que busca ir más allá de la repetición, haciendo propias las soluciones adoptadas. Esta percepción del ámbito proyectual es válida, tanto desde el punto de vista de la solución resistente adoptada, como en el caso de la resolución formal.

Un proyecto que resulta reseñable, tanto por su interpretación volumétrica de la implantación en el territorio de un estadio de fútbol, como por el esfuerzo reflexivo

²¹² El Guthrie Pavilion hay que entenderlo como representación de un club de campo y por tanto un icono de lo deseable y de aquella libertad que buscan las personas que van a él, como medio liberador de la rutina diaria.

sobre el recorrido y la espacialidad interior del recinto deportivo, es el estadio de fútbol Omnilife (2007-2010) (Figura 108), obra de VFO arquitectos, antes llamado HOK (Hellmuth, Obata & Kassabaum). Esta obra se plantea como centro de la labor proyectual, la conformación de una experiencia deportiva vital, no es un lugar donde contemplar meramente un evento deportivo, sino un lugar donde apreciar la experiencia en su conjunto. Se genera un ritual, que prepara al asistente para el disfrute del evento, distanciando al espectador del mundo exterior, significando lo especial de este lugar, enalteciendo la relevancia del acontecimiento deportivo. Las soluciones relativas a las grandes luces, se aplican a diversas escalas y en distintos puntos, resultando la obra como una combinación de varios de los puntos que posteriormente se desarrollarán. Por lo que respecta al aspecto que se está tratando, el volumen exterior de la edificación trabaja claramente desde dos puntos de vista, el terreno y la cubierta. El volumen de las gradas se presenta al exterior como un recrecimiento del terreno, como una loma con vegetación, ocultándose en la lejanía como parte del paisaje natural. Por su parte la cubierta de las gradas, se alza como una nube blanca textil, un elemento blando que parece flotar. Los soportes que la sustentan, pasan a un segundo plano perceptivo ante la entidad volumétrica de la cubierta. Se constituye un gran volumen con materiales y colores que permiten percibirlo como un elemento ligero, como una *“nube inmóvil”*. La realidad constructiva difiere de tal percepción, estando conformado por una serie de cerchas, que conforman tanto una serie de anillos, como los elementos perpendiculares que forman la sección ovoide. La solución estructural permanece oculta, permitiendo generar el mencionado efecto, como una escenografía enfocada a asombrar al espectador, una sorpresa que sin duda matiza la experiencia arquitectónica y deportiva de aquellos que viajan a ver el espectáculo, y se encuentran ante algo más.

Como se ha visto, la ligereza ilusoria centra su atención en el efecto escenográfico, más que en la resolución resistente. Ambos factores se desarrollan al unísono para la conformación del proyecto como materialización de la idea pura del arquitecto, con una clara finalidad representativa y funcional, que incide, tanto en la experiencia de la edificación, como en el éxito de la intervención, pudiendo conformarse como un foco de atracción que repercute en la actividad contenida en la edificación.

Figura 108. Estadio de fútbol Omnilife o “Estadio de Las Chivas de Guadalajara” (México), obra de VFO arquitectos (2007-2010).

- Masividad

Las arquitecturas masivas tienen en su origen, hacer alarde de la contundencia de sus formas y la densidad del material. Cuando estas formas están en contacto con el terreno, parecen ser una transformación o humanización de éste, pero cuando entran en juego las herramientas espaciales de las grandes luces, surge el reto estructural y espacial. Se trasgrede la imagen de la cotidianidad formada a través de los siglos, así como la interpretación que la sociedad hace de la obra, como parte del marco urbano, se pone en tela juicio la interpretación que la sociedad hace de la arquitectura, resultado de un conocimiento cultural colectivo inculcado con el paso de los años. Las estructuras marcadamente masivas, siempre han estado enraizadas en la tierra, por lo que cuando dichos nexos se rompen perceptivamente, aparece la “*magia*” de la levitación. Una mole levitando establece dialécticamente una contradicción perceptiva, capaz de suscitar en el usuario una cierta intranquilidad, que contrasta con las formas claramente estables, que transmiten un estado de calma. Así mismo el reto materializado origina el interés de los transeúntes, tanto por la sorpresa del descubrimiento, como por el interés suscitado por el espacio en tensión constituido entre la espacialidad del hombre y el terreno²¹³.

Esta tipología se establece como el lenguaje propio de la expresión del reto técnico ante la realidad material de la arquitectura. En el caso de las cubiertas ligeras se ve una concordancia dialéctica, mientras que en este caso se hace alarde del contraste y disonancia, como medio de ensalzamiento. Frente al claro ámbito de aplicación de las cubiertas ligeras, innato a su naturaleza, las estructuras masivas ven en el desafío, su medio de expresión y su razón de ser. Obras como la Maison à Bordeaux (Francia), obra de Rem Koolhaas / OMA (1994-1998), refleja esta realidad, elevando el volumen de las habitaciones, el espacio más íntimo de la vivienda, desligándolo del terreno y estableciéndolo como elemento de expresión en el territorio²¹⁴. Este volumen resuelto en hormigón, de un particular tono rojizo, solo se encuentra perforado por pequeñas ventanas circulares, que permiten entender como una unidad masiva el volumen. Se busca la potenciación del efecto relativo al volumen suspendido. En esta obra se pone especial énfasis en la lectura indirecta de los medios de sustentación, centrando en este aspecto buena parte de la atención proyectual, como medio de expresión resistente del proyecto, así como parte fundamental para la lectura del conjunto. Algunas de las

²¹³ Al hacer esta afirmación, se matiza la tensión entre un volumen suspendido, enteramente conformado en respuesta a las necesidades del hombre, con el terreno, que pudiendo estar adaptado por éste, pertenece a otro ámbito perceptivo. Los espacios conformados en el terreno se encuentran enraizados en éste, mientras que el volumen elevado busca una separación perceptiva de dicho nexo.

²¹⁴ El proyecto de la Maison à Bordeaux al ser un proyecto de vivienda unifamiliar, no cuenta con unas dimensiones que permitan incluirlo en el ámbito de las grandes luces, pero emplean en su resolución un buen número de herramientas y conceptos de este ámbito, con un tratamiento magistral. Este hecho hace que pese a sus proporciones, se considere un proyecto de esta categoría y un ejemplo digno de análisis. Así mismo, es un ejemplo de la extrapolación de un proceso de pensamiento y diseño espacial propio de las grandes luces a un marco inicialmente ajeno, haciendo patente la potencialidad y la universalidad de los conceptos tratados como medio de resolución espacial del proyecto.

variables de los soportes son: su emplazamiento, proporciones, terminación exterior y estado tensional. En este caso concreto, la obra tiene en sus raíces el interés por una conformación espacial compleja, enfocada en la creación de un microcosmos interesante en sí mismo²¹⁵, sin referencias exteriores, definido en el recinto de la parcela, en medio de una zona boscosa, donde su expresión visual solo alcanza a los propios usuarios. La obra no busca expresarse al mundo, sino establecer las reglas y referencias expresivas, dentro de su ámbito de actuación, como un manifiesto de las pautas que regulan el pequeño mundo que configura. Este proyecto tiene como centro al hombre, estableciendo el marco para su vida, desplazamientos y lecturas del lugar.

La Maison à Bordeaux es una obra resuelta por medios poco convencionales dentro de su ámbito tipológico, mostrando nuevas opciones y potencialidades en dicho marco de actuación. Este proyecto tiene claras referencias conceptuales del High-Tech, como muestra buena parte de la obra de Rem Koolhaas²¹⁶, así las ventajas técnicas y tecnológicas propias de la contemporaneidad ven su expresión y exaltación visual como parte del proyecto. En esta obra se hace patente la relevancia del papel del estudio de ingeniería en la resolución proyectual, sin la presencia del estudio de ingeniería Arup²¹⁷ y el ingeniero Cecil Balmond, no hubiera adquirido la magnitud expresiva que presenta. La precisión y juego formal y estructural son el resultado de una compenetración en la realización del proyecto por ambos actores de forma coordinada, la ingeniería no es un mero recurso para el dimensionado de los elementos estructurales, sino un segundo

²¹⁵ Los propietarios de esta casa eran una pareja adinerada de Burdeos, que vivía con sus tres hijos en una gran casa del centro de la ciudad. Tenían las ilusiones puestas en construirse una nueva casa, pero el marido sufrió un desafortunado accidente de tráfico, que por poco le cuesta la vida, dejándole impedido en una silla de ruedas. Los dos años siguientes al accidente, los vivió en la prisión en que se convirtió su actual casa. En este momento se plantearon nuevamente su deseo de construirse otra vivienda, pero esta vez como medio de liberación. Buscaron durante un tiempo al arquitecto que les construiría su nueva casa, decantándose finalmente por Rem Koolhaas en 1994.

Cuando discutieron con él como deseaban que fuera su nueva casa, el marido dijo, *“yo no quiero una casa sencilla, quiero una casa compleja, porque la casa definirá mi mundo”*. Este deseo de crear un mundo independiente y rico en la casa, se refleja en todos los aspectos del proyecto.

²¹⁶ Las cuatro figuras más relevantes del High-Tech son: Norman Foster, Renzo Piano, Richard Rogers y Nicholas Grimshaw.

²¹⁷ Arup Associates en la actualidad es una de las empresas de ingeniería civil y construcción metálica más importantes del mundo. Esta empresa fundada en 1946 por Ove Nyquist Arup (1895-1988), tiene un marcado papel en el diseño arquitectónico, siendo partícipes de algunos de los proyectos más controvertidos del panorama actual, un auténtico referente en cuanto a la relevancia de la colaboración entre ingenieros y arquitectos para el diseño y conformación del proyecto, trabajando de forma coordinada y no como meros medios de cálculo de formas preconcebidas. A este respecto, el propio Ove Nyquist Arup decía de su colaboración con Jørn Utzon en la construcción de la Ópera de Sídney, *“De ninguna manera quería hacerle volver a la tierra existiendo la posibilidad, por remota que fuera, de que él me hiciera a mí subir al cielo”*. Esta frase demuestra un deseo de ir juntos más allá de lo que por separado podrían haber logrado, haciendo del panorama arquitectónico el campo de juego donde se disputa la evolución de la espacialidad del hombre y la superación de los márgenes de lo conocido.

artífice del proyecto. Esta estrecha relación la encontramos en el caso de algunos de los mayores arquitectos de este último siglo, como en el caso de Louis Kahn (1901-1974), quien contó con la inestimable colaboración del ingeniero estructural August Eduard Komendant (1906-1992), desde 1956, hasta 1974. En los laboratorios de investigación médica Richards (1957-1965) (Figura 109), se dejan las plantas libres de soportes, trasladando estos al perímetro mediante una malla de vigas pretensadas, otorgando a la solución una pureza formal y una expresión técnica y material. Además la mayor parte de los elementos estructurales, como en el caso de los soportes, son prefabricados, montándose la estructura en la obra mediante grúas. Este proyecto hace uso de recursos punteros en su momento, mostrando la contemporaneidad de la obra y la relevancia de que diseño y proyección no sean fruto de la labor solitaria del arquitecto, sino resultado de un equipo en el que los ingenieros estructurales, hacen del factor técnico una parte integrante del proceso reflexivo. La obra habla el lenguaje espacial de la contemporaneidad, con la expresión técnica.

En esta tipología proyectual, la expresión de los medios de sustentación adquieren vital importancia, puesto que frente a las configuraciones directas, que permiten su lectura inmediata en términos funcionales, en este ámbito proyectual se ocultan y transforman, adquiriendo una nueva naturaleza, que redunda en la separación conceptual y perceptiva entre el volumen suspendido y el terreno. En la citada Maison à Bordeaux, se hace uso de un catálogo de soluciones de gran interés, usadas al unísono, como forma

Figura 109. Laboratorios de Investigación Médica Richards, Pensilvania (Estados Unidos), obra de Louis Kahn y el ingeniero August Eduard Komendant (1957-1965).

de desvirtuar la imagen resistente. El mayor de los soportes empleados, por cuyo interior discurren unas escaleras de caracol, al exterior se viste con una piel de acero inoxidable, que refleja el entorno, negando su presencia, como si por un efecto óptico casi pudiera desaparecer. Esta solución reduce la rotundidad y presencia del elemento constructivo, modificando su percepción visual. Al tiempo, en el mismo pórtico, desde una viga emplazada sobre el volumen de las habitaciones, se descuelga un tirante de acero, que toca el terreno de una forma sutil, pareciendo nacer del plano verde vegetal del patio interior, como si de un árbol se tratara, una visión poética que intenta ligar lo artificial y lo natural. Ambos recursos enlazan el proyecto al entorno, por distintos medios, haciendo a la obra partícipe de éste, enraizándolo desde distintos puntos de vista conceptuales. El segundo pórtico sobre el que se sustenta el volumen, centra su interés en la disposición de los soportes y la independización visual del pórtico, como volumen y elemento independiente sobre el que se apoya el volumen de las habitaciones. Esta pieza de pórtico, dispone uno de los soportes al interior y otro al exterior, el primero perceptivamente resulta menos patente, mientras que el segundo parece nacer del manto vegetal del jardín como si naciera de éste. El juego geométrico logra romper con el funcionamiento y disposición evidente de los elementos, aunque desde el punto de vista estructural resulte en un simple cambio en el esquema de cargas sustentado por el elemento estructural²¹⁸. En conjunto, la labor estructural

²¹⁸ La estructura de la Maison á Bordeaux es uno de los principales puntos sobre los que reflexionar en esta obra. Desde un principio, se presentó la imagen del volumen de hormigón suspendido, aunque en un primer momento se desconocía como iba a ser la configuración estructural, pero se tenía claro el deseo de que dicho volumen *“debía flotar”*, a este respecto ARUP y en concreto Cecil Balmond fue el encargado del cálculo y diseño de la estructura de esta vivienda, suponiendo este hecho un factor clave, que ha permitido que este punto de partida sea realmente la imagen final que se nos presenta. Para que este efecto fuera real, lo primero fue determinar donde debía apoyarse, ¿en el centro, en los extremos, superiormente, lateralmente...?. Finalmente la opción elegida fue una combinación de varias de las anteriores. En un extremo se apoya en un pórtico, mientras que en el otro, descuelga de una viga de cubierta que se apoya en un mástil descentrado, contando uno de los extremos de la viga con un tensor, que centra las cargas en el soporte. La suma de todos estos elementos, configura una imagen no solo ingrátida, sino casi con un aparente desequilibrio, como si se encontrara al borde de la inestabilidad que lo haría caer.

La cimentación de las zapatas de los soportes de este edificio, se resuelve mediante una serie de pilotes, que configuran una cimentación en profundidad, capaz de soportar la concentración de cargas que se produce en esos tres puntos. Por su parte, el tensor soporta bajo tierra una mole de hormigón, para impedir el vuelco de la viga de cubierta. El nivel inferior de la cubierta, que se encuentra excavado, se confecciona con un muro de sótano y una cimentación corrida, con formas caprichosas. En esta obra siempre se produce la dialéctica entre los opuestos, como medio de relación entre los espacios y los elementos.

En el nivel intermedio, es en el que se hacen patentes los elementos de sustentación del volumen superior, marcados en un extremo con el comentado pórtico de color marrón oscuro, en el que aparece la dialéctica de extremos, configurándose, el soporte interior como un HEB-400 modificado, mientras que al exterior, continúa la viga aparentemente maciza, por la que discurren las instalaciones hasta doblarse en el exterior, para llegar al terreno y arraigarse en el lugar, como cualquier árbol del entorno. Este efecto natural, contrasta con el interior, el más artificial posible, un perfil metálico. Este pórtico, es

realizada en este proyecto es ejemplar, en la búsqueda de la aparente liviandad y desaparición de los elementos portantes verticales, que aparecen como piezas casi escultóricas, en las que su función estructural, pese a estar patente, pierde su presencia. Además busca no hacer evidente el orden estructural, lo que logra la sensación de ingravidez de un volumen visualmente macizo y pesado.

En esta tipología, la expresión del volumen depende, en gran medida, de la concepción del espacio intermedio, entre el volumen suspendido y el terreno. En este punto se enfoca el esfuerzo proyectual, para generar el deseado efecto visual que permite entender el volumen elevado como un ente independiente. En todas las tipologías de volumen suspendido, la reflexión proyectual radica, tanto en la conformación de la cubierta o el volumen elevado, como en los medios resistentes que permiten su sustentación, haciendo estos menos evidentes o independientes visualmente, lo que permite el entendimiento de la solución en los términos que se están tratando.

coplanario con el elemento de librería de la estancia móvil, que permite los desplazamientos del propietario y entorno a la que se desarrolla el proyecto, apareciendo, casi como una continuación de éste, lo que en parte lo hace menos presente en el interior y hace posible el canto de esta viga, que de no ser así tendría cabezada, (forma parte del elemento divisorio de la librería). En este proyecto todos los elementos aparecen casi con una precisión quirúrgica.

En el otro extremo, se dispone el cilindro estructural de la escalera de caracol, con un acabado de acero inoxidable, que le quita presencia al exterior, con una imagen desvirtuada y casi inmaterial, formada por los reflejos que se producen, alejada de la que quedaría del elemento portante de hormigón al descubierto. Pero incluso una vez en el interior de éste, se pone énfasis en que los peldaños sean unas láminas triangulares, colgadas del muro, no perdiendo en ningún momento la impresión de elemento hueco continuo. El tensor por su parte, surge del suelo del patio como en el caso anterior del pórtico, como si de un árbol se tratara que nace del suelo. La fineza de este elemento, hace que prácticamente desaparezca a la vista, e incluso por su esbeltez no parezca al ojo inexperto un elemento portante, ya que no saben que trabaja a tracción y esa proporción con un elemento comprimido sería impensable.

El volumen superior, estructuralmente es un muro de hormigón perforado que se apoya en los puntos que hemos comentado, funcionando como una gran viga de canto, en forma de U en planta, que recorre tres de las cuatro fachadas. En un primer momento, se pensó que una serie de cerchas unieran transversalmente esta pieza, formando un entramado rígido, que solo se ha materializado en parte, con los muros interiores, que mayormente funcionan como elementos estructurales o los contiene en su interior, no percibiéndose al exterior.

En este volumen, al confeccionarse los paramentos exteriores y algunos interiores como elementos portantes, no se hace patente la solución estructural, como si se obviara la sustentación y se centrara en los aspectos espaciales. El suelo es una gruesa losa de hormigón postensada, que unifica las vigas pared del perímetro, mientras que en la cubierta, el canto del forjado es sumamente más reducido, para que en un espesor igual al del forjado de debajo, se incorporen las pendientes y graba de la cubierta plana. Así al llegar al extremo de la terraza de los padres, se ve como un recorte homogéneo, en el que todos los paramentos, tanto horizontales como verticales, en su límite se presentan de forma similar, con el matiz del borde de la losa de esta planta, en el que se perciben con un orden al tres de bolillo las cabezas del postensado, que hacen posible trabajar en hormigón con estas luces sin sufrir fisuras inaceptables. De cualquier manera, las deformaciones de este volumen llegan al punto de romper periódicamente alguno de los vidrios de la planta inferior.

Al igual que en el caso de los volúmenes suspendidos ligeros, es necesario hacer una clara distinción entre aquellos proyectos que constituyen el fiel reflejo de una realidad constructiva y los que buscan exclusivamente generar ese efecto visual, por medios volumétricos, que no representen directamente dicha condición de masividad.

Masividad real

Esta tipología proyectual hace alarde de la densidad material de la solución, así como del esfuerzo resolutivo que hace factible el reto visual a la gravedad. Aquí es donde material y técnica encuentran su expresión visual como reto espacial y volumétrico que pone en tela de juicio la comprensión tradicional de la espacialidad. Este tipo de proyecto supone un claro esfuerzo técnico y económico frente a otras soluciones, tanto convencionales, como en el marco de los proyectos de grandes luces, por lo que su elección se encuentra claramente justificada por una necesidad expresiva e icónica. Esta interpretación cuando menos es así en el panorama actual de la arquitectura, ya que no puede descartarse que en un futuro este tipo de soluciones entren en los márgenes de la cotidianidad constructiva, pudiendo suponer una transformación radical de la interpretación espacial de la urbe.

Anteriormente se ha mencionado en varios puntos el Caixa Forum de Madrid (2008), obra de Herzog & de Meuron (Figura 110), esta obra es claro ejemplo del presente punto. En este proyecto han primado las decisiones resolutivas enfocadas en la conformación proyectual del volumen suspendido, dejando el resto de los factores a considerar en el proyecto, en un segundo plano. En esta obra se rehúye de la literalidad y la visión directa del

Figura 110. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron y NB35 ingeniería (2002-2008).

funcionamiento resistente, una lectura compleja que oculta al viandante las herramientas estructurales empleadas, mostrando al exterior la vieja fachada de la Central Eléctrica del Mediodía, que se decide conservar, pero trastocando las pautas resistentes y la percepción de la misma por los usuarios. La fachada preexistente de fábrica de ladrillo se conserva, pero en lugar de mantener su natural apoyo en el terreno, se sustenta lateralmente enlazándose a las grandes vigas de canto de hormigón postensado, dispuestas a lo largo de todo el perímetro. Esta solución estructural logra compaginar resistencia y deformación, manteniendo esta última en unos rangos lo suficientemente reducidos para evitar la fisuración de los paramentos preexistentes. Se hace evidente que el principal punto de relevancia en esta tipología es el *“alarde de la masa”*, lo que en este caso se logra mediante la distorsión de los esquemas resistentes de la fachada preexistente, dejando ocultos tras de ésta los medios resistentes principales²¹⁹, se logra compaginar la necesidad expresiva con la resolución resistente y de deformación planteada. La solución proyectual adoptada no hubiera sido factible sin el empleo del postensado, lo que la convierte en fruto de la contemporaneidad y el estadio técnico del momento. Otros muchos proyectos plantean un reto como el presente, haciendo alarde de los medios estructurales empleados como medio expresivo, lo cual es otra de las posibles vías para la resolución de este tipo de proyectos, que buscan su expresión en el alarde volumétrico y técnico.

En este proyecto los soportes desaparecen perceptivamente ante el espectador, un efecto que suele ser el deseado en los proyectos pertenecientes a esta tipología proyectual, por lo que el diseño de los medios de sustentación se configura como un factor clave para el entendimiento y diseño del proyecto. Así en una tipología que intenta negar visualmente la sustentación del volumen edificado, tiene como factor vital de su diseño, la concepción de estos. El diseño de los soportes en estos proyectos puede tratarse desde tres puntos de vista básicos: localización, forma y superficie.

La disposición de los soportes es el factor más básico, un hecho ampliamente tratado a lo largo de toda la historia de la arquitectura, configurando desde salas hipóstilas a columnatas o las distintas naves de una catedral. En este caso al trabajar con los conceptos de diseño enmarcados en las grandes luces y los recursos técnicos de los que hoy se dispone, se pueden buscar configuraciones más complejas, enfocadas en la confusión visual de los medios de sustentación. En general todas las soluciones de este tipo desligan los soportes de las líneas de fachada, disociando ambos conceptos,

²¹⁹ Como se ha mencionado la solución estructural adoptada se fundamenta en la disposición de tres grandes núcleos resistentes al interior, que se enlazan con unas grandes vigas de canto perimetrales, que resuelven, tanto la problemática volumétrica exterior, como la espacialidad interior. Esta estructura de hormigón emplea el postensado como medio de control de deformaciones, para permitir la convivencia de esta estructura y los muros de fábrica, con su diferente comportamiento y márgenes de trabajo. Hay que considerar que al igual que se ha optado por esta solución, bien podrían haberse utilizado cerchas, que emplearan el postensado con el mismo razonamiento, pero la coherencia resolutive hace más aconsejable el uso del hormigón. De esta manera se facilita el nexo entre la estructura nueva y la previa, resuelta en este caso mediante una serie de perforaciones en el muro de fábrica, que configuran el anclaje de la fachada, sumado al contacto superficial.

dejando los soportes en el interior, lo que los oculta en la sombra de la edificación y remarca el vuelo del volumen con los voladizos, o bien enviándolos al exterior, como si fueran un ente independiente. Así mismo los soportes pueden concentrarse, estableciendo un menor número de elementos de mayor entidad, lo que por una parte orienta a un mayor esfuerzo en su diseño y logra dejar el resto de la planta, libre de estos. La otra opción es emplear un mayor número de soportes de una entidad más reducida, lo que por una parte va en detrimento del deseo de desligar el volumen suspendido del terreno, pero en ciertas ocasiones puede lograr un efecto visual de insuficiencia resistente que va en la línea conceptual expuesta.

Por su parte la forma de los soportes ha sido un medio tradicional de la expresión arquitectónica, cargándolos con el ornamento que permite su lectura. A lo largo del siglo XX, estos elementos se han desprovisto del ornamento y vistos desnudos han adaptado su forma a su uso y disposición dentro de la edificación. Ejemplo de ello serían la mallas de soportes, que en el caso de soportes circulares no fijan de por sí una orientación principal, mientras que los cuadrados, establecen una clara disposición ortogonal de los elementos edificatorios, lo que en el caso de los soportes rectangulares distingue una dirección principal. Partiendo de este tipo de conceptos, la forma de los soportes puede alejarse de las secciones extruidas generalmente empleadas, adquiriendo configuraciones más complejas, que inciten a interpretaciones más ricas. Como se ha indicado anteriormente en este tipo de proyectos está implícito un interés en desligar el volumen elevado del terreno, lo que se puede lograr empleando formas que ligen conceptualmente los soportes al terreno o al volumen superior, así como estableciendo estos como elementos independientes que sirvan de nexos. Así un elemento resistente como el soporte, es percibido como elemento dialéctico capaz de diferenciar las formas y sus ámbitos de actuación como medios independientes, separando el espacio de lo

Figura 111. Club Atlético Paulistano en São Paulo (Brasil), obra de Paulo Mendes da Rocha (1958-1961).

*“natural”, de la “espacialidad del hombre”²²⁰. Podemos encontrar ejemplos como el del Club Atlético Paulistano en São Paulo (1958-1961) (Figura 111), obra de Paulo Mendes da Rocha, una de sus primeras obras, surgida de un concurso que gana y del que el jurado destaca *“el ingenio de la estructura”* y la *“belleza plástica”* del volumen, empleando el hormigón visto como expresión de la materialidad del proyecto. En esta obra los soportes adquieren un carácter claramente representativo, reduciendo su sección hasta tocar el suelo en un punto y creciendo sobre la cubierta como si de un plano independiente se tratara, que intersecan el plano de la cubierta, como piezas geométricas pertenecientes a un mismo juego formal. Esta maniobra volumétrica, logra que se perciba la cubierta y soportes como un conjunto autónomo y bello, que se posa en el terreno como un ente ajeno a éste²²¹.*

También de Paulo Mendes da Rocha encontramos otro ejemplo en el que los soportes están cerca de un contacto íntimo entre el terreno y la cubierta, como si ambos se deformaran para tocarse de una forma tímida, como dos entes independientes. En el Pabellón de Brasil de la Expo de Osaka de 1970 (Figura 112) el terreno se eleva como un pequeño montículo para entrar en contacto con la cubierta, dejando ver entre ambos un

Figura 112. Pabellón de Brasil de la Expo de Osaka (Japón), obra de Paulo Mendes da Rocha (1970).

²²⁰ Al hacer esta distinción entre el medio natural y los espacios propios del hombre, se hace referencia a aquellos espacios nacidos puramente de las exigencias espaciales y habitacionales del hombre, sin las respuestas a un medio preexistente al que adaptarse, como ocurre en la cota del terreno. Así se alza la producción arquitectónica, como meta espacial e icono de unos ideales, más allá de los adaptativos al entorno, del que obviamente la arquitectura hace uso y en el que se desarrolla la vida del hombre.

²²¹ En el proyecto del Club Atlético Paulistano en São Paulo hay que establecer una diferenciación entre los modos de trabajar la cubierta y el terreno, como se ha mencionado, la cubierta se conforma como un elemento plástico de cubrición, con un claro carácter icónico que hace uso de las cualidades del material, mientras que en el terreno se alza y escavan los espacios servidores del uso deportivo, centro del proyecto. Así mismo el volumen inferior se configura como basamento, que ensalza la cubierta sobre el entorno, estableciendo la clara distinción expuesta entre el terreno y el volumen suspendido.

pequeño atisbo del soporte, que se establece como elemento de contacto y diálogo. Este uso del terreno con una naturaleza artificiosa, logra modificar la lectura del espacio, independizando el elemento de cubierta, al tiempo que el punto de contacto materializado por el pequeño soporte, establece un punto de tensión y atracción visual. Este gesto pone de manifiesto un entendimiento particular del espacio y de las relaciones entre lo natural y el artificio espacial de la arquitectura. Se materializa dicha dualidad, que establece una tensión rica, que conforma la experiencia vital de la espacialidad arquitectónica. En esta obra se hace así mismo uso de las propiedades visuales del hormigón y una técnica como el pretensado, para materializar una forma de ver el mundo y una preocupación experimental sobre la espacialidad del hombre y la evolución del entendimiento de la urbe... Obras de arquitectura como ésta, son las que haciendo uso de las herramientas técnicas de un tiempo y los recursos de diseño espacial propios de las grandes luces, establecen obras en la contemporaneidad de su tiempo y marcan las pautas y retos que paulatinamente transforman nuestra visión del mundo, dice Josep Maria Montaner, *“te hace pensar en la arquitectura moderna brasileña desde otra modernidad. Como un horizonte donde la autonomía dirige su arquitectura y manteniendo una mentalidad abierta, en lugar de cerrada”*²²².

Este tipo de trabajo plástico sobre el diseño de los soportes, se enmarca en la producción arquitectónica en hormigón armado y pretensado, ya que las estructuras metálicas responden a formas nacidas de la lógica productiva y solo en contadas ocasiones, su transformación formal va más allá de una piel expresiva que muestra al exterior la forma deseada, sin una correlación resistente.

El tercer factor sobre el que se puede central la labor reflexiva sobre el diseño de los medios de sustentación desde el punto de vista expresivo, es la superficie de los mismos, como terminación material, que permite la interpretación de estos como elemento resistente. Por eso mismo, puede optarse por la expresión del material estructural o bien su cubrición, para transgredir la imagen fidedigna de su funcionamiento interno. Ejemplo de ello se ha visto en la Maison à Bordeaux, empleando uno de los soportes el acero inoxidable como terminación, para hacer uso de su cualidad reflexiva, como medio de desmaterialización visual del medio de sustentación. Así éste resulta el recurso más escenográfico, en cuanto no responde a una problemática resistente o de conformación del elemento estructural, que trascienda en el esquema resistente y en el proyecto, más allá de la generación de un efecto óptico²²³, capaz de potenciar la efectividad de un gesto expresivo en el que se ha invertido un amplio esfuerzo constructivo.

²²² Fragmento de la entrevista concedida por Paulo Mendes da Rocha a Andrea Macadar para la revista Vitruvius en abril de 2006 (entrevista ISSN 2175-6708). El texto original cita en brasileño las palabras de Josep Maria Montaner (1996): *“faz pensar a arquitetura moderna brasileira desde uma outra modernidade. Como um horizonte, onde a autonomia dirige sua arquitetura e se mantém como uma abertura e não como um encerramento (...)”*.

²²³ La solución de revestir los soportes para otorgarles una expresión material distinta, la encontramos en obras como el Pabellón de Barcelona (1929) de Ludwig Mies van der Rohe (1886-1969), logrando

Este acto reflexivo sobre la resolución resistente y los medios de sustentación, de forma conjunta con la proyección de los espacio, resulta de vital relevancia, ya que como podemos ver en proyectos como el de la Biblioteca de Seattle de OMA (Figura 113), en ocasiones una idea magistral, en el que aparecen los volúmenes programáticos casi ingravidos, levitando, si no se ve respaldado por una solución estructural a la altura de las ideas solo puede materializar una imagen desvirtuada del concepto inicial. Si bien la obra resultante, en este caso tiene un gran valor resolutivo, indudablemente la piel confeccionada ha dejado atrás una imagen potente que hubiera permitido entender el edificio en términos muy distintos. La idea inicial de este proyecto se hubiera enmarcado dentro de la tipología de volumen suspendido, pero el resultado formal obtenido claramente se ha desligado de esta categoría. Así queda patente como solo las ideas proyectuales acompañadas de un razonamiento técnico y las capacidades propias de un momento, hacen posible la materialización de los conceptos iniciales sin el velo del condicionamiento a una realidad constructiva ajena a las intenciones del arquitecto.

Arquitectos e ingenieros son las dos caras de la moneda arquitectónica. En proyectos donde las dimensiones establecen una complejidad resolutive, la convivencia de ambos, desde las fases iniciales del diseño, es un factor vital para la confección de soluciones precisas. Así se puede corroborar que toda arquitectura relevante en el panorama arquitectónico actual y en mayor medida en aquellos proyectos resueltos mediante soluciones de grandes luces, se presenta dicha colaboración. Solo al tratar técnica y expresión al unísono, se pudo incidir sobre los conceptos de la contemporaneidad

Figura 113. Biblioteca de Seattle (Estados Unidos), obra de Rem Koolhaas, OMA, Joshua Prince-Ramus y LMN Arquitectos (1999-2004).

mediante la terminación, una lectura distinta del elemento estructural, más cercana a los requerimientos expresivos del proyecto. En el caso de los proyectos pertenecientes a la tipología de volumen suspendido, se incide especialmente en su virtual desaparición o su lectura en un segundo plano, que permita la interpretación del volumen elevado como una entidad autónoma.

arquitectónica, participando en su evolución y los pensamientos que inciden sobre la espacialidad propia de nuestro tiempo.

El otro gran factor objeto de especial atención en la presente tipología proyectual, es el referente a la concepción del espacio intermedio entre el volumen y el terreno, ya que de éste se deriva la lectura del conjunto. En este caso, la principal variable a tener en consideración es la proporción de los espacios, deduciéndose una taxonomía en tres categorías, con claras diferencias sobre la interpretación espacial del proyecto: espacio compresivo, espacio nexa y espacio aéreo.

En los espacios compresivos, la altura del intermedio es muy ajustada, permitiendo entender estos, más como áreas de paso, que como lugares de estancia o reunión. Este hecho se percibe en el proyecto del Caixa Forum de Madrid (Figura 114), además en este caso se trabaja desde el punto de vista plástico, como se ha comentado con anterioridad, transmitiendo la imagen cercana a una reinterpretación de la caverna, artificial y masiva, sin paredes que la sustenten. La imagen final, sin lugar a dudas, logra potenciar el esfuerzo constructivo y volumétrico, realzando la sensación de pesantez, cuando uno discurre por este espacio, claramente compresivo. Así un efecto logrado a través de la proporción de las formas, puede ser apoyado por otros factores como el material y la forma, que en conjunto cuentan una historia, que le permite al usuario interpretar la edificación, suscitando a su vez un interés, que incide directamente sobre el éxito de la intervención, ya que como se ha incidido, este tipo de soluciones actualmente están claramente motivadas por un interés visual e icónico.

En este tipo de proyectos la compresión del espacio remarca la relevancia del perímetro, percibido desde el interior como una franja de luz y desde el exterior como una banda en sombra, que modifica la percepción de la sustentación del edificio. Este espacio

Figura 114. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron y NB35 ingeniería (2002-2008).

aparece como una zona de tránsito, parte del recorrido arquitectónico al interior del edificio, en un término medio entre la urbe y el proyecto, definiendo la interacción de la obra con el entorno.

Por su parte los espacios nexos cuentan con mayores alturas, lo que permite reducir la percepción de la masividad de la construcción, interpretándose el espacio como un paso entre los extremos de la edificación y un medio de acceso a la misma. Adquiere especial relevancia el entorno y el volumen obtiene un carácter más aéreo, quedando aun patente su conexión con el terreno (Figura 115). Su conformación puede llegar a ser similar a los espacios compresivos, pero con una menor percepción de dicho efecto, logrando espacios que por sus dimensiones pueden ser aptos para el cumplimiento de múltiples funciones. Si en la solución anterior los medios de sustentación quedaban claramente ocultos en el espacio en sombra, en este caso el mayor distanciamiento permite a su vez una mayor presencia de los soportes, que adquieren mayor entidad en la percepción del volumen y por tanto son en mayor medida objeto del esfuerzo expresivo. En el Phaeno Science Center en Wolfsburg de Zaha Hadid se percibe claramente, que en un proyecto de gran escala se opta por un entendimiento del

Figura 115. Phaeno Science Center en Wolfsburg (Alemania), obra de la arquitecta Zaha Hadid (1999-2005).

espacio intermedio con claras referencias al espacio compresivo, pero con un rango dimensional que limita la percepción en dichos términos. Así mismo los soportes se conciben como objeto de la expresión proyectual, con formas que claramente los integran en el volumen suspendido, reduciendo su sección al contacto con el terreno. En este proyecto la rotundidad geométrica del volumen contrasta con el tratamiento plástico de los soportes, retranqueados al interior, dejando lo medios de sustentación entre la sombra y la expresión resistente del material. Esta categoría se encuadra en un punto intermedio entre los espacios compresivos y los aéreos, por lo que pueden presentar características de ambos (Figura 116), pero sin la rotundidad de estos.

Por último, los espacios aéreos establecen una lectura del volumen suspendido como un elemento aéreo, desligado en mayor medida del terreno. De esta tipología se encuentran menos ejemplos, dado que el aumento de la altura de este espacio intermedio tiende a ensalzar sobremanera los medios de sustentación, desvirtuando la imagen deseada. En estos términos las soluciones por las que se suele optar son estructuras metálicas, reduciendo el impacto visual de los medios de sustentación, conformando el volumen suspendido de forma más o menos rotunda. Precisamente esa ruptura, con la interpretación material y su reflejo expresivo, hace que sea más apta dentro de la categoría de masividad virtual, ya que frente a la expresión de una realidad constructiva y material, prima la expresión de una un concepto volumétrico. Ejemplo de ello es la galería de arte que construye Renzo Piano en la cubierta del edificio Lingotto de FIAT (Figura 117), un volumen hermético, donde la estructura se ha reducido al mínimo empleando una solución en acero. Elementos como los ascensores, se conforman al exterior como un prisma cristalino,

Figura 116. Museo de Arte Contemporáneo (MAC) de Niteroi, Río de Janeiro (Brasil), obra del arquitecto Oscar Niemeyer y el ingeniero estructural Bruno Contarini (1991-1996).

Figura 117. Galería de arte *Lo Scrigno* en la cubierta del edificio Lingotto de FIAT en Turín (Italia), obra de Renzo Piano (2002).

cuya presencia pasa casi inadvertida ante la rotundidad del volumen configurado. Esta obra representa claramente el distanciamiento conceptual entre el volumen arquitectónico y el firme en el que se posa. En esta obra la pesantez del volumen resulta incoherente con la realidad constructiva, por lo que pertenecería al marco de la masividad virtual, pero da buena cuenta de los factores que intervienen en la reflexión proyectual, un balance entre el peso perceptivo de los medios de sustentación y el elemento sustentado, hecho por el cual la masividad real raramente suele aplicarse a este tipo de obras. Una obra que claramente logra expresar esta idea de un volumen masivo, casi levitando de forma aérea, es el Veles e Vent (Figura 118) de David Chipperfield. Para ello decide emplear una serie de losas postensadas de gran canto, que se leen como planos casi levitando. En lugar de concebirse el volumen representativo como un contenedor, se expresa como sumas de planos independientes, configurando estancias exteriores y en un ámbito más central, las áreas cerradas y climatizadas. Esta obra expresa la solución estructural nítidamente y con la potencia que solo una resolución estructural magistral es capaz de transmitir. El problema escalar comentado, se logra solventar reduciendo los volúmenes representativos a los configurados por la estructura, sin espacios interiores, lo que logra percibir estos como elementos de mayor entidad, constituyéndose como planos “*flotantes*”, un juego formal habilidoso que logra transmitir los conceptos expuestos en el presente apartado.

En este tipo de proyectos de masividad real, al igual que ocurría con las estructuras ligeras, resultan vitales los aspectos técnicos, pero frente a estos se presenta como más relevante el factor material, ya que se hace uso de los aspectos perceptivos del mismo, por esta razón el hormigón, como material pétreo se configura como la principal opción en esta tipología proyectual, ya que contrasta la naturaleza artificial de los elementos estructurales, con el reto resistente que nos permite la solución técnica, que lleva al interior del material la resolución resistente, con el armado y el pre y postensado, que regula el comportamiento resistente del elemento estructural, adaptando las sollicitaciones a las capacidades intrínsecas del material. Como se ha mencionado con anterioridad, las estructuras de hormigón armado sin el uso del factor de forma, no pueden ir más allá de los 15 metros sin que la fisuración resulte inadmisibles, hecho por el cual este tipo de obras suelen presentar prácticamente como una invariable, en las

Figura 118. Veles e Vent en Valencia (España), obra de David Chipperfield Arquitectos y b720 Arquitectos (2005-2006). Este proyecto consta de varias losas postensadas de gran canto, que cubren luces de 30 metros y voladizos de 14 metros, generando la imagen de “*planos flotantes*”.

obras contemporáneas, la presencia del pretensado como un requerimiento intrínseco a la solución. La masividad del material, también puede ser expresada mediante otros materiales e incluso mediante una conformación de fachada en la que el material adquiera su expresión como parte del entendimiento del conjunto, ejemplo de ello serían las placas de acero cor-ten²²⁴ que conforman parte de la fachada del Caixa Forum de Madrid y permiten percibir la rotundidad del volumen construido, pese a ser un recurso ajeno a la propia resolución estructural de la edificación. Este tipo de solución tiene un marcado factor visual (Figura 119), por lo que a la hora de la proyectación estructura, paramentos... son entendidos desde este parámetro.

Las obras englobadas en este punto, logran que expresión material y estructural den lugar a un efecto gravitatorio interesante, un reto perceptivo, apoyado por la técnica, que permite transgredir la comprensión convencional de la espacialidad urbana y la espacialidad arquitectónica. Estas obras se constituyen como el caldo de cultivo para un cambio de mentalidad y por tanto, como líneas para el diseño de los espacios propios del siglo XXI, en parte dictado por la racionalidad constructiva y en parte por el deseo de ir más allá en la conformación espacial. Precisamente dicho reto se integra en el ámbito puntero, donde la técnica tiene su papel evolutivo, sumando conocimientos que ayuden al progreso arquitectónico. Dada la relevancia del material en estas soluciones, son susceptibles de los avances acontecidos en este ámbito, tanto desde el punto de vista resistente, como perceptivo.

Figura 119. Placas de acero cor-ten empleadas en la reconstrucción de la Muralla de la Hoya en Almería (España). Se enfrenta la masividad real de la roca, con la representativa de las planchas de acero.

²²⁴ El Acero Cor-ten o “*Weathering steel*”, es una aleación de acero con níquel, cromo, cobre y fósforo, realizando posteriormente un proceso de humectación y secado alternativos que forma una delgada película de óxido, que le confiere su color rojizo anaranjado y su característica protección ante la corrosión atmosférica. El nombre COR-TEN viene de una marca registrada originalmente por United States Steel (ahora Arcelor-Mittal), encargada de la producción de este material, en la práctica esta denominación ha pasado a convertirse en el nombre oficial de este tipo de aceros.

Masividad virtual

En este caso se sustituye la percepción material de la obra, por la pura percepción volumétrica, así prismas de vidrio pueden ser leídos como elementos de gran entidad, suscitando una problemática similar a la anteriormente comentada. Así una magnitud dimensional se traduce en una masa representativa. Cuando dicha interpretación es pareja a la realidad constructiva, como en el caso expuesto del Caixa Forum de Madrid, se considera que es una “*masividad real*”, mientras que cuando la imagen transmitida no concuerda con la naturaleza material de la obra, se denomina “*masividad virtual*”, ya que aparece como lectura proyectual. La consecución de este tipo de proyectos cuentan con una mayor libertad de actuación, ya que al resultar opciones más livianas, los medios de sustentación pueden ser de menor entidad y su diseño goza de un rango de actuación más amplio. Como se ha comentado anteriormente, uno de los factores clave para el diseño y lectura de la tipología proyectual comentada, son las proporciones del espacio intermedio, que permite entender el volumen suspendido como tal. A ese respecto los espacios que denominamos aéreos ven su resolución natural en este rango proyectual, donde la realidad constructiva permite tal alarde. Un proyecto en el que se ven reflejados estos principios, aun con el empleo de rangos dimensionales comedidos, es el Edificio Municipal de Lazika (2012), obra de Architects of Invention²²⁵ (Figura 120). En esta obra los abundantes soportes pasan a un segundo plano, ante la rotundidad de los volúmenes²²⁶, que se conciben

Figura 120. Edificio Municipal de Lazika (Georgia), obra de Architects of Invention (2012).

²²⁵ Arquitectos de Invención (AI) es una asociación internacional, centrada en la producción de arquitectura contemporánea, urbanismo y el análisis cultural en todo el mundo. La empresa está dirigida por Nikoloz Japaridze y Anton Khmelnskiy y tiene una repercusión global, desde sus oficinas de Londres, Moscú y Tbilisi.

²²⁶ Algunos proyectos de esta tipología, emplean rangos dimensionales reducidos, que difícilmente podemos catalogar como grandes luces, pero pese a ello entran dentro de dicha catalogación por el tipo de concepción estructural, volumétrica y medios de expresión visual. La obra se centra en la resolución de un reto gravitatorio coincidente con las consideraciones propias de este ámbito, así como el empleo

como prismas macizos, pese a su piel cristalina. Este tipo de obras permite establecer un juego perceptivo, empleando recursos visuales, tanto de ligereza, como de masividad, como dualidad intrínseca a la obra que ofrece lecturas distintas al viandante y al usuario. Dos interpretaciones de una realidad materializada gracias a una resolución técnica precisa como la expuesta, definiendo un rotundo prisma en altura, regido por unas pautas geométricas, que difieren con los soportes inclinados, que transmiten una percepción de inestabilidad, que permite potenciar el efecto visual deseado. Si este proyecto hubiera empleado una trama de soportes regulares, aún con una disposición equivalente, la lectura de la obra sería radicalmente distinta. Forma y disposición, son vitales en la concepción de los medios de sustentación. Por su parte la proporción es una herramienta básica, pudiendo llegar como en la obra comentada, los soportes al extremo de la esbeltez, transmitiendo una percepción visual de sutil insuficiencia resistente. En este punto es aplicable toda la metodología expuesta en el punto anterior, pero sin la limitación de la concordancia material del efecto perceptivo, deseado desde el marco proyectual. Debido a este hecho, encontramos que la mayor parte de las obras de esta tipología vienen a emplear soluciones estructurales metálicas, exacerbando los gestos de la obra en un intento de realzar la potencialidad expresiva de la obra. En este tipo de proyectos se suelen entender los elementos estructurales como parte de la expresión estética del edificio, por lo que suele prestarse especial atención a la resolución de los detalles, de forma similar a como ocurre en la arquitectura High-Tech.

A lo largo de los siglos la componente estética ha sido una de las principales líneas que ha regulado la actividad arquitectónica. Este marcado interés estético se fue exacerbando hasta llegar a la arquitectura barroca. La arquitectura deja en un segundo plano la dimensión humana y la atención a la espacialidad, para centrarse en las apariencias estéticas, suscitando una reacción de admiración en el espectador, mientras las consideraciones sobre éste parecen relegadas fuera del papel dominante. Este interés por la estética arquitectónica, más allá de otras consideraciones, culmina con el eclecticismo historicista, que entiende la historia como un repertorio formal a emplear dialécticamente para lograr un resultado puramente estético, que transmita al espectador la deseada impresión. Pero precisamente la adopción de esos extremos fue lo que desató el cambio, para que en el siglo XX se buscara la racionalidad de las formas, centrando el interés en el hombre y su bienestar como objetivo final de la obra. A lo largo de este último siglo, se ha buscado que el lenguaje arquitectónico resulte ante todo, coherente con las necesidades reales del hombre y de la sociedad. En este contexto encontramos movimientos arquitectónicos, como el funcionalismo, la arquitectura orgánica, el movimiento moderno, el movimiento posmoderno y la arquitectura High-Tech. De todos ellos el High-Tech se centra en la expresión estética de la técnica, una vuelta a la comprensión estética de la arquitectura, pero en este caso poniendo de manifiesto su pura esencia estructural y como elemento tecnológico, surgido como respuesta a las necesidades de la sociedad, factible gracias a los recursos tecnológicos de un tiempo. Por esta puesta en valor del factor estructural y la adopción

de voladizos que permiten entender dichas soluciones como un reto resolutivo en el marco de los proyectos de grandes luces.

de grandes luces, en muchas ocasiones este tipo de comprensión arquitectónica, centrada en la exaltación técnica, se constituye como una de las principales vías de actuación. Desde este punto de vista, dichas consideraciones son coincidentes con las tratadas en un amplio rango proyectual de las arquitecturas de grandes luces en la actualidad, siendo esta tipología una de las que expresa dichas preocupaciones, ya que frente a la masividad real que se expresa a través del material, la virtual, se expresa a través de volúmenes y una solución técnica, claramente en los márgenes de la contemporaneidad.

La “*masividad virtual*” se entiende como un virtuoso juego de volúmenes bajo el sol, con la técnica como medio y como lenguaje. La expresión técnica se aleja de la tranquilidad perceptiva de la estabilidad y lleva la composición a términos visuales inestables, obviamente no coincidentes con la realidad estructural. El alarde formal y resolutivo, hace uso de sistemas estructurales que se hacen patentes en los medios de expresión, empleando técnicas y diseños, que hace tan solo unas décadas se consideraban en los márgenes de lo irrealizable. El esfuerzo estructural, al igual que en el punto anterior, está claramente enfocado en un interés representativo y visual que redunde en un enaltecimiento del continente o en un medio para la atracción de los usuarios.

Los conceptos con los que trabaja este grupo tipológico, durante los últimos años han encontrado aplicación en las agrupaciones de edificaciones, buscando aglutinar varias edificaciones como un conjunto estructurado, que ve el volumen suspendido de grandes luces, como referente capaz de unificar conceptualmente construcciones que pueden llegar a tener un carácter individual.

Ya sean elementos externos o internos, las edificaciones objeto de unificación pueden llegar a interpretarse como elementos independientes dentro de la unidad formada por el conjunto. Las grandes luces constituyen dentro del complejo una categoría superior²²⁷, capaz de estructurar el conjunto, transformándolo en una unidad perceptiva y conceptual.

A este respecto, en las últimas décadas han aparecido un buen número de proyectos que emplean este concepto de asociación de piezas mediante un elemento de grandes luces. Un ejemplo cercano es la ampliación del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (2001-2005) (Figura 121), obra de Jean Nouvel, en el que se disponen piezas de muy diverso carácter, sobrevoladas por una gran cubierta, que les otorga unidad, hecho que de otro modo resultaría difícil. Este elemento de unión, logra enlazar la ampliación al museo existente, igualando la altura del edificio antiguo y alineándose con el perímetro de las cornisas, en un intento de otorgar una continuidad simbólica entre lo existente y lo nuevo, dejando que los volúmenes programáticos que cobija, se organicen de forma independiente y especializada, liberados de los condicionantes de entorno que

²²⁷ Al enmarcar el recurso proyectual de las grandes luces en una categoría superior, se hace referencia al general de las edificaciones de esta tipología, que emplean dicho recurso como medio de unificación de edificaciones de menor entidad.

representa enfrentarse al edificio del antiguo Hospital General de Madrid, en el que se encuentra el museo.

La razón de ser de esta solución proyectual es clara, las grandes luces aparecen como liberadoras de la proyección programática, dejando libertad de diseño, dentro del marco de reglas que dicta la cubrición unificadora. Esta reflexión lleva asociada una puesta en valor de los volúmenes cubiertos, gracias a ese elemento unificador, que aparece como una herramienta que emplea grandes luces, dispuesta como telón de fondo, para las piezas que cobija, a las que libera de las ataduras formales del entorno, otorgándolas una singular independencia a la hora de su diseño.

Figura 121. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía en Madrid (España), obra de Jean Nouvel (2001-2005).

Así el empleo del volumen suspendido como elemento aglutinador de conjuntos edificados, es una de las posibles aplicaciones de este tipo de soluciones²²⁸, que encuentra expresión volumétrica en la masividad que le otorga expresión, así como una rotundidad suficiente para imponerse sobre el conjunto como elemento estructurador.

A la hora de concebir el proyecto, como se ha puesto de manifiesto anteriormente, han de considerarse múltiples factores, entre ellos la procedencia de la propia resolución adoptada. El empleo de soluciones estructurales y proyectuales de grandes luces supone un esfuerzo económico a la hora de la construcción del proyecto. Este tipo de obras exigen a su vez una estrecha colaboración con ingenieros estructurales, para conjuntamente confeccionar una solución precisa y eficiente, que logre materializar la idea germen del proyecto. Tanto esfuerzo ha de encontrar una clara justificación en las consideraciones tenidas en cuenta a la hora de la concepción. Por ello, tanto esta última, como el resto de soluciones relativas al apartado de volumen suspendido, se pueden contemplar como un alarde técnico y resolutivo cuya primera justificación es la expresión formal y por ende un medio para la concepción de arquitecturas con un claro carácter icónico, como museos, centros gubernamentales, espacios deportivos, centros expositivos... Este tipo de concepción arquitectónica, es capaz de dar respuesta a todos aquellos ámbitos proyectuales en los que la atracción de los usuarios²²⁹ y la imposición de hitos en la trama urbana, resultan de relevancia para el éxito de la intervención. El diseño arquitectónico es un medio para un fin, la confección de la espacialidad del hombre, referida a un tiempo y unos condicionantes específicos y este tipo de proyectos son un medio puntero de proyección volumétrica de la arquitectura contemporánea²³⁰.

²²⁸ La cubierta como volumen aglutinador y estructurador de un conjunto también lo podemos encontrar en el caso de volúmenes suspendidos ligeros (tanto reales, como virtuales), ya que se emplean a modo de pérgolas, cubiertas que ofrecen un cobijo común a un conjunto edificatorio, estableciendo una unidad global. Pero en este caso, al no hacer uso de la masividad como medio de expresión, ejerce su acción unificadora como telón de fondo, sin una presencia tan marcada como en el caso del volumen suspendido que emplea la masividad virtual.

²²⁹ Se puede considerar la tipología de volumen suspendido, como propia de la arquitectura pública y de masas, pero como toda regla tiene excepciones y podemos encontrar referentes como el de la Casa de Burdeos de Rem Koolhaas, ya mencionada.

²³⁰ Si la arquitectura tiene como meta la proyección de una espacialidad propia del hombre, capaz de adaptar el medio a sus requerimientos, el factor volumétrico es su modo de expresión al entorno, como imposición visual de un entendimiento material y espacial del mundo. Así cada obra, puede interpretarse como un manifiesto del entendimiento que el arquitecto tiene de lo que el mundo puede llegar a ser. En ese punto radica la relevancia de aquellos proyectos que optan por ir más allá de los convencionalismos y emplean las herramientas proyectuales de las grandes luces.

3.1.b. Volumen puente

Si en el caso anterior el volumen representativo de la edificación se encontraba visualmente desligado del terreno, en este caso el volumen establece un nexo con éste en los extremos²³¹, ejerciendo una tensión entre ambos puntos. Esta denominación, de partida parece bastante gráfica, aunque su concepción resulta bastante más rica y alejada de la primera imagen que nos pasa por la mente, ya que como nos muestra el filósofo Martin Heidegger²³² en una de sus observaciones “...un puente que cruza un río hace que las orillas de éste cambien de carácter. El puente hace que las orillas se encuentren una a otra. Sin él, «se arrastrarían a lo largo del río como indiferentes franjas limítrofes de tierra». El puente realiza la transformación, al unirse a las orillas perpendicularmente”²³³. En estas palabras queda plasmada la importancia del elemento puente, no tanto por su forma o carácter, si no por su influencia sobre los extremos que conecta, estableciendo una tensión entre ellos, que los modifica y enlaza como un todo. Precisamente este es el factor que caracteriza esta tipología con respecto al resto, enfocando las decisiones proyectuales a la puesta en valor de los extremos, mediante la materialización del nexo que denominamos puente. Este elemento concebido como nexo entre extremos, pertenece al campo de la arquitectura de grandes luces, pasando a un segundo plano dentro de la concepción proyectual en favor de los extremos, pese a que el resultado quede absolutamente transformado por su presencia, generando una imagen unitaria del proyecto.

La edificación se establece como medio de expresión, relacionando extremos, pero esto puede matizarse, poniendo el énfasis ya sea en el nexo establecido o en el espacio conformado bajo la edificación. Así se pueden distinguir dos connotaciones claramente diferenciadas asociadas a esta tipología proyectual: la puerta y el puente. Esta distinción establece diferentes prioridades, tanto a la hora del diseño, como en los conceptos clave manejados a la hora de la concepción proyectual. Primeramente el concepto de “puerta” centra su interés en un factor “espacial”, estableciendo la simbología del paso, con las distintas connotaciones que históricamente le han sido atribuidas. Por su parte el concepto de “puente” o “nexo”, enmarca el interés proyectual en un factor “volumétrico”, así como en la propia noción de la unión de las partes, un hecho, como ya se ha explicado, modifica radicalmente la lectura del conjunto. Los conceptos expuestos son los que estructuran el proyecto, más allá de las consideraciones resistentes, que encuentran claros referentes en las tipologías empleadas en los puentes,

²³¹ Los edificios puente constructivamente pueden establecerse, tanto de forma aislada en el terreno, como integrados dentro de la edificación, estableciendo nexos entre otros volúmenes arquitectónicos, conceptualmente distintos del volumen de conexión, ya que de ser perceptivamente parte de una misma familia se entenderán como parte del edificio puente.

²³² Martin Heidegger (1889-1976) es un filósofo alemán y uno de los personajes protagonistas de la filosofía contemporánea.

²³³ ARNHEIM, Rudolf, “La forma visual de la arquitectura”, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), p. 65. (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

dadas las concordancias de las problemáticas resolutiveas presentes en ambos espectros proyectuales.

El marco dimensional en el que se mueven este tipo de edificaciones, es sumamente más limitado que el empleado en la realización de puentes, por lo que el abanico de soluciones estructurales aplicables es sumamente amplio. En este tipo de proyectos la representatividad de la masa o liviandad, son conceptos que pasan a un segundo plano ante los principios expuestos, por lo que existe una mayor libertad en el empleo de materiales y soluciones resistentes, frente a la tipología de volumen suspendido. En este marco una de las soluciones por las que más habitualmente se opta, son las cerchas de acero, ya sea empleando la racionalidad constructiva de los esquemas triangulados o esquemas resistentes basados en la rigidez de los nudos, "*Viga Vierendeel*"²³⁴, que representan un sobre costo, al exigir mayor cantidad de material para resistir los mismos esfuerzos, pero con considerables ventajas a la hora de la distribución interna de la edificación, con menores interferencias de los elementos estructurales.

Al igual que ocurre en el caso de los puentes, los soportes tanto, desde el punto de vista tensional, como expresivo tiene un papel fundamental, surgiendo un equilibrio en torno a ellos, tanto desde el punto de vista de las cargas, como visual. Por esta razón, en esta tipología en muchas ocasiones se ve una continuidad del volumen en los extremos en forma de voladizos, que logran centrar las cargas en los soportes, al tiempo que modifican la percepción del conjunto, concibiendo el volumen elevado como una entidad independiente, con unos medios de sustentación bien marcados.

Figura 122. Torres Petronas en Kuala Lumpur (Malasia), obra de Cesar Pelli (1991-1998).

²³⁴ La adopción de estructuras a base de vigas Vierendeel, permite que los montantes se perciban al interior como una malla de soportes ortogonales, sin mayores interferencias sobre la distribución de los espacios, ya que la adopción de soluciones trianguladas conllevan la incorporación de diagonales, que establecen una mayor división y por consiguiente un condicionamiento espacial. Así aquellos proyectos que opten por la racionalidad constructiva de las cerchas trianguladas, han de asumir ese condicionante de diseño como estructurante funcional de la edificación.

La resolución de los edificios puente puede estar, tanto en relación directa con el terreno, como de forma menos habitual interaccionando entre edificaciones que sirven de soporte a la intervención. Este recurso de diseño se emplea como medio de interacción, tanto funcional, como perceptiva, logrando la imagen unitaria de un conjunto de edificaciones²³⁵, ya tenga la intención de formar un nexo entre las ellas o constituir la entidad simbólica de la puerta. Así ha de concebirse esta tipología, tanto a modo de edificación unitaria, como de recurso empleado dentro de un conjunto edificatorio más amplio. Un ejemplo de cómo esta tipología puede encontrarse incorporada dentro de un conjunto edificatorio de mayor envergadura, hasta el punto de tener un papel secundario, es la pasarela que conecta las Torres Petronas (1991-1998) (Figura 122), en Kuala Lumpur, obra de Cesar Pelli, en las plantas 41 y 42, configurando lo que han denominado como *"skybridge"*. Este elemento, pensado como recurso de evacuación ante incendios, configura un nexo, tanto físico, como perceptivo entre las torres, modificando la interacción entre ellas, concebidas como una unidad dual. Así el volumen puente tiene un papel secundario en el conjunto pero modifica la percepción que se tiene de éstas.

Este recurso proyectual centra su interés desde el punto de vista conceptual, modificando la interpretación que el usuario realiza de la edificación, integrando al proyecto connotaciones, que de partida le son ajenas, estableciéndose, ya sea un entendimiento de unidad entre las partes o un gesto al entorno que puede llegar a simbolizar el acogimiento a la urbe, como nueva puerta de acceso, como ocurre en el caso de la propuesta para el concurso de la Estación de Kioto (Japón) (Figura 123), obra de Tadao Ando. Precisamente la propuesta para este concurso realizada en 1991 por Tadao Ando muestra cómo la configuración espacial de las edificaciones en forma de edificio puente puede hacer que el proyecto se perciva como la nueva puerta de Kioto al mundo, en un país donde el transporte ferroviario tiene una gran relevancia. La edificación se concibe como representación de la ciudad, tanto como enaltecimiento de los logros espaciales como por la lectura abierta que proporciona este acceso visual, mostrando desde la lectura de la edificación, una ciudad abierta cosmopolita y

Figura 123. Proyecto para el concurso de la Estación de Kioto (Japón), obra de Tadao Ando (concurso de 1991).

²³⁵ Esta solución resulta conceptualmente similar a la empleada en la unificación de edificaciones, comentada en los volúmenes suspendidos, empleando la masividad virtual, pero con un alcance más limitado y unas connotaciones radicalmente distintas.

moderna. Desde las primeras estaciones de ferrocarril, este tipo edificatorio, primordialmente funcional, enfocado a acoger tanto al medio de locomoción, como a un amplio volumen de población, ha estado ligado a la expresión de la ciudad. Así estas edificaciones han adquirido connotaciones ajenas a la naturaleza funcional, como medio para la representación de la urbe. Siguiendo este razonamiento, no es de extrañar que un arquitecto como Tadao Ando centre su interés expresivo en la reinterpretación de la *“puerta de la ciudad”*. Para ello hace uso de las grandes luces, con una estructura que se hace patente al exterior como expresión técnica, que permite ese virtuosismo espacial.

En este punto se hace necesaria una reflexión sobre el simbolismo²³⁶ de las edificaciones y su papel en la proyectación actual. Si bien desde los comienzos de la arquitectura moderna ésta se ha librado del sinnúmero de ornamentos y simbologías empleadas a lo largo de los siglos, indudablemente ha encontrado nuevos medios para la aparición de esta simbología o interpretación sentida de la edificación. Las formas y los retos espaciales, los materiales y la manera en la que se presentan, son actualmente las letras que escriben la edificación como medio de expresión ante el mundo.

Al respecto del simbolismo, René Guénon expresa esta cuestión en su libro *“Les Symboles fondamentaux de la Science Sacrée”*: *“¿Por qué se encuentra tanta hostilidad, más o menos confesada, respecto al simbolismo? Ciertamente – decía –, porque es un modo de expresión que se ha convertido en algo completamente ajeno a la mentalidad moderna, y porque el hombre está naturalmente inclinado a desconfiar de aquello que no entiende,... el simbolismo es todo lo contrario de lo que le conviene al racionalismo y todos sus adversarios se comportan, algunos sin saberlo, como verdaderos racionalistas”*²³⁷. Como bien expresa René Guénon, los símbolos implícitos en la edificación, no surgen de una racionalidad directa, sino de un proceso interpretativo, que obliga a recurrir a especulaciones y a referencias de otros símbolos anteriores. Este hecho choca con el entendimiento actual del mundo, en términos científicos y analíticos, puesto que escapa a una comprensión directa y predecible. En la presente tesis se trata, en cierta medida, de estudiar este simbolismo, buscando una lectura práctica que permita una interpretación más directa de las herramientas actualmente empleadas en la confección de los proyectos arquitectónicos y de la urbe en su conjunto. Las grandes luces, partiendo de la técnica, conforman un compendio de soluciones, que permiten confeccionar grandes luces y voladizos, que retan la espacialidad convencional y como tales, se establecen como un símbolo en sí mismas. Ejemplo de ello lo encontramos en las catedrales góticas, donde este recurso técnico y espacial se presenta como medio de ensalzar el culto de una deidad. Así las *“grandes luces”*, como compendio expresivo, basan su funcionamiento en la asunción de una simbología adquirida con su uso. Los símbolos se establecen a través del tiempo, fijando referencias en muchas ocasiones a modelos anteriores, mediante paralelismos visuales, como en el citado caso de la *“puerta”*, que enlaza con los conceptos desarrollados en los proyectos de los *“arcos del triunfo”*.

²³⁶ Etimológicamente *“Símbolo”* significa *“signo de reconocimiento”* y viene de la palabra griega *“symbolon”*.

²³⁷ AROLA, Raimon, *“Alquimia y religión: los símbolos herméticos del siglo XVII”*, Madrid (España), Siruela, 2008, p. 45.

En estos términos se entiende el diseño proyectual y la consiguiente actividad interpretativa, en un marco perceptivo, en el cual se trabaja con símbolos forjados a lo largo de los siglos²³⁸ y reinterpretados hasta la actualidad con las formas. Por eso mismo en este apartado se organiza su lectura en torno a dos símbolos distintos, la puerta y el nexo, es necesario tratarlos por separado, aunque como ya se ha visto, ninguna actuación ni consideración sea del todo independiente ni absoluta.

²³⁸ La simbología empleada en la arquitectura, utiliza referencias acuñadas a lo largo de los siglos, aunque durante la última centuria el ornamento haya desaparecido o modificado su presentación. Algunas referencias aparecen claramente en la producción arquitectónica actual, como el caso de la *“puerta”*, como símbolo atemporal, más allá de la conformación precisa. Las connotaciones de un símbolo son una cuestión enlazada con la sociedad y la conciencia histórica, algo de lo que la arquitectura es partícipe.

- Puerta

En este ámbito proyectual el volumen conformado establece claramente una referencia formal a la puerta, como elemento simbólico, sin una respuesta estrictamente funcionalista, logrando conformar la edificación como medio de representación de unos valores intrínsecamente ligados a la simbología de la forma. Por esta razón para comprender las implicaciones inherentes a esta elección, es necesario conocer dicho referente traído de la tradición arquitectónica.

Desde las ciudades amuralladas, la puerta ha simbolizado el tránsito entre un exterior y un interior, estableciéndose como el elemento que relacionaba ambos ámbitos, intencionalmente diferenciados. Este elemento, que aparece en la arquitectura prácticamente desde sus orígenes, adquiere con el tiempo connotaciones. Así en torno a él, aparecen ornamentaciones, que indican hechos como, quien las erigió, ensalzan una gesta, dan información de lo que ocurre al otro lado... Así las puertas de las ciudades, un elemento claramente funcional destinado al control del flujo de los ciudadanos y mercancías, que entraban y salían de la urbe, con la desaparición de las murallas, se quedaron sin función, permaneciendo la carga simbólica acumulada. Hoy se ven las antiguas puertas de las ciudades como símbolos casi escultóricos, que indican la antigua procedencia de las gentes que las cruzaban y de los gobernantes que las erigieron y embellecieron. Este es el caso de la Puerta de Brandeburgo (1788-1791), una de las 18 antiguas entradas a Berlín, cuando éste estaba amurallado, esta edificación ha permanecido y con el paso de los siglos se ha cargado de significaciones y ha servido de símbolo empleado en distintos eventos y por diferentes regímenes, como medio de enaltecimiento. Así pasa de ser un símbolo de la paz en sus orígenes, a un símbolo de la Guerra Fría durante los años del Telón de Acero y el 1989 pasa a ser el símbolo, casi icónico, de la Alemania reunificada. Por lo tanto las connotaciones respectivas a estas edificaciones, se modifican con los tiempos, pero se han establecido como un tipo proyectual proclive a cargar con las significaciones de la urbe, como elemento firme que refleja el paso de los siglos y las transformaciones que han influenciado en la ciudad.

Los arcos del triunfo son precisamente este referente de la puerta, ya desprovista de su función práctica, destinados a la pura representación de un acontecimiento, régimen... al que representan y ensalzan. El uso de estos ha sido una constante a lo largo de la historia, apareciendo ejemplos como el caso del Arco de Tito, en cuyos bajorrelieves se hace eco de sucesos históricos de relevancia, como la conquista de Jerusalén por los romanos en el 70 d.C. Así la obra nace o se transforma con el fin de reflejar un hecho, convirtiéndose en recordatorio de éste y parte del libro que se escribe en las urbes, reflejando historias de un pasado, que forjan las bases de un futuro.

Por consiguiente la puerta, como elemento simbólico, tradicionalmente se ha constituido como materialización del tránsito, el acogimiento y el elemento en el que las urbes reflejan los acontecimientos que las han forjado a lo largo de los años, hasta forjar su imagen actual. Así el empleo de este modelo, de forma un tanto conceptual, implica que el proyecto nace con la intención de reflejar algo más allá de su propia presencia, ya sea la ciudad o la obra arquitectónica como símbolo del poder.

Un proyecto que pone en consideración todos los condicionantes referentes a esta categoría proyectual, es el edificio de la CCTV (China Central Television) (2002-2012) (Figura 124), obra de Rem Koolhaas y Ole Scheeren de OMA y el estudio de ingeniería Arup. En esta obra se combinan las exigencias funcionales y por consiguiente espaciales relativas a las labores de producción, coordinadas en un único edificio y continuo, formando un bucle de actividades, generando una *“experiencia tridimensional de la continuidad geométrica y social”*. Así en lugar de confeccionar dos torres y un volumen bajo, ambas torres se conectan en la parte superior, permitiendo una mayor coordinación entre las labores realizadas a ambos lados de la edificación. Por lo tanto la

Figura 124. Edificio de la CCTV en Pekín (China), obra de Rem Koolhaas y Ole Scheeren de OMA y el estudio de ingeniería Arup (2002-2012). Imágenes superiores de las fachadas resistentes y las relaciones de demanda de capacidad de los elementos resistentes de las fachadas del edificio de la CCTV.

elección de un modelo de *“volumen puente”*, conlleva ventajas funcionales, al tiempo que desde el punto de vista representativo el proyecto se percibe como un hito en la ciudad de Pekín, que como un inmenso portal, refleja *“un bucle continuo”*, aludiendo a un circuito cerrado de televisión. Formalmente pasa de la concepción bidimensional del modelo, adquiriendo volumen como materialización de las aristas de un prisma virtual. Esta elección lleva asociada una gran complejidad técnica, en cuanto en el volumen puente confeccionado en la parte superior, se genera un gran voladizo, imponiendo en ambas torres unos esfuerzos que modifican su tradicional concepción isótropa. Así este modelo anisótropo se traslada al exterior, mostrando los elementos resistentes, que modifican su densidad y disposición en función de las solicitaciones, resultado del análisis del modelo tridimensional (Figura 280). *“La estructura de la sede de CCTV, y las fuerzas que actúan en ella, son visibles en su fachada: una red de diagonales que se hace más densa en las zonas de mayor estrés, y más flexibles y más abiertos en las áreas que requieren menos apoyo. La propia fachada se convierte en una manifestación visual de la estructura del edificio”*²³⁹. La concepción estructural pasa a ser el ornamento de la edificación y su medio de expresión, conjuntamente con la interpretación volumétrica, que como se ha comentado busca reflejar perceptivamente la función para la que está destinado, al tiempo que confecciona un icono representativo de la cadena, visible en el skyline de la ciudad.

La rotundidad de la forma de la edificación, hace que la visión a través de ella adquiera intensidad, como una vista parcial de la ciudad puesta en valor y hecha propia, constituyéndose como un hito dentro de la urbe cargada de la significación de ésta y de la contemporaneidad que vive. Incluso la inclinación de la parte superior del volumen parece ser un apunte a nuevas metas venideras, como si la edificación anclada en el presente, mirara al futuro, esta es una interpretación simbólica de la edificación a través del gesto, como medio de transmisión de unos valores y un sentir de la firma, que como cadena de televisión busca difundir su imagen plasmada la obra arquitectónica.

El proyecto de la CCTV da fe de la relevancia de la intensa colaboración entre arquitectos e ingenieros en los proyectos de grandes luces, donde la concepción estructural resulta eje central de la concepción. El mismo Rem Koolhaas antes de la inauguración reconoce la relevancia de dicha colaboración cuando dice: *“Estoy muy contento, después de años de intensa colaboración, que el edificio de la CCTV pronto comenzará a desempeñar su papel en la forma en que se pretende”*.

En todo proyecto se establece un balance entre el simbolismo y la funcionalidad, aunque en el panorama actual primordialmente prima este último factor. Pero es necesario considerar que la concepción simbólica de la edificación, en sí misma puede interpretarse como un factor funcional, con el objetivo de constituir la construcción como un elemento *“icónico”*, cuya lectura comunicativa sea en sí misma su principal razón de ser. Enmarcándose entre aquellas obras con una clara función visual, que buscan ser imagen de una empresa, o algún otro tipo de objeto interpretativo, que ve en

²³⁹ Fragmento sacado del artículo de Karina Duque *“Sede de CCTV / OMA”* en Plataforma Arquitectura (23 de mayo de 2012).

el lienzo arquitectónico su medio de representación en el panorama social. En aquellas obras donde la confección de una imagen trascendente es en sí un fin y no solo un medio de resolución proyectual, otros factores funcionales pasan a un segundo plano, denotándose una mayor libertad a la hora del diseño, pese a que la adopción de todo gesto adquiere un interés especial, lo que implica un cuidado con la adopción de las simbologías empleadas, como medio dialéctico. *“Como en todos los períodos históricos, hoy en día la mayor parte de las construcciones existentes centran sus esfuerzos en la consecución de la función utilitaria. No obstante, junto a estas edificaciones se han venido dando otro tipo de arquitecturas para las que la función preponderante es la simbólica. En algunos casos la función simbólica de la construcción tiene tal trascendencia que el edificio carece de cualquier otro sentido fuera de ella; diríamos que más que arquitectura es monumento. Tradicionalmente, la arquitectura símbolo ha estado al servicio del poder político y eclesiástico, mientras que hoy son cada vez más numerosas las referencias al poder económico. La que algunos estudiosos denominan «arquitectura de la autoridad» no se manifiesta por igual en todos los períodos históricos, sino que en algunos de ellos alcanza un mayor desarrollo.*

El significado de la arquitectura, su mensaje, se manifiesta a través del espacio, de los volúmenes y de las formas abstractas propias del lenguaje arquitectónico”²⁴⁰.

La arquitectura es la vía de representación de creencias, poder y economía, entre otros, siendo el medio en el que se materializa su imagen en términos urbanos y sociales. En este ámbito encontramos un sinfín de variantes proyectuales, pero en el presente punto nos interesan aquellas que se centran en la “puerta”, como símbolo a reinterpretar desde la concepción arquitectónica contemporánea, en el que se desarrollan la expresión de entes o conceptos ajenos a la propia edificación. Hoy, como se ha dicho, se

Figura 125. Arco de la Défense en París (Francia), obra de los arquitectos Johann Otto Von Spreckelsen y Paul Andreu y la ingeniería Bouygues (1982- 1989).

²⁴⁰ MOLINÉ ESCALONA, Miguel, “Las claves de la Arquitectura”, España, Ed. Planeta, 1994.

traslada la significación a la forma, dada la práctica desaparición de la ornamentación en la concepción actual de la arquitectura. La lectura de la edificación está ligada, tanto a la expresión constructiva y técnica, como a la forma, como gesto volumétrico y espacial cargado de significación.

Tal vez el ejemplo más claro de este tipo de proyectos es el Arco de la Défense²⁴¹ (Figura 125) en París (1982- 1989), obra de los arquitectos Johann Otto Von Spreckelsen y Paul Andreu²⁴² y la ingeniería Bouygues²⁴³. El vano de 70 metros se configura al igual que el resto de la obra en hormigón, empleando una serie de vigas de hormigón postensadas que cubren dicha luz, conformando una plataforma de una hectárea a 110 metros de altura, conformando un mirador a la ciudad. Este volumen superior contiene un centro de conferencias y exposiciones, un museo de informática, un restaurante y un mirador desde el que se ve el distrito de La Défense y el oeste de París²⁴⁴. Por su parte los volúmenes laterales alojan las oficinas.

Este proyecto se enclava en el centro económico de la ciudad de París y por su concepción icónica se ha convertido en un referente de dicho lugar. Este proyecto fue inaugurado antes de que se concluyeran completamente las obras, realizando un desfile militar, celebrando el bicentenario de la Revolución Francesa. Así la misión final de este edificio es la de convertirse en el símbolo de la pujanza económica y política del poder que lo erigió. La rotundidad de su forma prismática y el modelo empleado, claramente referido a los arcos del triunfo, queda patente incluso en las referencias urbanas de la ciudad, ya que esta obra, completa un eje imaginario que une el Arco del Triunfo del Carrousel y el Arco del Triunfo de París. Ambos arcos manifestación de victorias bélicas, mientras que el Arco de La Défense manifiesta las victorias económicas del país. El panorama socioeconómico se ha modificado mucho en los últimos siglos y hoy este tipo de proyectos ya no reflejan tanto hechos bélicos, como económicos y sociales, siendo reflejo del estadio contemporáneo de las urbes.

Se puede concretar que la tipología de volumen puente, concebida como puerta, intenta transmitir las virtudes y cualidades de la ciudad o un ente de poder, a la edificación, como legado de un tiempo. Así el principal punto de este tipo de proyectos es la rotundidad volumétrica, a la que se suma la matización de la resolución constructiva. La

²⁴¹ Aunque popularmente denominado *Arco de la Défense*, por su emplazamiento en el distrito de La Défense, su denominación oficial es "*Grande Arche de la Fraternité*" (El Gran Arco de la Fraternidad).

²⁴² El autor del proyecto del Arco de la Défense es Johann Otto Von Spreckelsen (1929–1987), pero al morir éste durante la construcción tomó su lugar Paul Andreu hasta la conclusión de las obras.

²⁴³ Bouygues es la mayor empresa de ingeniería de Francia, por lo que se encuentra relacionada con la mayor parte de proyectos arquitectónicos y de ingeniería civil relevantes en el país. Esta empresa tiene presencia en 50 países, con una extensa plantilla, por lo que está implicada en la resolución de grandes proyectos a lo largo de todo el globo.

²⁴⁴ En la parte interior del arco se ve un núcleo de ascensores de vidrio, que da acceso particular a todo el volumen superior, al ser público el acceso a éste, frente al carácter privado de las oficinas alojadas en los volúmenes laterales.

resolución técnica pasa a ser un medio de transmisión lingüística, mostrando cualidades como firmeza, rotundidad, atemporalidad, exaltación técnica... Por esta razón son aptas, tanto las estructuras de hormigón, como metálicas, aunque su elección responda a consideraciones ajenas al pragmatismo resolutivo. Al corresponder la expresión al factor volumétrico, quedan fuera de toda elección las estructuras ligeras, empleándose habitualmente soluciones como cerchas o vigas de gran canto, en las que el postensado es una herramienta básica.

Los proyectos de grandes luces en la actualidad, como ya se ha puesto de manifiesto, han dar respuesta a las problemáticas de nuestro tiempo con los medios técnicos y lingüísticos propios de la contemporaneidad. Para catalogar una solución como contemporánea, ha de conformar una solución propia de nuestro tiempo y no la aplicación de modelos desfasados, claramente ligados a otros marcos sociales y técnicos. Así en el presente punto, se ha visto como recursos expresivos, tradicionalmente empleados, pueden ser reinterpretados y vistos con las herramientas resolutivas y expresivas pertenecientes al margen temporal de la contemporaneidad. Hoy ha de considerarse la suma de la experiencia acumulada con los siglos y la sorprendente capacidad de los materiales, la técnica, el cálculo y la representación, que en conjunto hacen de la labor proyectual un equilibrio entre el peso de los conceptos y los medios para su materialización. De la sensibilidad interpretativa, surgen este tipo de obras concebidas como iconos y entes claramente anclados al lugar y al tiempo en que se han realizado.

- Nexo

A este respecto se encuentran más fielmente reflejados los principios conceptuales del “puente” como medio de conexión, siendo más relevante la interrelación de los elementos, que el volumen conformado. Así aparecen propuestas como la de “Tenacidad” (Figura 126), un proyecto creado por la empresa danesa Pinkcloud, con el fin de hacer una propuesta de vivienda pública para la ciudad de Nueva York, para albergar a 400.000 habitantes, en una ciudad con serios problemas de pobreza y precariedad habitacional en determinados barrios. Este proyecto, siguiendo algunos de los principios del ideario de Le Corbusier, busca liberar el plano del suelo, al que llegan distintas bandas de bloques, desarrollando sobre estos un gran volumen programático en un edificio puente. Proyectos como éste son una declaración de intenciones, que ponen de manifiesto las virtudes tipológicas de estas soluciones, para dar respuesta funcional a las problemáticas actuales de las urbes.

Figura 126. Proyecto “Tenacidad” para Nueva York (Estados Unidos), obra del estudio Pinkcloud (2012).

El Proyecto “*Tenacidad*”, pone de manifiesto la intrínseca implicación entre la forma actual de concebir la arquitectura y las grandes luces. Si bien este proyecto tiene un aspecto un tanto utópico, hay que tener presente que panorama actual permite la materialización de este tipo de propuestas, que décadas atrás no hubieran pasado de ser una imagen sugerente de lo que podría llegar a ser la ciudad.

Los edificios puente llevan asociados altos costes de ejecución, frente a las soluciones convencionales que se apartan del uso de las grandes luces. Por esta razón su empleo ha de estar originado por una clara motivación, ya sea salvar un obstáculo, como ocurre en ingeniería civil o como resulta más habitual en arquitectura, una motivación representativa o funcional. La adopción de este tipo de soluciones sin una clara motivación de antemano, se puede tildar de “*capricho*”, ya que un aumento de gastos en el proyecto, sin una clara repercusión en el resultado no es un correcto proceder. De ahí que se haga repetidas veces hincapié en que en el panorama actual, especialmente donde la técnica permite la resolución espacial de prácticamente cualquier propuesta, adquiera un mayor valor la reflexión sobre las justificaciones que motivan todo proceder en el diseño del proyecto y en especial la adopción de grandes luces, como herramienta de diseño espacial más intrínsecamente ligada con el panorama actual. A la hora de hablar de los proyectos de grandes luces aparecen las consideraciones “*beneficios-costos*”. Precisamente a lo largo del presente estudio se muestran algunas líneas de actuación, en las cuales se encuentra motivación suficiente para el empleo de estas soluciones y el éxito de las propuestas desde los objetivos previos. Las soluciones de grandes luces son un medio eficiente para logran los resultados proyectuales deseados, algo preferible a opciones más convencionales, ya que como dice Sun Tzu, “*La batalla mantenida por mucho tiempo, incluso ganando, vaciará tus arcas, cansará tus tropas y embotará tu espada. La victoria rápida es el principal objetivo de la guerra*”²⁴⁵.

Un ejemplo cercano de este tipo de proyectos es el edificio del Ayuntamiento de Benidorm (2001-2002) (Figura 127), obra de José Luis Camarasa y AMP²⁴⁶. En este proyecto se alza el volumen edificado para configurar bajo éste una plaza pública, simbolizando, por una parte el papel dominante del ayuntamiento, al tiempo que le brinda un lugar de reunión a la urbe, un nuevo foco de atención que puede albergar actividades y configurar un punto vital en el funcionamiento de la población. Se puede considerar éste como un ejemplo de reinterpretación de la plaza mayor, con el edificio del ayuntamiento presidiendo el espacio. Aunque en esta ocasión la disposición de los elementos establece un espacio claramente lineal, con dos caras abiertas a las zonas ajardinadas, dejando el nivel del suelo como un espacio lúdico, que concuerda con el carácter vacacional de la población, apareciendo el volumen puente casi como un elemento exento, suspendido en el aire, que acoge en su interior todas las labores de gestión, mostradas como un hito en la ciudad, con una clara presencia distante.

²⁴⁵ Sun Tzu, “*El arte de la guerra*”.

²⁴⁶ Los arquitectos implicados en el proyecto del Ayuntamiento de Benidorm son José Luis Camarasa (arquitecto municipal de Benidorm) y Juan Añón, Rafael Martínez, Gemma Martí, Ramón Calvo (AMP).

En este proyecto la resolución estructural se ha caracterizado por una solución eficiente, empleando dos grandes vigas Warren de tres plantas de canto (Figura 127), con montantes intercalados para reducir las luces de las barras superiores e inferiores, sometidas respectivamente a compresión y tracción. Durante el proceso constructivo éstas se alzan sobre los soportes de hormigón, empleando unos planos resistentes intermedios que las enlazan, permitiendo que conserven su posición, para ir componiendo posteriormente el resto de elementos estructurales de menor envergadura. Este tipo de resolución estructural, dentro del mayor coste que supone el empleo de las grandes luces, permite contener el gasto, obteniendo así mismo un gran resultado, que presenta la estructura como elemento estético. Así mismo al mostrar al exterior los distintos forjados, reducen visualmente la escala de referencia de la intervención, acercándola a la del hombre. La percepción del volumen, sin estas distinciones, generaría una diferencia escalar, que modificaría radicalmente la percepción del edificio, otorgándole una escala más urbana y menos humana.

Figura 127. Ayuntamiento de Benidorm (España), obra de José Luis Camarasa y AMP (2001-2002). Se muestra la construcción de la gran cercha, que permite salvar el vano de la plaza.

En este tipo de proyectos, como se ha visto, se trabajan con problemáticas similares a las de los puentes, pero con la complejidad añadida de la resolución programática interna y la expresión visual del elemento, enfocada al éxito de la intervención. Son soluciones costosas, pero al asemejarse a las problemáticas de los puentes, pueden adoptar esquemas resolutivos propios de estos, conteniendo el gasto. Pese a esta posibilidad, nos encontramos ante un panorama en el que rara vez se emplean esquemas distintos a las vigas trianguladas, vigas vierendeel o vigas de canto postensadas, empleando, tanto acero, como hormigón. Así mismo, dado el coste de la estructura, se busca limitar las solicitaciones, por lo que generalmente la presencia de estas edificaciones no es monolítica, aunque se pueden encontrar excepciones como el Museo Brasileño de Escultura (MuBE) (1987) (Figura 128) de Paulo Mendes da Rocha, en el que el volumen puente se encuentra carente de contenido interior, actuando como un volumen monolítico, bajo cuya presencia se desarrollan las actividades del proyecto.

Figura 128. Museo Brasileño de Escultura (MuBE) de São Paulo (Brasil), obra de Paulo Mendes da Rocha (1987).

En todo caso son soluciones que se hacen patentes en el entorno, logrando modificar, tanto el espacio bajo ellas, como en el circundante, que encuentra un nuevo foco de atención y nuevos espacios en torno a los que desarrollar su actividad. Por lo que respecta al hecho conectivo y los espacios interiores, en la generalidad de los proyectos de este tipo, resulta un factor secundario, frente a la conformación visual y el espacio materializado bajo el volumen arquitectónico. Estos proyectos tienen en cuenta su integración funcional en la trama urbana como base fundamental. Dada la relevancia escalar de la estructura, ésta generalmente se ve reflejada al exterior como elemento visual que condiciona la percepción e interpretación del proyecto.

3.1.c. Volumen en voladizo

Al hablar de proyectos de grandes luces, habitualmente nos referimos al vano constituido entre soportes, cuando la entidad de éste es lo suficientemente elevada para trascender los márgenes de la cotidianidad constructiva, unos límites que han ido ampliándose con el paso de los siglos, aunque en menor cuantía que las luces máximas alcanzables con los medios técnicos disponibles. Pero otro ámbito de gran relevancia, tanto por el reto técnico, como por el impacto visual que ejerce en los usuarios, son las soluciones en voladizo, donde toda la sustentación se concentra en uno de los extremos. En tipologías anteriores, como en el caso de volumen suspendido, se han planteado múltiples opciones donde los voladizos son un recurso básico. La distinción sustancial del presente punto, es que frente a los casos expuestos, en que la expresión se lograba a través de la exaltación del volumen suspendido, en éste, el efecto es más limitado centrándose en el vuelo de parte de la edificación. Este gesto logra distorsionar la percepción de la estabilidad de la obra. Frente a esos ejemplos, el volumen resistente al que se encuentra asociado el voladizo, resulta patente en la lectura de la obra, sin la intencionalidad de reducir su impacto visual.

La intencionalidad expresiva no se centra en la levitación, sino en la pérdida del equilibrio visual de la obra. Dentro de esta categoría encontramos multitud de interpretaciones, desde

Figura 129. Torres KIO en Madrid (España), obra de Philip Johnson y John Burgee (1996).

proyectos que lo toman como base expresiva, a otros que centran su uso de forma puntual, todos ellos con una clara función simbólica. Un proyecto que hace de la imagen inestable un auténtico icono, son las Torres KIO²⁴⁷ (Figura 129), con su inclinación simbolizan una puerta en el extremo norte de la Castellana (Madrid). Las dos torres se inclinan, perdiendo la serenidad que suele caracterizar las torres, como edificios claramente enfocados en la resolución de la problemática de los edificios en altura. Ambas torres enfrentadas se compensan visualmente, la una con la otra, apuntando a un eje imaginario, como una fuga que prolongara el principal eje de la ciudad de Madrid, estableciendo una alusión a Europa, configurándose como la puerta de la ciudad a los nuevos tiempos, lo que llevó a su denominación como *“Puerta de Europa”*. Una simbología, como ya se ha mencionado, traída de los amurallamientos medievales, se ha trasladado a lo largo de la historia, como punto de referencia de la ciudad ante los visitantes. En este proyecto se ejemplifican a la perfección las capacidades expresivas de este recurso espacial, siendo gesto suficiente para la estructuración de todo el proyecto.

Un factor diferenciador dentro de esta tipología es su papel dentro de la edificación, dadas las diferentes lecturas que se producen cuando éste aparece aislado o asociado al resto de la edificación. En el primer caso, la falta de contundencia del volumen al que se encuentra ligado, permite entenderlo como una entidad independiente, con una mayor potencialidad expresiva. En el segundo caso, al interpretarse como final de un volumen edificado de mayor entidad, no obtiene la anterior independencia y ha de ser leído de forma global con el resto de la edificación.

La diferenciación entre las dos tipologías anteriormente expuestas, redunda en el papel del voladizo como medio de expresión. En el caso de los *“voladizos aislados”*, se constituye como elemento monopolizador de los aspectos expresivos de la obra, lo que otorga a la solución un gran impacto visual y un mayor dramatismo, generando una tensión visual al minimizar el contacto con el suelo y la contundencia del volumen nexo, que sirve como contrapunto visual. Por su parte, los *“voladizos asociados”* se perciben como parte de un conjunto, lo que genera una cierta compensación visual, matizando el reto gravitatorio en un punto, que ejerce la tensión expresiva de la obra, condicionando la lectura del conjunto. Así, mientras que en el primer caso es *“el gesto”*, en el segundo es *“un gesto”*, si bien en ambos casos la rotundidad vehemente del reto técnico, condiciona la lectura de la obra, en los voladizos asociados pertenece a un conjunto en el que no se niega el papel del resto de los componentes.

Hay que ser conscientes de las limitaciones dimensionales a los voladizos, como soluciones condicionadas al razonamiento resistente y la economía de medios. Los voladizos pueden ser en un rango dimensional inferior, un factor económico para compensar los giros en los soportes en vigas continuas, reduciendo la entidad de los elementos constructivos de los vanos contiguos al voladizo, pero en las dimensiones relativas a las grandes luces no suele ser un factor de relevancia. Los grandes voladizos son soluciones costosas, justificadas por una necesidad expresiva, puesto que no existe una motivación funcional a la adopción de este tipo de soluciones, ajena a la propia imposición visual de la obra sobre el entorno y el impacto sobre el viandante y el usuario.

²⁴⁷ Esta denominación popular surgió del nombre de la empresa promotora, Kuwait Investments Office (KIO).

Las soluciones estructurales más empleadas son las cerchas trianguladas de acero, aunque se encuentran excepciones como el caso de La sede de Endesa en Madrid (Figura 130), edificio proyectado por Rafael de La-Hoz Castanys (1999-2003), que configura un gran voladizo mediante una viga de canto de hormigón postensado, sobre el que se asienta uno de los volúmenes de oficinas, como elemento representativo del conjunto. Los factores de diseño que dictan las formas de este edificio, son preponderantemente prácticos y en vista a la representatividad de éste, como buque insignia de una compañía energética que busca reflejar sus intereses y valores, mediante decisiones arquitectónicas, como medio para generar una buena imagen de empresa²⁴⁸. Este edificio se sitúa lindando con una autovía, lo que centra

Figura 130. La sede de Endesa en Madrid (España), obra de Rafael de La-Hoz Castanys (1999-2003).

²⁴⁸ Algunas de las decisiones proyectuales enfocadas a demostrar la implicación del conjunto, como ente respetuoso con el medio ambiente, son: la reducción de los consumos de agua, gas y electricidad, rebajando las emisiones de CO₂ y de otros tipos de residuos, implantando, entre otros, un programa de reciclaje. Este edificio se caracterizó por ser el primero en España en obtener la Certificación de Eficiencia Energética "Triple A" (al obtener los certificados en Eficiencia Energética (UNE-E 16.001), Calidad Ambiental en Interiores (UNE 171330-3), y la certificación de Gestión Ambiental (ISO 14.001)). Todas estas decisiones enfocadas en la consecución de un edificio sostenible, tienen repercusiones proyectuales, tales como la conformación de las fachadas de forma claramente diferenciada en función de la orientación... Pero uno de los aspectos visuales más destacados, es la cubierta acristalada que sobrevuela el conjunto edificado, con una inclinación de 3,14%, confiriéndole una mejor protección de las inclemencias meteorológicas y comportamiento climático, reduciendo los consumos energéticos de la edificación, al igual que hemos comentado en las fachadas. Además esta segunda cubierta, oculta tras de sí la tramoya técnica que se conforma en los tejados de las oficinas, un factor a valorar dada la cercanía del aeropuerto y su percepción desde el aire.

el esfuerzo representativo en esa fachada, como se evidencia cuando contemplamos la planta del edificio, organizado de forma ortogonal al noreste, en un esquema en peine, mientras que en la suroeste, el edificio se ondula como una serpiente buscando su lugar, hasta que ésta decide levantarse del terreno, continuando en un gran voladizo que mira a la carretera, atrayendo a su vez las miradas de cuantos pasan a su lado. El gran voladizo surgido en un último quiebro del volumen sur, mantiene inalterable la superficie superior de la fachada de lamas, estableciendo la continuidad del volumen, que a nivel del basamento, sustituye la consecución de columnas de hormigón por un elemento de hormigón sumamente masivo, algo que consideraríamos propio del campo de la ingeniería civil, insertado como elemento expresivo, que se alza para conformar el gran voladizo, sobre el que se apoya el volumen de oficinas. Tal vez uno de los puntos por los que más destaca este gesto, es por la traslación de un elemento estructural propio de la construcción de puentes a un edificio de oficinas, lo que denota un gran interés por la consecución de la espacialidad resultante y la lectura fraccionada de este volumen, que enfrenta con éxito técnicas de diferentes ámbitos constructivos, demostrando la potencialidad inherente a esta fusión.

Las soluciones de *“volumen en voladizo”* se establecen en el proyecto, como elemento expresivo enfocado a la representatividad visual de la edificación, como medio de captar la atención de los que pasan por delante, ya que los retos gravitatorios, suscitan bajo cualquier forma en que se presenten, una respuesta en el espectador, originada en su entendimiento de la estabilidad y la puesta en cuestión de éste, desde el proyecto. Ambos factores claramente dramatizados, llevados al límite en el esfuerzo conformador de los voladizos, sumando al reto estructural y espacial, entendidos al unísono.

La distinción entre voladizos aislados y asociados, es por tanto una distinción expresiva de la resolución estructural y espacial dentro del conjunto, pudiendo un mismo gesto adquirir significaciones diferentes.

- Aislado

En este caso el vuelo adquiere toda la representatividad, centrando la atención en los medios de sustentación por su escasa entidad comparativamente, se conforman proyectos que vuelan de una *“manera dramática”*, generando gran tensión al minimizarse la entidad de los elementos que lo relacionan con el terreno.

Un factor que incrementa el efecto deseado, es el contraste entre la luz y las sombras proyectadas por el volumen volado, realizando los volúmenes perceptivamente desde el exterior, al tiempo que se matiza la calidad espacial de cada uno. Una obra que pone de manifiesto este valor extremo de la propuesta, es el Pass Museum (Figura 131) (2011), obra de Werner Tscholl, una pequeña pieza de hormigón en uno de los viejos caminos que cruzan los Alpes austriacos (por los valles de Passeiertal y de Ötztal). En medio de este sobrecogedor paraje se enclava una humilde obra, homenaje a todos aquellos pioneros que antaño cruzaban esta ruta. Así el edificio aparece al exterior como una roca cristalizada, al tiempo que en su interior se materializa como si de una cueva artificial se tratara, conformando un refugio que honra la historia. Pese a sus reducidas dimensiones esta obra opta por una solución en voladizo, asomándose desde la ladera sobre el camino, para configurar una estampa impactante que suscite el interés del viajero por adentrarse en su interior, motivando así el éxito de la intervención, a la hora de transmitir la información contenida en el programa museístico que alberga en su interior.

Figura 131. Pass Museum (Austria), obra de Werner Tscholl (2011).

Las grandes luces como medio de reflexión y diseño proyectual, como se ha visto, son aplicables a distintas escalas, ya que más allá del factor dimensional es una actitud constructiva, que busca retar la serenidad de los convencionalismos constructivos en un intento de trasgredir la monótona visión del mundo que estos otorgan. De este pensamiento se deduce que el empleo de este recurso en el diseño exterior de las edificaciones, se encuentra claramente enfocado en un interés expresivo, más allá de cualquier otra consideración funcional que pueda cumplir dicha elección. Por eso las soluciones en voladizo y más si cabe si se encuentran de forma unitaria, constituyen un claro referente visual en el entorno.

Otro proyecto que hace gala de las virtudes de esta solución es el Villa Méditerranée²⁴⁹ (Figura 132) de Marsella (2013), obra de Stefano Boeri, quien define la obra como “un

Figura 132. Villa Méditerranée de Marsella (Francia), obra de Stefano Boeri (2013).

²⁴⁹ El edificio Villa Méditerranée está dedicado a un uso museístico, que refleja la historia y culturas desarrolladas en el Mar Mediterráneo. Este proyecto se realizó con motivo de la designación de la ciudad de Marsella como Capital Europea de la Cultura en el año 2013.

lugar de reflexión y de investigación que abarca físicamente el mar". El comentario del autor da fe de las intenciones que motivan la elección de este diseño para la edificación. El proyecto se conforma como un volumen lateral del que parte el gran voladizo, inclinándose tanto la fachada que queda bajo el voladizo, como la cara inferior de éste. En el espacio en sombra conformado, se emplaza un estanque que hace clara referencia al mar en un intento de formar una metáfora arquitectónica, donde *"el edificio abraza y acoge el mar"*, como referencia misma a su continente, como Museo de la Historia y las Culturas de la Región Mediterránea. En este caso la piel se concibe como un elemento continuo, dándole incluso a la cara inferior del voladizo ese mismo carácter, con ventanales abiertos en él. Solo se conforman con muro cortina los dos laterales, lo que favorece el entendimiento del resto de los paramentos como una banda continua, más que como un volumen rotundo.

En este proyecto la estructura metálica se conforma mediante cuatro vigas Warren que se retranquean al interior, velando su presencia, que marca la espacialidad interior del edificio. La parte más relevante de los espacios expositivos se concentran precisamente en el área en voladizo, que como se ha dicho abre ventanas, tanto en el techo, como en el suelo, conectando perceptivamente el concepto del mar, con el cielo y el hombre y su legado en medio de ambos extremos. En este proyecto la estructura se deja meramente intuida desde el exterior, pero queda claramente marcada en el interior como el espacio del hombre y lo que a él pertenece.

Este proyecto de Marsella, no solo se constituye como un icono capaz de representar la ciudad y atraer a los visitantes para que conozcan mejor la belleza de su legado, sino que a su vez es un brillante elemento dialéctico. Las formas y la conformación de los paramentos desde la contemporaneidad, son capaces de transmitir la implicación de la ciudad con el mar, la veneración que tienen a éste, al tiempo que ensalza la historia, como referente que nos permite entender el entorno en el que vivimos y a nosotros mismos, como parte de un todo que conecta lo que fue, con lo que será. Este proyecto muestra la posición contemporánea ante un hecho tan trascendente como nuestro papel en la línea temporal y en ella las soluciones de grandes luces son vitales para expresar el entendimiento espacial de un tiempo como el nuestro, donde se abren sorprendentemente las posibilidades y la arquitectura exige más que nunca una implicación reflexiva, que otorgue a la obra de significación y una clara razón de ser.

El hecho de recaer en el gesto estructural la potencialidad expresiva de la obra, da como resultado proyectos extraordinariamente comunicativos e impactantes. Estos pueden estar resueltos en cualquier material, pero según se incrementan dimensionalmente claramente se decantan por las estructuras metálicas y la triangulación como medios inequívocos para conformar el gesto con una menor repercusión material y económica, aunque este tipo de resolución siempre resulte considerablemente más costosa. El canto del voladizo es un factor clave para la resolución de este tipo de proyectos, ya que una mayor inercia del elemento estructural, permite mantener en los márgenes realizables las dimensiones de las barras que conforman la viga triangulada. Así es más factible realizar este tipo de voladizos con un canto de más de una planta, aunque

contra menor sea la esbeltez de dicho elemento menor será su impacto visual, aunque resulte más asumible económicamente el alarde expresivo.

Los voladizos solo son posibles con materiales capaces de trabajar a flexión, lo que implica resistir, tanto esfuerzos de compresión, como de tracción. En el caso de las cerchas, el esquema resistente hace que los elementos estructurales, estén sometidos a esfuerzos simples, tracciones y compresiones, lo que permite una diferenciación resolutive de las barras sometidas, a uno u otro tipo de esfuerzo. Las cerchas metálicas son un recurso exclusivo de los dos últimos siglos²⁵⁰ y con especial relevancia durante el siglo XX, donde se ha empleado para marcar un punto de atención, capaz de suscitar un interés en el usuario. A lo largo de la historia, los voladizos no se han concebido como base proyectual en los términos que se desarrolla durante los últimos años, aunque se encuentran excepciones²⁵¹.

²⁵⁰ Las cerchas anteriormente al siglo XIX se realizaban en madera, para la conformación de las cubiertas, cuando las escuadrías de madera disponibles no permitían la resolución sin recurrir a este tipo de soluciones. Precisamente en este ámbito, es donde encuentran sus orígenes los esquemas estructurales empleados en las cerchas metálicas, aunque el desarrollo e implantación generalizada de las cerchas se produce durante el siglo XIX, como sistema capaz de resolver, tanto la cubrición, como la conformación de grandes vanos en forjados o incluso grandes puentes.

²⁵¹ Anteriormente se encuentran referentes en contadas ocasiones, como en el Museo de Arte Contemporáneo (MAC) de Niteroi, Río de Janeiro, obra del arquitecto Oscar Niemeyer, aunque en este caso el apoyo es intermedio, compensándose los voladizos, por lo que se encuadra en otra categoría proyectual, aunque el uso de voladizos de esa entidad lo conforma como un claro referente.

- Asociado

Esta opción es más común, ya que al trabajar con otros volúmenes adicionales permite establecer recursos apropiados para realizar el voladizo por medios más económicos, como ya se explicó anteriormente en el caso de la Torre Mare Nostrum (Figura 133), obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue, en la que el canto del voladizo se emplea para conformar una cercha de gran canto, que se extiende más allá del propio voladizo, apoyándose en dos núcleos rígidos de hormigón, lo que facilita la integración del voladizo en la resolución general de la estructura. Así la adopción de una solución en voladizo se entiende como elemento representativo dentro de una obra más compleja, siendo el voladizo parte de la lectura de la edificación, como parte de un todo. En este caso se ve como, tanto la adopción de un gran canto, como el empleo de vigas trianguladas de acero pueden mantener las dimensiones de los elementos constructivos dentro de los márgenes de lo razonable.

Figura 133. Torre Mare Nostrum, Barcelona (España), obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue (2006).

Aunque como se ha visto, aparecen las cerchas como recurso más ampliamente empleado en la resolución de este tipo de obras, así como en otras muchas tipologías relativas a las grandes luces. Existen otras opciones menos empleadas, como la resolución de un tubo estructural, como ocurre en el caso del Museo Hoki²⁵² (Figura 134), Chiba (Japón) obra de Tomohiko Yamanashi, culminado en 2010. Este proyecto está enclavado en una estrecha y alargada parcela, lo que dio origen a la conformación de éste como la suma de largos tubos rectangulares de hormigón armado, asentados sobre el terreno, apoyándose sobre ellos a su vez otro tubo prismático de acero cor-ten, abierto parcialmente en una de sus caras para permitir el paso de la luz. En este obra el empleo del voladizo es más un gesto interpretativo, que ensalza la imagen del proyecto,

²⁵² El museo Hoki fue realizado para exponer la colección del magnate japonés Masao Hoki, que anteriormente mostraba su colección dos veces al año, pero tras el aumento de los asistentes, decidió construir un museo que albergara su colección.

que un auténtico espacio expositivo, ya que el tramo en el que éste se desarrolla, parcialmente se ve desprovisto de contenido, con el fin de percibir el tubo formalmente sin la intromisión de los cerramientos, que desvirtuarían dicha interpretación del volumen edificado. La independencia formal del volumen que culmina en voladizo, se ensalza concentrando el apoyo en dos puntos, que permanecen ocultos en la sombra del volumen ligeramente elevado. Este recurso formal tiene una clara relación con el pequeño entrante que se establece en la Torre Mare Nostrum, que busca la concepción del volumen como elemento unitario, rompiendo la continuidad del plano de fachada, potenciando el efecto logrado con el esfuerzo constructivo del voladizo.

Por lo que respecta a las soluciones en hormigón, encontramos proyectos como la mencionada Sede de Endesa en Madrid, que emplea un recurso propio de la

Figura 134. Museo Hoki, Chiba (Japón) obra de Tomohiko Yamanashi (2010).

construcción de puentes, integrado a un proyecto de oficinas, compaginando ambos mundos en armonía, rematando un amplio complejo con un gesto que logra suscitar el interés de los transeúntes. En éste, al igual que en el resto de proyectos comentados, el diseño del resto del proyecto goza de una cierta autonomía que permite dar respuesta a los factores funcionales, concentrando el esfuerzo representativo en este gesto. Esta solución, en términos globales, logra los efectos representativos propios de las soluciones en voladizo, con mayor economía de medios que en el caso de los voladizos aislados, permitiendo una respuesta funcional más amplia, en comparación con dicho caso, en el que se ve supeditado al gesto expresivo y representativo.

Un factor a tener en cuenta de los proyectos con voladizos de grandes luces, es la tensión espacial conformada bajo ellos, generando espacios exteriores imbuidos del espíritu del proyecto y que transformados o no, el edificio hace suyos y con ello parte del repertorio lingüístico empleado, que permite la lectura de la obra como un conjunto de intenciones y deseos materializados, capaces de transmitir unos valores.

Estructuralmente, aunque hay otras opciones, como se ha visto, la más extendida y que proporciona una mayor economía de medios son las cerchas, por lo que en la mayoría de los casos son la solución adoptada, permaneciendo oculta al interior o patente en la propia piel. Una solución que no se ha empleado en arquitectura pese a sus obvias ventajas, son las soluciones atirantadas, que de forma similar a como aparecen en los puentes, permitirían la conformación de un plano resistente sobre el que constituir la edificación. Una de las posibles razones, es la necesidad de un mástil de gran altura del que descolgar los cables, así como el empleo de una mole capaz de equilibrar las tensiones a los que estos están sometidos, trasladando los esfuerzos al terreno. Posiblemente este conjunto de requerimientos desvirtuaría la imagen de la obra, pero así mismo se considera que en un sinnúmero de ocasiones podría llegar a resultar una opción válida, que pudiera rivalizar con las soluciones referidas a las cerchas.

En capítulos anteriores, se comentó la relevancia del campo de los puentes para el entendimiento de los márgenes limitativos de la técnica. Precisamente en este campo es donde las soluciones que podemos considerar en los límites de lo arquitectónicamente realizable, han de enfocarse como medio para encontrar la solución técnica capaz de dar respuesta a nuevas espacialidades. En el caso de los puentes, las vigas en celosía de por sí, no tienen unos márgenes dimensionales muy elevados frente a otras opciones como, arcos, puentes suspendidos y puentes atirantados, pero en el ámbito de la arquitectura sí responden a las exigencias máximas planteadas. Por ello al poner en tela de juicio los márgenes dimensionales aplicados en la arquitectura, han de considerarse otras opciones técnicas, cuya eficiencia ha sido sobradamente demostrada.

En el caso de los voladizos asociados, la solución técnica empleada en la conformación del voladizo puede encontrarse o no diferenciada, pero ha de estar concebida como parte de un conjunto y en estos términos se produce la expresión proyectual donde cada parte tiene una función y el establecimiento de un foco de atención e interés se establece como una exigencia proyectual más.

3.2. Volumen interior. Generación de entornos controlados

Este tipo de arquitectura surge de la necesidad de cubrir grandes superficies. Su adopción puede estar motivada por una necesidad funcional, como la de un estadio deportivo, en la que la presencia de pilares intermedios resulta inconcebible e incompatible con el desarrollo de las actividades del mismo. Pero además del factor funcional, puede estar motivado por una necesidad social, como medio de representación del espacio público o como recurso para el enaltecimiento de una determinada actividad, ya que a lo largo de la historia se ha producido una estrecha relación entre la importancia de las actividades y las luces cubiertas. Muestra de ello, es la rivalidad que hubo por hacer cúpulas de mayores luces en la edad media y el renacimiento, como el ejemplo ya comentado de la rivalidad entre Florencia y Siena, que asocia el logro de las grandes luces al estatus de la propia urbe. Así mismo un claro ejemplo de las grandes luces como representación del espacio público, son las estaciones de ferrocarril, que desde sus comienzos en el siglo XIX, han cubierto grandes salas, como representación del nuevo espacio público y puerta de las ciudades. En las estaciones de ferrocarril, las grandes luces no se originan en una necesidad técnica real, ya que la presencia de soportes intermedios no entorpece las actividades allí realizadas, ni el paso de los trenes, mientras las luces mínimas sean superiores al ancho de estos. Como vemos, un diseño meramente funcional bien podría basarse en una retícula de soportes, con luces considerablemente reducidas, tomando el ancho de los trenes como módulo base, pero este esquema que atiende meramente a los aspectos funcionales, raramente se ha puesto en práctica, primando las soluciones de grandes luces y el factor representativo del espacio, como motivación para la concepción de estos.

Anteriormente se ha hablado de la arquitectura desde el punto de vista de la volumetría exterior, como medio de expresión. Las obras arquitectónicas siempre han gozado de la capacidad de transmitir una idea, un estatus social, una funcionalidad... pero ante todo han podido categorizarse como tales por la espacialidad interior. Así las obras arquitectónicas cuentan con una espacialidad interior enfocada, de una u otra manera, en el hombre y un exterior representativo, frente a la escultura que solo goza de esta última cualidad. Por ello, la capacidad habitacional, la relación de la espacialidad interior con el hombre, es lo que define las cualidades arquitectónicas de la obra. Desde este punto de vista, los espacios interiores han respondido a problemáticas funcionales relativas a la actividad del hombre, al tiempo que en algunos casos, han trascendido de esta realidad, para convertirse en elementos de representación. A lo largo de los siglos, los paramentos han contenido el bagaje cultural de las sociedades a través de formas y ornamentos, al tiempo que el factor dimensional jugaba un papel decisivo en la lectura espacial y su función dentro del contexto histórico. Así como se ha hecho mención, a lo largo de toda la historia y en especial durante el periodo donde las estructuras compresivas eran el único recurso para su materialización, el hombre entendía el aspecto dimensional como representación de poder y grandiosidad, clara expresión de poder, fuera cual fuera el que lo ostentara. Los nuevos materiales vinieron a universalizar este tipo de soluciones espaciales, trasladadas a campos como la industria, que se beneficiaban de sus

factores prácticos o edificios como las estaciones de ferrocarril, que se constituían como parte de los espacios públicos, representativos de la ciudad. A lo largo de los dos últimos siglos la concepción de los espacios de grandes luces se ha modificado drásticamente, hasta convertirse en un recurso frecuente en la resolución proyectual, cuando las consideraciones tenidas en cuenta en la fase de diseño, aconsejan el uso de este tipo de recurso espacial, ya sea por factores prácticos o representativos. Hoy las grandes luces las encontramos en una amplia variedad proyectual y presentadas de formas muy distintas, atendiendo al papel de los medios de sustentación, la forma, las relaciones visuales y en un panorama más amplio la interpretación espacial del proyecto.

Esta tipología proyectual, se caracteriza por la materialización de grandes espacios, pero podemos subdividirla mediante una serie de matices, el primero de ellos la presencia de pilares²⁵³, atendiendo a su organización y autonomía conceptual. Otros matices a tener en cuenta son los referentes al ámbito visual, ya sea en defensa de los propios medios o de la gracilidad del diseño como elemento generador del espacio. Así logramos distinguir los siguientes grupos:

²⁵³ A este respecto aunque hablemos de proyectos basados en mallas de pilares, tratamos con márgenes dimensionales entre los mismos, así como de las soluciones estructurales y de diseño empleadas, que sin duda podemos enmarcar en el ámbito de las grandes luces. Mallas de soportes que empleen grandes luces, pueden constituir una unidad mayor entendida en los términos conceptuales y de diseño de este marco arquitectónico.

3.2.a. Mallas de soportes

A lo largo de los siglos, el hombre ha trabajado con estructuras compresivas y materiales como la piedra y la cerámica, solo áptos para resistir compresiones. Este hecho condujo a la universal adopción de estructuras murarias, y de forma especial la aparición de soportes capaces de concentra las cargas de forma puntual. No sería hasta el siglo XIX y la incorporación en el panorama arquitectónico de un nuevo material, que se pudo extender el uso de mallas de soportes de pequeña entidad, capaces de resistir grandes esfuerzos, manteniendo una relación entre la escala de los elementos y las luces cubiertas, apta para su incorporación generalizada en el panorama arquitectónico.

Anteriormente aparecen modelos como el de sala hipóstila, en el que los soportes de gran entidad dejan espacios proporcionalmente pequeños entre estos, debido sin duda a las limitaciones de la piedra para conformar dinteles de mayor tamaño²⁵⁴. A este respecto siempre se encuentra la madera como elemento capaz de soportar esfuerzos flectores, lo que a lo largo de toda la historia la ha establecido como un recurso básico. A lo largo de los siglos, los arcos sustituyeron a los dinteles como forma de transmisión de las cargas hasta los soportes, encontrándose ejemplos como las mezquitas, en las que se deseaba un espacio unitario de grandes dimensiones y se recurría a mallas de soportes.

La Mezquita de Córdoba emplea arcos para transmitir las cargas de la cubierta a una línea de soportes, confeccionando una sala hipóstila en la que los pilares pierden entidad frente a los espacios cubiertos, cobrando una nueva lectura, como un bosque regular hecho por el hombre para guarecerse de las inclemencias, configurando en este caso, un espacio apto para la oración. Pese a estos avances no será hasta el siglo XIX cuando el hierro y posteriormente el acero, en sustitución de los esquemas previamente realizados en madera, permita construir naves industriales y otras edificaciones con un espacio continuo, basadas en una malla de pilares de luces razonablemente elevadas, capaces de superar las soluciones en madera, tanto por la resistencia al fuego, como por los rangos dimensionales. El éxito de estas soluciones condujo a su práctica universalización, que solo retrocedería durante el siglo XX ante la carencia de este material, lo que condujo a su sustitución por las soluciones de hormigón armado, que gozan de una cualidad pétreo, al tiempo disponen de resistencia a tracciones, gracias a la incorporación de la armadura de acero de su interior. Patentes como las de Hennebique y Monier dictaron las bases sistemáticas para la implantación constructiva de estas soluciones.

²⁵⁴ En Egipto los dinteles de piedra empleados basaban su funcionamiento en términos de proporción, lo que posibilitaba la constitución interior de un antifunicular de las fuerzas que permitiera resistir mediante esfuerzos compresivos, ya que de aparecer flexiones y por consiguiente tracciones, la piedra se fisuraría y conduciría al colapso estructural, lo que ha ocurrido en incontables ocasiones. De forma simplificada se podría resumir que los dinteles son de tal entidad, que permiten la conformación virtual en su interior de un arco capaz de resistir las cargas a las que se encuentra sometido.

Durante mucho tiempo, los rangos dimensionales de las mallas de pilares fueron relativamente reducidos, limitándose en hormigón armado a no más de 15 metros. Por esta razón, la aparición del pretensado permitió romper estas barreras dimensionales en hormigón, como ya habían hecho anteriormente las láminas, que usaban el factor de forma, pudiendo así realizar elementos horizontales de mayores dimensiones. Así ya a mediados del siglo XX se cuenta con todas las herramientas para la realización de proyectos de grandes luces, basados en mallas de pilares. Este tipo de soluciones son un medio económico de cubrir grandes espacios, ya sea en un nivel, lo que permite emplear en la cubrición el factor de forma o en varios, lo que limita la actuación a elementos horizontales como vigas y cerchas.

La presencia de soportes interiores en los espacios, no excluye a estas obras de la categoría de grandes luces, tanto por la entidad del distanciamiento entre soportes, como por la interpretación espacial y el papel de este tipo de obras dentro del panorama arquitectónico contemporáneo. Hoy estas soluciones requieren especial mención por su extensa adopción, tanto desde obras en las que las únicas consideraciones son meramente funcionalistas, como aquellas en las que se busca una representatividad o una conformación espacial claramente distanciada de la cotidianidad resolutive.

Actualmente la industria y múltiples tipologías de edificios como las oficinas, estaciones de ferrocarril, aeropuertos, comercios... optan de forma regular por este tipo de soluciones, que gozan de una particular interpretación del espacio en la que, tanto la conformación de los elementos de cubrición, como los soportes, adquieren especial relevancia, tanto para el entendimiento formal, como funcional de espacio. Así las principales diferenciaciones que se pueden establecer dentro de este ámbito tipológico, las encontramos en la ordenación básica de la estructura. En el marco de libertades de las últimas décadas, se presentan edificios que optan por una ordenación irregular que busca la lectura compleja del espacio, sin claros referentes visuales que permitan el establecimiento de un “módulo”. Por otra parte la opción más empleada, son las mallas regulares o modulares de soportes, si bien dentro de este tipo se pueden diferenciar las unidireccionales o bidireccionales por su conformación geométrica.

Cada una de las ordenaciones anteriormente expuestas, tienen particularidades que las convierten en tipologías independientes.

- Irregular

Este tipo de soluciones son menos empleadas, por la complejidad que implican frente a las mallas regulares de soportes, pero en ella radica su interés. Las distribuciones irregulares de pilares están claramente enfocadas por un esfuerzo, tanto estético, como de organización funcional de la edificación. Si en las mallas regulares el hombre ha logrado encontrar un medio para una cierta libertad de actuación a la hora de la conformación de los espacios de menor entidad, en los que se organizan las actividades²⁵⁵, las organizaciones irregulares no ofrecen tal facilidad, por lo que están claramente enfocadas a la interpretación unitaria del espacio.

Este tipo de soluciones desde el empleo de grandes luces, introducen un énfasis especial en el papel de los soportes, casi como habitantes vivos del espacio, que cuentan una historia particular. Por esta misma interpretación lingüística encontramos dos proyectos que realizan una interpretación metafórica de la muerte, empleando nuevos espacios y nuevas metáforas apropiadas a los tiempos.

“Los últimos años han sido testigos de profundos cambios en la actitud ante la realidad de la muerte, resultado de los avances tecnológicos, científicos y del creciente proceso de secularización. La muerte formó parte durante siglos de la experiencia vital, lo que no sucede en la actualidad, con un modo de vivir ligado a lo material, al individualismo y alejado de lo trascendente. Todas estas cuestiones repercuten en los rituales fúnebres gestionados por profesionales no adscriptos a ningún credo, y como consecuencia, en la redefinición de los espacios arquitectónicos donde se celebran, que se encuentran en un momento de transformación e innovación.

Hasta hace poco tiempo, el espacio funerario por excelencia era el cementerio. Sin embargo, la sociedad actual ha ido demandando nuevos programas de necesidades, derivados de las presentes funciones que han dado lugar a los tanatorios, lugares de acompañamiento, velatorio y despedida, o los crematorios, resultado de la proliferación de incineraciones. Estos últimos suponen un interrogante ante el concepto tradicional de la tumba como huella del desaparecido, y por extensión, del cementerio como lugar de visita, implicando el escepticismo de una sociedad frente a ideas como la “muerte antesala de la vida eterna” (...).”²⁵⁶

²⁵⁵ A este respecto nos referimos, no solo a las soluciones espaciales de grandes luces que corresponden al tema de estudio, sino su extrapolación práctica para su compartimentación, como otra faceta a valorar a la hora de la elección de la solución proyectual empleada.

²⁵⁶ PÉREZ NAYA, Antonia, *“Metáforas ocultas en los espacios de la muerte actuales”*, España, Boletín Académico. Revista de investigación y arquitectura contemporánea Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidade da Coruña, 2013, p. 31.

La primera de estas obras es el Crematorio de Treptow (1996-1998) (Figura 135) en Berlín obra de Axel Schultes y Charlotte Frank. Una de las principales cuestiones que tratan actualmente estos edificios, es la concepción de un nuevo tipo de espacios sagrados al tiempo que aconfesionales. Así estos espacios, desprovistos del bagaje cultural de las retóricas clásicamente empleadas en torno a los rituales funerarios, buscan en la conformación espacial ese nuevo entendimiento. Los espacios muestran una firmeza y dignidad asépticas, donde la luz y las sombras dibujan el nuevo simbolismo. En este caso concreto como espacio central se conforma una gran sala hipóstila de hormigón, en la que los soportes aparecen disgregados, relativamente juntos, dejando entre ellos cuatro áreas libres de su presencia. Los soportes de hormigón aparecen como colosos cilíndricos, que al tocar el plano de cubierta materializan dicha unión con la entrada de la luz del sol, en una clara simbología entre la continuidad de la vida y el paso al más allá. En el plano de cubierta aparecen unas perforaciones cilíndricas en torno a los soportes, conformando unos lucernarios, por lo que el contacto real entre ambos elementos se produce de forma puntual. Si bien en este proyecto el factor dimensional no resulta de especial relevancia, si lo es el uso que se hace de este tipo de ordenación para modificar el entendimiento espacial de los usuarios y la reinterpretación actual de una tipología como la presente, con los ojos de

Figura 135. Crematorio de Treptow en Berlín (Alemania), obra de Axel Schultes y Charlotte Frank (1996-1998).

la contemporaneidad, sin más ornamento que los materiales y los volúmenes arquitectónicos. La arquitectura a través de las intenciones plasmadas en sus paramentos es capaz de transmitir la dignidad del hombre con gestos rotundos y firmes y los materiales y técnicas de un tiempo. Resulta casi como si la arquitectura simbolizara una cierta atemporalidad y el hombre a su paso personificara la fugacidad de su propia existencia. La muerte continua siendo un misterio y la arquitectura que se desenvuelve en este terreno, donde el hombre es especialmente susceptible a interpretaciones, entraña una gran complejidad reflexiva que va mucho más allá de la respuesta funcional a una problemática. Este proyecto demuestra como el gesto es una herramienta, no solo visual sino perceptiva, que modifica la interpretación emocional que hacen los usuarios.

Como se ve, este tipo de proyectos en tanto al esfuerzo reinterpretativo que suponen, son de gran valor para la evolución espacial de la arquitectura y los conceptos que en ella se emplean. Al tiempo dan respuesta tanto a factores culturales, como de consideraciones particulares del arquitecto a la hora de la proyectación, que convierten las obras en respuestas ricas y divergentes ante la proyectación contemporánea de estos espacios. Proyectos como el expuesto y el Crematorio de Kakamigahara en Japón obra de Toyo Ito & Associates²⁵⁷ son muestra de las capacidades reinterpretativas que ofrece el panorama actual de la arquitectura, donde se ponen en tela de juicio los tradicionalismos y se posibilita una mayor experimentación espacial.

Pero el campo de experimentación hoy se extiende al general de los proyectos y no como hasta hace dos siglos, a obras de especial significación. Otro ejemplo de gran interés es la Mediateca de Sendai (Figura 136), Japón, obra de Toyo Ito, en la que los soportes pasan de concebirse como concentraciones puntuales de las fuerzas, a mallas cilíndricas, que conforman lucernarios que conectan todas las plantas, transformando la percepción que se tiene del elemento estructural. El plano del suelo y del techo adquieren el protagonismo, como marco limitativo en el que habitan los soportes. Estos aparecen como elemento escultórico y cambiante, desmaterializado por el paso de la luz y reducida su rotundidad gracias a su conformación como compendio de tubos de menor entidad. Los soportes están constituidos como una retícula de cuadriláteros, en la que se diferencian los elementos tubulares verticales, que adquieren diferentes

²⁵⁷ El Crematorio de Kakamigahara en Japón obra de Toyo Ito & Associates no pertenece a la categoría de mallas irregulares de pilares, puesto que estos se concentran en el perímetro, aunque se encuentren dispuestos ortogonalmente. Este proyecto *“forma parte del paisaje al que se adapta: su cubierta evoca la suave ondulación de las colinas y su planta se encaja entre un monte y un lago artificial”*. Este efecto lo logra mediante la proyección de una lámina de hormigón, que denota una gran libertad formal, encarando la misma problemática del Crematorio de Treptow, con una solución muy distinta. Esta obra resulta más cercana y acogedora para los usuarios, casi como una nube blanca que los guarece, mientras en el lugar se unen cielo, tierra y mar, este último simbolizado en el estanque adosado a la edificación.

En el proyecto de Kakamigahara frente al anterior, se emplean grandes luces a nivel estructural, pero interiormente se subdividen los espacios, impidiendo la percepción unitaria, lo que lo aleja parcialmente de los proyectos de grandes luces, aunque claramente está resuelto por estos medios. Este proyecto resulta de gran interés como contrapunto al Crematorio de Treptow, mostrando otra gran respuesta a la problemática de la interpretación contemporánea de este tipo de instalaciones funerarias.

inclinaciones y los anillos horizontales, que reducen el pandeo de los finos elementos verticales.

Este proyecto se interpreta exteriormente como una serie de planos intersecados por los soportes de aspecto sinuoso, mientras que al interior la disposición irregular de estos, permite entender el espacio como una unidad indisociable. Esto se produce gracias a la decisión de no establecer las modulaciones correspondientes a los esquemas ortogonales, donde perceptivamente se establecen divisiones entre líneas de columnas, como referente geométrico estructurador del espacio. El propio Toyo Ito expresa cinco premisas que se impuso que debía cumplir este proyecto: *“no crear juntas, no crear vigas, no crear paredes, no crear habitaciones y no crear arquitectura”*. El último de estos deseos se refiere a la desmaterialización de la obra, rompiendo con la distinción

Figura 136. Mediateca de Sendai, Miyagi (Japón), obra de Toyo Ito (1998-2001).

entre interior y exterior, eliminando toda la estructura y carpintería perimetral, para que solo los vidrios definan la burbuja arquitectónica, desmaterializando los paramentos verticales. Precisamente en este hecho es donde redunda el interés de la obra, al reducir la verticalidad a los soportes de diseño orgánico que marcan el interior, ligando todo el conjunto como una unidad conceptual. En palabras de Toyo Ito el proyecto y su diseño en la Mediateca de Sendai es materializar la siguiente idea arquitectónica: *“... lo que me atrae no es visualizar el viento, sino pensar lo maravilloso que sería si pudiera existir una arquitectura que no tuviera forma, ligera como el viento”*. Así el arquitecto reta la forma clásica de concebir la arquitectura, empleando los recursos técnicos disponibles para lograr la pureza formal que materializa la idea de partida.

Si bien en la Mediateca de Sendai los rangos dimensionales son intermedios, la combinación de estos con los voladizos perimetrales y la concepción de los sistemas de sustentación en un tono distinto, hacen de esta obra todo un referente arquitectónico y una muestra de las potencialidades de la tipología que estamos tratando.

Las mallas irregulares de soportes, como se ha visto, pueden emplear indistintamente, tanto soluciones en acero, como en hormigón, confeccionando espacios heterogéneos, que basan en este concepto su percepción unitaria. Así mismo el empleo de unos rangos dimensionales considerablemente reducidos, permite un amplio abanico de soluciones técnicas. El mismo pragmatismo que lleva a la elección de este esquema resolutivo, suele conducir a la consideración de los planos horizontales en uno o más niveles como organización pragmática. Este tipo de ordenación da cabida a ejemplos como el de la Mediateca de Sendai que mediante este tipo de resolución logra dar respuesta a una problemática en múltiples niveles. Así este tipo de proyectos en varios planos, son una de las líneas de actuación para la resolución de proyectos de grandes luces en altura, con una densidad ocupacional elevada.

Al aplicar este tipo de organización a esquemas en altura, puede aparecer una repetición de la misma ordenación en los distintos niveles o como en el caso expuesto, adoptar modelos más flexibles, que se adapten en las distintas plantas, según las exigencias particulares, siendo esta segunda opción la que puede dar lugar a resultados más fructíferos.

- Modular

Este esquema resolutivo basa las bases de diseño proyectual en la repetición de módulos base, reiterando formas y elementos estructurales a lo largo de la edificación, siguiendo un claro patrón que establece la lectura del proyecto en función de esquemas geométricos. En el caso anterior se ha explicado, como la disposición de los soportes influye en la lectura del espacio y como las ordenaciones geométricas de estos, tienden a la compartimentación visual del espacio, pese a que éste pueda constituir una única sala.

Esta tipología proyectual se basa en el establecimiento de módulos y por tanto en la resolución de estos como unidades de menor entidad para la resolución de espacios de mayor envergadura. Este hecho implica una gran economía de medios, al poderse producir muchos de estos elementos en taller para su montaje en obra, siendo prefabricados de hormigón o como resulta más habitual de acero. Este tipo de soluciones son empleadas en la cubrición de grandes extensiones, donde la presencia de un limitado número de pilares intermedios, no suponen una merma de funcionalidad espacial. Así no pueden ser empleados para la resolución de espacios deportivos, donde la presencia de este tipo de elementos en el terreno de juego resulta inadmisibles, pero en estaciones, aeropuertos, comercios... son una de las soluciones que mejor combinan el pragmatismo, la economía de medios y la representatividad formal, que se puede adquirir mediante las herramientas de diseño asociadas a la resolución de proyectos de grande luces.

En esta tipología, la ordenación geométrica de los soportes establece las proporciones espaciales y las pautas para su lectura y utilización. Los soportes son un elemento clave de este tipo de proyectos, por lo que en muchos casos la concepción de estos demuestra un claro esfuerzo de diseño. Así mismo la cubierta puede ser una continuación conceptual de los principios expuestos en los soportes o una actuación claramente diferenciada, lo que determina la singularización del plano de cubierta como una entidad independiente. El entendimiento del plano de cubierta como elemento visualmente independiente, puede generar un efecto similar al explicado en la Mediateca de Sendai, donde el plano del suelo y el de cubierta logran la definición espacial, apareciendo los soportes casi como habitantes de este marco arquitectónico, aunque claramente la organización modular de estos establece una clara distinción espacial, generalmente ligada a la ortogonalidad, pudiendo marcarse en mayor medida el énfasis en una u otra direccionalidad del soporte, cuando las distancias de estos difieren. Por lo tanto a la hora de explicar esta tipología proyectual, hemos de basarnos en factores geométricos dada la relevancia de los mismos en el entendimiento espacial y por tanto para su aplicación de forma concreta en los proyectos. Así, tanto desde el punto de vista dimensional, como de la conformación de los elementos estructurales o estéticamente definitorios del espacio, pueden marcar un claro eje como el principal, constituyendo un *“sistema unidireccional”* u otorgar igual relevancia a ambos ejes, definiendo un *“sistema bidireccional”*. En los casos en los que la cubierta incorpora un tercer eje de referencia se produce un *“sistema multieje”*. Cada una de estas catalogaciones llevan asociadas peculiaridades tan relevantes como los esquemas de

crecimiento espacial, que en el caso de los sistemas unidireccionales marcan un claro eje de crecimiento²⁵⁸, mientras que en los dos restantes permiten un crecimiento ilimitado en todas las direcciones sin que la percepción espacial se modifique, lo que de por sí las hace más indicadas para grandes extensiones, en las que los límites espaciales los marcan las necesidades funcionales.

Las mallas pueden ser divididas en tres categorías: unidireccionales, bidireccionales y multieje. Cada una de éstas con peculiaridades a la hora del diseño que definen su campo de aplicación y las encuadran como soluciones aptas en un determinado margen proyectual. Todas ellas son soluciones claramente enfocadas en la cubrición de grandes áreas, por lo que su aplicación en espacios aeroportuarios es una de las líneas de actuación en que más extendido se encuentra su uso y por ende, donde se encuentran ejemplos más ilustrativos de las virtudes de cada una de estas opciones.

- Mallas Unidireccionales

Este tipo de diseño tiene una marcada direccionalidad, que influye en los esquemas de repetición, produciendo proyectos lineales. Este tipo de ordenación se encuentra presente en muchos ejemplos y principalmente en aquellos que hacen del diseño formal de la sección del edificio un alarde en sí mismo, capaz de marcar la lectura de la obra. Un claro ejemplo de ello es la Terminal 4 del Aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas, obra de Richards Rogers Partnership y el Estudio Lamela Arquitectos²⁵⁹ (Figura 137), obra en la cual, la sección ondulada, marca una clara direccionalidad al crecimiento, sin que esto resulte incompatible con un desarrollo en la dirección perpendicular, aunque ha quedado definida claramente una jerarquía espacial. Además en este caso concreto, el enorme crecimiento repetitivo del modelo en una de las direcciones, potencia la subdivisión conceptual del espacio en una serie de cápsulas lineales, puestas en escala por la gradación cromática, como forma de marcar las distancias en el eje principal, estableciendo un ritmo en el punto de fuga. Así vemos que pese a la unidad modular de este tipo de mallas, la diferenciación direccional que aportan se traduce en una lectura muy particular de los espacios.

La selección de un esquema unidireccional permite una mayor complejidad de la sección transversal, pudiendo adoptar formas como las comentadas en la Terminal 4 de Barajas.

²⁵⁸ Las mallas unidireccionales marcan claramente un eje en el que se produce el crecimiento del proyecto, pero este hecho no impide, que en el mismo proyecto se anexionen varios de estos ejes, que aunque puedan estar unidos, tienen una clara separación formal entre los mismos, conformando bandas.

²⁵⁹ La Terminal 4 del Aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas, es obra de los estudios de arquitectura de Richard Rogers y Estudio Lamela, así mismo participaron las ingenierías estructurales: Anthony Hunt Associates, TPS con OTEP y HCA. Además participaron otras ingenierías a cargo de la resolución de otras áreas particulares de la obra: TPS, Initec, Arup (fachadas) y Warrington Fire Research Consultants.

En este proyecto las vigas de acero, producidas en taller, configuran una forma similar a las alas de un ave abiertas, dispuestas a emprender el vuelo. La forma de la sección se constituye como una metáfora a su propio uso. Esta solución al interior configura espacios ricos, enfocando la atención en la parte central, donde vienen a unirse la cubierta a los pilares en V.

Figura 137. Terminal 4 del Aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas, Madrid (España), obra de Richards Rogers Partnership y el Estudio Lamela Arquitectos (1998-2006). Imágenes de la construcción y la obra terminada.

Al respecto de este proyecto se ha llegado a decir que: *“Aunque existen soluciones constructivas novedosas, este edificio no pretende hacer un alarde estructural. Al contrario, el elemento protagonista del espacio debe ser la cubierta, por lo que el objetivo fundamental es aligerar y reducir al mínimo todos los elementos estructurales.*

Los pilares inclinados de sección variable se ramifican en forma de V con el fin de reducir a la mitad el número de apoyos y de no focalizar las perspectivas visuales. A su vez los “kipper-truss”, o montantes de fachada, son elementos que, gracias al pretensado, pueden soportar la acción del viento sobre el cerramiento y anclar la cubierta ante presiones y succiones, todo ello con secciones mínimas.

Un manto, o superficie alada, basada en un módulo que se extiende indefinidamente sobre una malla de soportes inclinados, captando y tamizando la luz natural para crear juegos de luces y sombras.”²⁶⁰

En esta crítica al referirse a que no se desea un alarde estructural, se refiere a la primacía de los factores formales, ya que la estructura permanece claramente como factor vital de la construcción. La extensión en superficie se produce mediante la adición de bandas lineales, lo que espacialmente marca la dirección transversal como la principal, debiendo el usuario en su recorrido ir traspasando transversalmente las bandas, lo que matiza el recorrido arquitectónico, quedando la visión lateral como punto de fuga. Las ondulaciones de la cubierta matizan la percepción espacial, mientras que el punto de contacto entre las bandas, es marcado por los lucernarios y espacios de mayor altura, uniéndose en este punto los distintos niveles configurados en cada banda, mediante pasarelas.

Los aeropuertos son edificaciones que albergan un gran tránsito de gente y equipajes, para cuyo funcionamiento es necesario marcar unos claros recorridos, estableciendo un nítido sistema de funcionamiento (Figura 138). A este respecto el uso de bandas lineales permite esta organización de una forma clara, al tiempo que un dimensionado transversal adecuado a las exigencias para el funcionamiento de la edificación. Así gracias al empleo de esta

Figura 138. Esquema organizativo de la Terminal 4 del Aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas.

²⁶⁰ Fragmento del artículo “Proceso de diseño constructivo de la Terminal 4 del aeropuerto Madrid Barajas”, publicado en la web de arquitecturayreforma.com.

tipología proyectual de grandes luces, se obtiene una obra marcada por la flexibilidad y la claridad funcional, al tiempo que el paso de la luz, tanto en el centro de la banda, como entre bandas, permite una correcta iluminación de la gran superficie cubierta.

Las mallas unidireccionales pueden funcionar, tanto organizativamente en una única dirección coincidente con el crecimiento del esquema organizativo o bien como en el caso visto en una extensión superficial, permitiendo así una especialización de los espacios claramente ligada a la conformación de las bandas, como adhesión de crecimientos modulares bajo unos principios comunes. Este tipo de soluciones aportan *“flexibilidad”*, al permitir el dimensionado de las bandas o el elemento lineal adecuado a las necesidades, mediante la repetición de la unidad modular. Así mismo las características espaciales de este tipo de proyectos, al encontrarse en el marco de las soluciones de grandes luces, otorgan una gran flexibilidad para su adecuación funcional a múltiples actividades. Este hecho claramente ligado al esquema resolutivo, posibilita la adaptación de la obra a diversos usos, ya sea en el normal funcionamiento del proyecto o mediante modificaciones introducidas a lo largo de los años. Esta adaptabilidad de los espacios es una ventaja frente a esquemas de menor entidad, donde existe un mayor condicionamiento espacial a la actividad a la que se encuentra destinada. Así mismo, el hecho de basar el diseño proyectual en esquemas modulares y por tanto en un sistema resolutivo previamente establecido en el estudio de arquitectura, permite una *“claridad resolutiva”*, que posibilita, tanto la economía de medios, como una gran precisión de la solución aportada, pudiendo llegar a conformar esquemas repetibles o extrapolables a otros proyectos o ámbitos arquitectónicos, donde la adopción de este tipo de resoluciones aporten un rédito económico, funcional o expresivo. Este último, claro hecho diferenciador frente al resto de soluciones basadas en mallas de soportes.

- Mallas Bidireccionales

En este caso, el diseño del módulo responde a un crecimiento en dos ejes, con un claro enfoque a la cubrición de grandes extensiones. Este hecho condiciona sobremanera el diseño del módulo de cubierta y en especial la conformación perimetral, ya que el contacto entre módulos ha de quedar resuelto. En muchas ocasiones, incluidas cubiertas modulares como las desarrolladas por Félix Candela (Figura 139), la complejidad resolutiva del módulo establece el contacto entre estos, como un salto de las formas, destinado a la resolución de los sistemas de iluminación, como ocurre en la Fábrica High Life. Así

Figura 139. Fábrica High Life en Coyoacán, México DF (México), obra de Félix Candela (1955).

mismo otro punto vital para el entendimiento del sistema arquitectónico, es la disposición de los medios de sustentación, ya sea como en el caso de Candela, disponiendo el soporte en el punto central del elemento modular o bien en los vértices o aristas, compartido éste para la sustentación de los elementos modulares que están en contacto. A este respecto, aparece la consideración estructural de la independencia resistente de los elementos, ya que en ejemplos como la Fábrica High Life, la unidad modular es autoportante, pero esa no es siempre la situación. Es necesario recordar el funcionamiento de las arquerías, donde los esfuerzos horizontales transmitidos en el apoyo, son compensados con los arcos dispuestos a continuación, siendo el remate un elemento resistente claramente enfocado a la transmisión de dicho esfuerzo al terreno. De forma pareja los módulos considerados en este tipo de soluciones, pueden ser interdependientes y requerir de soluciones especiales en el contorno, aunque esto no suele ser lo habitual.

Esta tipología proyectual se caracteriza por su adecuación para la cubrición de grandes superficies, generando un entorno habitualmente homogéneo, en el que se introducen matizaciones que conforman las pautas de utilización. Como se puede ver en la convencionalidad resolutoria de cualquier centro comercial, las mallas de pilares, sobre los que se apoyan vigas y viguetas, son una solución eficiente para la cubrición de grandes extensiones. En el presente punto se hace referencia a aquellos proyectos que más allá de esta trasposición escalar de los esquemas clásicos, buscan una resolución proyectual compleja. En muchas ocasiones esto se consigue mediante el diseño de unidades autoportantes, que logran confeccionar, tanto una unidad compleja, como un sistema constructivo, basado en la repetición de los módulos, que consiguen dar respuesta a la problemática espacial, de iluminación y aquellas consideraciones relativas al funcionamiento de la edificación. A este respecto, el London's Third Airport (London Stansted Airport) (Figura 140) (1987-1991), obra de Norman Foster, es un brillante ejemplo. En esta obra se constituye un módulo cuadrado que da respuesta a los requerimientos propios de la espacialidad aeroportuaria. La cubierta de forma cupuliforme se establece mediante una retícula de barras, conformando en la parte superior cuatro lucernarios que dejan pasar la luz a la gran sala. Esta cubierta se apoya en las barras tubulares perimetrales que definen el módulo. En este punto es donde aparece la distinción entre los módulos que incorporan el apoyo y los que no, a efectos resistentes a este nivel no existe una distinción, ya que el contacto con los medios portantes se produce en los vértices, compartidos entre los módulos, al tiempo que los elementos perimetrales de esta unidad son compartidos, no existiendo duplicidades en los mismos. Así se produce una interdependencia de los módulos, debiendo asociarse perimetralmente unos a otros, al tiempo que los límites de la extensión superficial del espacio está claramente asociada a los módulos que llevan incorporados los medios de sustentación, ya que los intermedios exigen la presencia de estos a ambos lados.

La solución empleada en el London's Third Airport, permite ampliar los márgenes dimensionales más allá de lo factible, mediante el empleo de elementos modulares unitarios, permitiendo con una misma solución y un número muy limitado de elementos, dar una respuesta eficiente y bella. Por lo que respecta a los medios de sustentación, como se ha explicado, hacen contacto con la cubierta en los vértices de los

módulos, trasladando las cargas, mediante unas barras inclinadas, hasta la parte central del módulo, donde se organiza el soporte como materialización de las aristas de un prisma. Este prisma constituido por el soporte, más allá de los razonamientos resistentes, cumple así mismo la función de espacio servidor de la gran sala, conteniendo donde es preciso la ventilación, paneles de información y otros equipos, liberando el resto de la sala de intromisiones. Así mismo, como se ha mencionado, estos elementos han de resultar autoportantes, por lo que para poder garantizar la geometría y correcto funcionamiento resistente de los módulos de sustentación, aparecen unos cables, que van desde los vértices del elemento de cubierta, hasta un punto central del soporte, establecido por cuatro barras de forma piramidal. De este modo, en los vértices en los que se apoya el plano de cubierta, se dispone una barra que trabaja a compresión simple y un cable, que pretensado, logra resolver el nudo, sin la introducción de empujes horizontales en el plano de la cubierta.

Como resultado de esta solución, se conforma un espacio homogéneo, en el que ambos ejes presentan una misma relevancia visual. Este hecho puede ser matizado con soluciones en las que las proporciones del elemento modular establezcan una diferenciación. Esta inserción de una mayor representatividad, puede ser deseada por cuestiones funcionales asociadas a la circulación de los usuarios, como unas guías visuales, que de forma sutil orienten al usuario a seguir las pautas de comportamiento preestablecidas desde el proyecto. Pero en la mayor parte de los casos, ambos ejes gozan de características similares, lo que permite un crecimiento ilimitado en todas las direcciones, definiendo el perímetro del espacio cubierto los factores funcionales asociados al ámbito programático del edificio.

Figura 140. London's Third Airport, en Stansted Mountfitchet (Reino Unido), obra de Norman Foster (1987-1991).

Frente a las organizaciones unidireccionales, en este caso no se percibe una organización por bandas, sino una percepción unitaria del espacio. Así mismo se presenta un mayor condicionamiento de los bordes del módulo, lo que limita los márgenes de la conformación formal de los elementos, que dentro de sus límites pueden emplear soluciones cupuliformes u otras conformaciones del plano de cubierta, siempre y cuando la organización modular permita la coordinación de la suma de los elementos modulares como un todo, respondiendo a factores como la iluminación, el drenado de las aguas pluviales²⁶¹... Así los esquemas bidireccionales cuentan con una mayor libertad que los unidireccionales, pudiendo dar cabida a cualquier tipo de proyecto extensivo, estableciendo las bases geométricas reguladoras del espacio interior, que puede ser “*habitado*” por elementos arquitectónicos diversos, que logren adaptar los espacios para aquellos usos a los que se encuentran destinados. Por estos medios se puede lograr una readaptación posterior en el caso de que el edificio modifique su finalidad a lo largo del tiempo, adecuándose a los requerimientos con una gran flexibilidad.

Una faceta relevante de este tipo de cubriciones, es la importancia de las soluciones de cubiertas ligeras y el uso generalizado de las estructuras de acero²⁶², como medio de limitar el impacto de las cargas de peso propio en los medios de sustentación. Así se logra la configuración de los medios de sustentación con una mayor libertad de diseño, siendo estos uno de los principales elementos de representación en la lectura por el usuario del espacio interior.

Las mallas bidireccionales son la forma óptima y económica, para la cubrición de grandes áreas, cuando la presencia de un limitado número de soportes en el interior no supone un perjuicio funcional en el proyecto. El acero se ha establecido como el principal material en este tipo de soluciones, aplicadas a la resolución de cubiertas ligeras. En cuanto a la elección del material, hoy en día entra en juego la consideración de los nuevos materiales, actualmente en desarrollo, que si bien hoy pueden aparecer como soluciones en cierto grado experimentales, en un futuro próximo pueden ser opciones habituales para la resolución de este tipo de proyectos. Así con unos márgenes

²⁶¹ El drenado de las aguas pluviales, es uno de los grandes condicionantes de todos los proyectos que plantean grandes extensiones cubiertas. En el caso de las mallas, los soportes generalmente no solo responden a los factores resistentes, sino que se emplean además para asumir en su interior el drenaje de las aguas recogidas en la cubierta. Pese a que esa sea la solución más habitualmente empleada, hay casos como el de la Terminal 4 del Aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas, en Madrid, en que se disponen canalizaciones horizontales, que recogen al unísono el agua de varios de los módulos, aunque el hecho de que estas canalizaciones no cuenten con las inclinaciones necesarias para su correcto funcionamiento, hace necesario el empleo de medios de succión auxiliares. Así este factor es de vital relevancia a la hora de la conformación formal de la cubierta y el establecimiento de un sistema global que permita el correcto funcionamiento de la edificación durante su vida útil.

²⁶² Como se ha visto en el caso de Félix Candela se pueden encontrar ejemplos de este tipo de resolución en estructuras de hormigón, pero la mayor ligereza de las soluciones de acero ha establecido a este material, como la principal vía para la resolución de los proyectos de grandes luces basados en mallas bidireccionales, en el panorama actual.

dimensionales modestos, este ámbito tipológico puede ser una vía de introducción de estos nuevos recursos aún en vías de desarrollo. Un ejemplo de estos nuevos materiales que pueden resultar de aplicación son los perfiles pultrusionados²⁶³ de fibra de vidrio o PRFV²⁶⁴ (Figura 141), que gozan de ventajas como extraordinaria rigidez, resistencia a la corrosión, aislamiento eléctrico y ante todo gran ligereza. Estos nuevos perfiles son a todas luces un sustituto viable para las perfilierías de acero, que cuentan con grandes ventajas, entre ellas una mayor ligereza, así como una resistencia similar a los aceros comúnmente empleados en edificación²⁶⁵. Este tipo de nuevos materiales pueden encontrar esta tipología proyectual, como un medio para demostrar sus ventajas e introducirse definitivamente en el repertorio de materiales habitualmente empleados en los proyectos.

Figura 141. Perfiles pultrusionados de PRFV, comercializados por Eurograte.

- Mallas Multieje

En los casos anteriores se han visto las particularidades de las organizaciones de las mallas, atendiendo a uno o dos ejes ordenados, estableciendo unas reglas relativas a la ortogonalidad del espacio, pero hay ocasiones en las que se establece un tercer eje de

²⁶³ Pultrusión es el proceso de polimerización en caliente de un perfil estirado en una hilera.

²⁶⁴ Los perfiles pultrusionados de PRFV, contienen un mínimo del 70% de fibra de vidrio, lo que otorga al perfil resultante una excelente resistencia a golpes y fatiga. Actualmente empresas como Eurograte producen este tipo de perfilierías enfocadas para aplicaciones como: estructuras, barandillas, escaleras..., pudiendo ser en un futuro cercano, extrapolables al general de aplicaciones correspondientes hoy a las estructuras de acero. Según Eurograte, actualmente contempla las siguientes aplicaciones: plataformas, pasarelas, rellanos, pequeños apoyos, soportes para aparatos químicos e instrumentación, tabiques aislantes..., pertenecientes a los márgenes actualmente resueltos mediante perfilierías metálicas de pequeñas dimensiones.

²⁶⁵ Los perfiles pultrusionados de PRFV comercializados por Eurograte actualmente garantizan una resistencia a tracción de 400 MPa y a compresión de 280 MPa, aunque estos valores varían en función del perfil empleado, ya que la proporción de fibra de vidrio y resina varía, pudiendo contener entre un 50% y un 70% de fibra de vidrio. Unos márgenes resistentes similares a los de los aceros comúnmente empleados en edificación: S235 (235 MPa de límite elástico), S275 (275 MPa) y S355 (355 MPa).

referencia, a la hora de la lectura espacial. Este hecho suele marcar una diferenciación referencial entre la malla de soportes y la cubierta. Las reglas de modulación en este caso continúan atendiendo a los mismos principios anteriormente expuestos, aplicándose en esta tipología generalmente soluciones similares a las de las mallas bidireccionales, estableciendo mallas de soportes, que atienden de forma homogénea a ambos ejes ordenados. En esta ocasión, la cubierta se rige en función de uno o más ejes, independientes de los organizativos de la retícula de soportes, generalmente mediante un sistema de referencia en el que los ejes se han girado considerablemente. Esta distinción geométrica produce a su vez una diferenciación visual entre los soportes y el plano de cubierta, que producen una segregación visual de los elementos, pareciendo la cubierta un plano autónomo, que se posa sobre los medios de sustentación, casi como entes independientes.

En resumen, los pilares marcan una ortogonalidad distinta de la de la cubierta, lo que produce claras repercusiones a la hora de la lectura del espacio. Al entenderse la cubierta de forma unitaria sin una clara diferenciación modular, el espacio se interpreta como indivisible, otorgando una mayor continuidad perceptiva que cualquiera de las opciones anteriores.

Figura 142. Terminal 2 del Aeropuerto de Köln-Bonn (Alemania), obra de Murphy / Jahn & Heinle y Wischer und Partner (2000).

Desde el punto de vista resolutivo se rige por las mismas reglas que las mallas bidireccionales, con la particularidad del factor perceptivo, lo que no modifica sobremanera los condicionantes resolutivos sobre los ya expuestos.

Un proyecto que sirve de referencia de este tipo de soluciones es la Terminal 2 del Aeropuerto de Köln-Bonn²⁶⁶ (Figura 142), obra de Murphy / Jahn & Heinle y Wischer und Partner. En este proyecto se emplean unos soportes claramente referenciados en los del London's Third Airpor, comenzando en la base por la conformación mediante barras, de las aristas de un prisma, en cuyo interior se disponen elementos servidores. Desde la cúspide de estos soportes, parten las barras inclinadas que van al encuentro de la cubierta, aunque en este caso se producen ramificaciones en el camino, lo que multiplica los puntos de contacto y reduce la contundencia de los elementos de cubierta. Así se emplea un esquema arbóreo que reduce las alusiones a la geometría organizativa del conjunto, lo que permite una perfecta transición entre los elementos de soporte y el plano de cubierta, referenciado en este caso a un eje girado 45° con respecto a los ejes de la malla de soportes. La cubierta se materializa como una sucesión de cubiertas a dos aguas, resolviendo la iluminación en la cumbrera, mientras que entre éstas se organiza en la limahoya horizontal un sistema de drenaje de las aguas pluviales. El esquema resolutivo de este proyecto resulta considerablemente claro y extrapolable a la producción, tanto de edificaciones aeroportuarias, como de aquellas que se vean beneficiadas por sistemas de cubrición de grandes extensiones, con la presencia de soportes que no interfieran con la actividad realizada. Así este tipo de soluciones podrían resultar de aplicación en edificios comerciales, aunque en estos la representatividad arquitectónica dentro del espacio comercial resulta un factor contrario a sus intereses, por lo que su implantación se vería limitada a los espacios comunes del complejo, cuya extensión difícilmente justifica la adopción de este tipo de soluciones. Así mismo programas museísticos pueden verse favorecidos por la flexibilidad para la transformación de este tipo de espacios y el control sobre los sistemas de iluminación.

En este proyecto aparecen los soportes resueltos mediante un esquema arbóreo o “soportes ramificados” (Figura 143), un esquema en el que ya sea en un plano o como en este caso, volumétricamente, según asciende el soporte se va subdividiendo en elementos de menor entidad, para multiplicar los puntos de contacto con la cubierta, aplicándose las cargas exclusivamente en estos

Figura 143. Soportes ramificados.

²⁶⁶ Aeropuerto de Köln-Bonn o Aeropuerto de Colonia/Bonn, atiende a las ciudades alemanas de Colonia (a 15km) y Bonn (a 16km).

puntos extremos. Este tipo de resolución no es ni mucho menos una invención contemporánea, aunque la complejidad de dichas formas encuentra en la actualidad el caldo de cultivo ideal para su implantación, más allá de razonamientos espirituales y ornamentales. Este tipo de resolución está claramente enfocada, tanto a la representación espacial, mediante una clara metáfora del bosque (Figura 144), como desde un punto de vista más técnico a la constitución de esquemas globales ligeros. Este tipo de esquemas reducen el consumo de material, limitando los esfuerzos flectores de los elementos de cubierta, al minorar las luces de los mismos, entre los apoyos en el elemento arbóreo de soporte. En este punto, de forma análoga a como se ha mencionado, la sustitución de la perfilería de acero, por otra de perfiles pultrusionados de PRFV, parece el siguiente paso evolutivo lógico, en aras de la experimentación de nuevas vías de desarrollo arquitectónico plenamente enraizadas en el siglo XXI, donde los nuevos materiales, aún en desarrollo, deben encontrar su lugar en el panorama arquitectónico.

Esta tipología arquitectónica logra una homogeneidad espacial más allá que las mallas bidireccionales, lo que supone una gran potencialidad para la interpretación espacial, realizándose la lectura de los soportes, casi como entes independientes, por lo que la conformación de estos adquiere aún mayor interés, siendo los esquemas arbóreos una de las principales líneas de actuación y la más congruente con la naturaleza de este tipo de soluciones. Claramente enmarcado este ámbito proyectual en la cubrición económica y representativa de grandes extensiones, su aplicación funcional se ve principalmente enfocada en proyectos aeroportuarios, donde cumple mejor que cualquier otra los requerimientos espaciales. A menor escala o con un menor desarrollo, puede ser de aplicación en otros ámbitos proyectuales, incluso bajo los márgenes de las grandes luces, resolviendo problemas de pequeña escala, como mercados, estaciones de autobuses... donde los márgenes dimensionales son muy limitados, con un razonamiento claramente procedente del ámbito de las grandes luces. Así la trascendencia de estas tipologías proyectuales, va más allá de la conformación espacial, para constituirse como una forma de pensamiento extrapolable a otros ámbitos arquitectónicos.

Figura 144. Aeropuerto de Stuttgart (Alemania), obra de Meinhard Von Genkar (1991). En este aeropuerto se materializa la metáfora del bosque, mediante los soportes arbóreos, “evocando el bosque de Birnam de Macbeth”.

3.2.b. Espacio unitario

En esta categoría proyectual se engloban todos aquellos proyectos que por diferentes razones exijan la desaparición de los soportes, constituyendo grandes espacios libres de su presencia. Uno de los principales razonamientos que llevan a la elección de este tipo de soluciones son los condicionantes funcionales, como queda claramente patente en el caso de los espacios deportivos, donde la presencia de soportes en el campo de juego resulta inaceptable, al tiempo que como espectáculo se desea que el público no tenga interferencias visuales. Espacios deportivos como campos de fútbol, estadios de béisbol... desde sus orígenes se han realizado al aire libre, por las complejidades que lleva asociada la cubrición de áreas tan extensas sin la presencia de soportes, limitándose las cubriciones a los graderíos, una solución más abarcable. Solo en las últimas décadas, vemos como estas grandes edificaciones deportivas logran cubrirse mediante soluciones versátiles, que combinan ligereza y una eficiencia resistente. En este ámbito proyectual de grandes cubriciones no se contemplan usos sobre la cubierta, por lo que el diseño de ésta, es libre de adaptarse a la forma resistente más apta o a la que la expresión proyectual exija. Así mismo, este ámbito proyectual extremo permite en mayor medida la adopción de soluciones generalmente enmarcadas en los márgenes de la ingeniería civil, como en el caso del Estadio de Francia, cuya resolución se basa en un sistema atirantado.

Ante cualquier otra consideración, en estas obras el esfuerzo proyectual se centra en la conformación de un espacio interior de grandes dimensiones, en respuesta a unas exigencias funcionales y representativas. De este modo se genera un ambiente claramente diferenciado, como un pequeño cosmos adaptado a las exigencias del hombre. Ante esta percepción del espacio arquitectónico, se establece una gradación basada en la interacción entre este *“espacio del hombre”* y el entorno.

La arquitectura desde sus orígenes ha sido la adaptación del medio a las exigencias del hombre y especialmente a las condiciones habitacionales, guareciendo de las inclemencias meteorológicas, regulando la cantidad de luz... Así en un primer escalafón se encuentran aquellos proyectos que percibidos como un exterior, establecen una cubrición que guarece, al menos parcialmente, de las inclemencias meteorológicas. En este marco se encuadran un sinnúmero de cubiertas de estadios deportivos, que guarecen a los espectadores, dejando aún el área deportiva como un exterior, manteniendo así mismo relaciones visuales con el entorno.

En un segundo escalafón, se encuentran aquellas obras cuya espacialidad interior es autónoma del entorno, otorgando un medio *“ideal”* para la realización de las actividades del hombre, pudiendo distinguirse si se mantienen o no nexos visuales con el exterior, que permitan encuadrar la obra en un marco físico o la constituyan en una unidad completamente autónoma. Al mantener nexos con el exterior, la cubierta actúa como un firmamento, que define un marco contextual, en el que los referentes visuales exteriores son una herramienta de integración y de lectura de la obra, como parte del lugar. Por su parte las obras que no incorporan dichos nexos visuales, actúan como un microcosmos independiente, resultando

simbólicamente irrelevante el entorno, toda referencia está contenida en la propia edificación, lo que permite ejercer un control absoluto sobre la percepción del usuario. Este hecho posibilita ejercitar la reflexión filosófica sobre la espacialidad propia del hombre. Sin duda éste es un factor cambiante con los tiempos, pero donde la arquitectura presenta toda referencia espacial es donde se potencian los ideales del hombre. Como muestra de ello, podemos recurrir al Panteón de Roma que, tanto desde el ámbito dimensional, como formal, ha marcado un referente a lo largo de los siglos. En este edificio se pierde todo nexo visual con el exterior a excepción del óculo, por el que penetra la luz en la cúspide de la cúpula, casi como si la ésta fuera el nuevo firmamento y esta abertura simbolizara el mismo sol, que baña el firme y las esculturas de los nichos, dispuestos a lo largo del muro perimetral. Actualmente este ejercicio conceptual continúa apareciendo en multitud de proyectos, como reinterpretación del mismo mundo y puesta en valor de elementos específicos, como ocurre en las estaciones de ferrocarril, donde el elemento mecánico pasa a ser el centro de atención simbólica y no solo un elemento funcional.

A lo largo de toda la historia del hombre, cuando se ha hablado de grandes luces la referencia proyectual ha estado intrínsecamente ligada a esta tipología proyectual, ya sea en su modalidad de *"firmamento"* o *"microcosmos"*, ya que los grandes espacios siempre han sido, tanto una muestra de superación técnica, como de poder y por tanto un icono dentro de la producción arquitectónica de un tiempo. Así la obra asume en mayor medida una función representativa y lingüística, como en el caso de la arquitectura religiosa. En este ejemplo concreto, el control perceptivo absoluto ayuda a transformar la luz y todo referente en una herramienta activa, para el alzamiento de la deidad adorada en él²⁶⁷. Así a lo largo de los siglos este tipo de soluciones han sido expresión de poder, hasta que en el siglo XIX los avances en los materiales, el cálculo y la técnica, como ya se ha comentado, permitieron la implantación de estas soluciones en otros ámbitos proyectuales y con connotaciones distintas. Especial mención merecen las estaciones de ferrocarril, que asumieron el reto de constituir una nueva tipología proyectual, en la que se busca, tanto una respuesta funcional, como representativa, como puertas decimonónicas a las urbes.

Hoy el panorama técnico ha configurado un maco de libertades, que hacen posible la implantación de los espacios unitarios de grandes luces en un amplio abanico de proyectos, en repuesta a exigencias muy distintas. Los procesos básicos que rigen este tipo de espacios siguen siendo los mismos, pero con los medios y referentes propios de la contemporaneidad. Este tipo de proyectos, son en los que se produce una mayor experimentación de los límites de la espacialidad arquitectónica en la gran escala, apareciendo el hombre como referente proporcional de un ámbito dimensional que habla de la colectividad y en cierta medida de un *"orden gigante"*²⁶⁸. Las tres subdivisiones que se establecen dentro de esta tipología

²⁶⁷ Aunque esta alusión se haga en plan genérico, puesto que resulta de aplicación en todas las religiones, realmente donde más se ha generalizado el uso de este tipo de espacios, es en los templos cristianos, en los que las grandes cubriciones y el control preciso de la luz, han sido casi una constante a lo largo de los siglos, desde que la arquitectura gótica permitiera técnicamente la realización de este tipo de espacios en piedra.

²⁶⁸ Orden gigante en arquitectura clásica, se refiere a la disposición ordenada de columnas o pilastras, que se extienden verticalmente atravesando varios niveles de altura. En la referencia realizada, se

proyectual, llevan asociadas condicionantes muy distintos, que afectan a toda la concepción de la obra. Así las características particulares de cada una de las soluciones, enmarcan su campo de aplicación en ámbitos proyectuales concretos, ya sean: estadios deportivos, estaciones, aeropuertos, invernaderos...

asume como aquellas ordenaciones que en el ámbito escalar se encuentran sobre la universal referencia del hombre, constituyendo formas de una escala superior. Por lo tanto, pese a que la figura del hombre siempre está presente, las colosales dimensiones de los elementos, permiten una mayor libertad de actuación, aún con la dificultad técnica inherente a este tipo de soluciones.

- Cobijo

En esta primera gradación se establece una amplia conexión con el entorno, entendiéndose como una parte de éste, guarecida parcialmente de las inclemencias meteorológicas. Estos proyectos suelen concebirse como cubiertas que protegen a los usuarios de la lluvia y el sol. Que mejor ejemplo, que las cubiertas de gran número de graderíos, que empleando las grandes luces y voladizos, tienen por meta evitar o reducir la presencia de soportes que dificulten la visión del espectador, confiriendo un ambiente más confortable a los asistentes. Estas construcciones protegen, tanto de la lluvia, como del sol, aunque no establecen ningún control sobre las condiciones higrotérmicas del espacio, siendo una humanización de un exterior. En el caso concreto de los estadios se distinguen dos procesos conceptuales distintos. El primero corresponde a la concepción del graderío, como una edificación independiente que configura un espacio para los asistentes, al tiempo que da respuesta a todos aquellos espacios servidores requeridos para el funcionamiento del conjunto. En segundo lugar encontramos la cubierta de los graderíos, que busca proporcionar unas condiciones más agradables para los usuarios, al tiempo que como elemento independiente, tanto conceptualmente, como formalmente, tiene la capacidad expresiva, que permite entender este elemento como medio lingüístico.

Uno de los muchos ejemplos que podemos encontrar en este ámbito, es el Estadio de Francia (Saint-Denis, Francia) realizado entre 1994 y 1997 por MZRC (Macary & Zublena) (Figura 145), en el que se construye una cubierta suspendida de cables. La cubierta se presenta como un disco, nítidamente conformado, atravesado por dieciocho soportes, desde cuya cúspide descuelgan los cables que la sustentan, para conferirle su característica imagen ingrávida. Así mismo desde el perímetro descuelgan una serie de

Figura 145. Estadio de Francia, en Saint-Denis (Francia), obra de MZRC (Macary & Zublena) (1994-1997).

cables, que trasladan los esfuerzos tractores al terreno, compensando de esta forma las tensiones introducidas desde el voladizo. El funcionamiento en sección se explica con claridad, apoyándose directamente en el soporte, en el área central de la cubierta, mientras que los voladizos, a ambos lados, se sostienen mediante los cables que descuelgan de la cúspide de los mástiles. Pero dada la inexistencia de una simetría que permita el equilibrio, el área interna tiene una mayor masa, que logra compensarse en la parte exterior mediante los mencionados cables, que trasladan las tensiones al terreno, donde se ocultan unas grandes moles.

El artificio técnico de esta obra queda expuesto como elemento estético, aunque de una entidad reducida, frente a la rotundidad formal de la cubierta, que se entiende como un elemento ingrátido, pareciendo flotar sobre los espectadores, guareciéndoles de las inclemencias. La relación de esta solución, con las características nombradas en el apartado de volumen suspendido²⁶⁹ son obvias, por lo que a la hora de la concepción existen grandes paralelismos. Las grandes diferencias radican en las intenciones proyectuales, que no se centran, tanto en ese efecto, como en la consecución del espacio generado bajo ella, y la percepción del espacio interior. Así la obra desde el interior podemos entenderla dentro de la presente categoría, mientras desde el exterior se percibe como un volumen suspendido. La concepción de los proyectos raramente atiende a un único factor y por ende emplea al unísono múltiples herramientas de diseño, por lo que en obras de cierta entidad es habitual que aparezcan varias tipologías de grandes luces, para formar un conjunto rico, en el que se aúnen expresión formal y sensitiva del espacio, como una experiencia global y una interpretación particular del espacio arquitectónico del hombre. Este tipo de obras, en concordancia con los recursos técnicos empleados, se encuadran en la contemporaneidad, destacando el reto formal frente a las formas del pasado. Proyectos como el expuesto, solo se pueden concebir en las últimas décadas, donde medios de cálculo, materiales y la economía, permiten tal alarde resolutivo. Así este tipo de obras son propias de la contemporaneidad. Ejemplo de ello, es que la mayor parte de los estadios deportivos han estado sin cubrir hasta recientes fechas o con medios de cubrición muy limitados²⁷⁰, mientras que hoy se

²⁶⁹ Podemos relacionar este estadio con la tipología proyectual de volumen suspendido, ya que se trabaja con un volumen aparentemente pesado, que se sostiene mediante un número tan reducido de soportes que aparenta flotar. Pero de forma paralela este proyecto se cataloga dentro del presente grupo dado que al unísono, desde el interior la sensación de los asistentes que habitan el espacio bajo esta cubierta, resulta un factor vital en la obra. Se podría resumir que en los proyectos de volumen suspendido, las intenciones proyectuales se centran en la percepción desde el exterior, mientras que en las de espacio unitario, lo realmente importante es la percepción interior. Pero éste es claro ejemplo de las múltiples interpretaciones e intenciones que pueden estar ligadas a un acto proyectual y la relevancia de comprender el alcance y el enfoque de cada acto plasmado en las formas de la edificación.

²⁷⁰ Esta afirmación se hace respecto a estadios deportivos, como los de fútbol o béisbol, ya que en otros casos como los de baloncesto y polideportivos, al ser luces más modestas, se han logrado cubrir en su totalidad en fechas más remotas, con resultados sorprendentes en muchas ocasiones. En cualquier caso estos últimos, al encontrarse cubiertos en su totalidad, hablamos de otro tipo proyectual para el tema que nos interesa.

encuentran guarecidos bajo grandes cubiertas que meramente dejan al descubierto parte del campo de juego, pudiendo incluso en algunos casos cubrirlo cuando se requiere.

Esta tipología proyectual busca confeccionar un elemento de cubierta cuyas referencias espaciales permitan entenderse como un firmamento artificial, al tiempo que mantiene nexos visuales, tanto con el entorno, como con el cielo, posibilitando su entendimiento como medio de adecuación espacial. La adopción de soluciones aparentemente ingravitas, es una de las líneas de actuación y una consecuencia de la reducción al mínimo del número de soportes y de las interferencias visuales dentro del recinto. Si no es claramente una prioridad este efecto, sí una de las principales características que definen esta tipología.

Figura 146. Estadio de Gottlieb-Daimler, Stuttgart (Alemania), renovación obra de los arquitectos Weidleplan Consulting GmbH y Siegel & Partner (1993).

Desde el punto de vista resolutivo este tipo de proyectos, por cuestiones escalares y de optimización, suelen desdeñar el uso de módulos autónomos, para optar por sistemas de funcionamiento en conjunto. Este tipo de soluciones, requiere la presencia de todo el conjunto para el funcionamiento resistente. Así el funcionamiento como un modelo unitario, permite la adopción de esquemas resistentes lo suficientemente óptimos como para reducir el uso de material y establecer una opción constructiva competitiva. Un ejemplo de ello, son los estadios de fútbol que optan por esquemas basados en la adopción de un anillo exterior comprimido y un anillo interior traccionado²⁷¹. Un buen ejemplo es el estadio de Gottlieb-Daimler (Figura 146),

²⁷¹ Este esquema resolutivo, basado en un anillo exterior comprimido y un anillo exterior traccionado, tiene su antecedente histórico, con una inversión de los esfuerzos, en la problemática inherente a las cúpulas que presentan en su cúspide la abertura que permite la entrada de luz desde la linterna. En casos como el de la cúpula de la Basílica de San Pedro (Vaticano), en torno a la perforación superior se configura un anillo comprimido, mientras que en la base de la cúpula se configura un anillo traccionado, por lo que ésta tiende a abrirse, apareciendo sistemáticamente fisuras en forma radial, en un ángulo de apertura medio de 30° a 35°. Debido a esta realidad intrínseca al funcionamiento de las cúpulas, se producen las fisuras radiales en la base y se concentra la mayor parte de la problemática proyectual en evitar este hecho y trasladar los esfuerzos de la base de la cúpula hasta el terreno, sin la aparición de los esfuerzos tractores, que la piedra es incapaz de soportar. En el caso de la cúpula de San Pedro, para la conformación del anillo traccionado, se disponían unas barras de de hierro, insuficientes para la

en Stuttgart (1993), cuya renovación estuvo a cargo de los arquitectos Weidleplan Consulting GmbH y Siegel & Partner. Los 40 soportes se emplazan exteriormente fuera del límite del graderío, por lo que la interferencia de la intervención de la cubierta sobre los graderíos existentes es nula. Estos soportes mantienen en su posición dos anillos comprimidos, uno a la altura del plano de la cubierta y otro en la parte superior desde el que descuelgan unos cables hasta el anillo traccionado interior, permitiendo mantener estable la posición de este último, al tiempo que traslada parte de las cargas hasta los soportes. El anillo interior soporta por su parte grandes esfuerzos tractores, permitiendo el mantenimiento de la forma. La cubierta se conforma desde las vigas radiales, mediante formas abovedadas constituidas de una lámina textil de fibra de poliéster recubierta de PVC. En conjunto la cubierta tiene unas dimensiones exteriores de 280 metros de largo y 200 metros de ancho, mientras que la parte descubierta central es de 222 metros de largo y 142 de ancho. Así la cubierta perimetral tiene una luz de 29 metros, apoyada exclusivamente de forma perimetral. En proyectos como éste se percibe, tanto la relevancia de los medios de cálculo que han hecho posible su resolución²⁷², como de los materiales y sistemas estructurales. En este tipo de proyectos, dada la necesidad de que la interferencia de los soportes resulte mínima, las soluciones de cubiertas ligeras resultan de vital relevancia para minimizar la entidad y presencia de las columnas. Por su parte las soluciones textiles permiten responder a los requerimientos exigidos a la cubrición, sin una completa adecuación higrotérmica, al tiempo que limita el impacto de las cargas de peso propio de la cubierta.

Así un amplio porcentaje de este tipo de obras se destacan por *“(...) la eficacia de la forma, entendiendo por eficacia, no solo su óptimo funcionamiento estructural, la utilización de la mínima cantidad de material (esbeltez), la racionalización de los procesos constructivos, y su coste, sino también la eficacia funcional y estética que aportaba la supresión de elementos superfluos”*²⁷³. En este marco el entendimiento

resolución de dicha problemática, lo que ha llevado a múltiples problemas constructivos a lo largo de la vida del edificio. En el caso del Panteón de Roma, un universal referente, se ve claramente como en torno al óculo se conforma un anillo comprimido y en la base de la cúpula, exteriormente se conforman una serie de anillos traccionados, de los que hasta la fecha se ha especulado en numerosas ocasiones, pero se supone que son de carácter cerámico. Actualmente este esquema se ha invertido, gracias a los materiales de los que se dispone, capaces de trabajar, tanto a compresión, como a tracción. Generalmente resolviendo los elementos comprimidos mediante barras de mayor entidad, a causa del pandeo al que se encuentran sometidos los elementos estructurales, mientras que los traccionados se materializan mediante cables o barras de reducida sección, este es el caso del estadio de Gottlieb-Daimler, en Stuttgart. En esta obra los elementos estructurales aparecen claramente diferenciados, conformándose la cubrición mediante elementos textiles de fibra de poliéster recubierta de PVC.

²⁷² La resolución numérica de este proyecto, gracias a la claridad de la solución, resultaría abarcable por medios de cálculo manuales, como el cálculo gráfico. Pero se encuentra realizado por cálculo matricial por ordenador, que otorga un resultado más cercano a la realidad física de la solución final.

²⁷³ CASSINELLO, Pepa, BÖGLE, Annotte, CACHOLA SCHMAL, Peter, SCHLAICH BERGERMANN UND PARTNER, *“Estructuras ligeras”*, Madrid (España), Mairia Libros, 2011, p. 10.

estructural está directamente enlazado con la concepción estética del edificio, siendo un único gesto, tanto constructivo como conceptual. La cubierta desde un germen funcional, centra su interés en la confección de un ambiente especial en el que se desarrollen las actividades propias de la edificación. Como se ha comentado este entendimiento va ligado a un marco temporal, por lo que obras hoy realizables, hace solo unas décadas eran retos inabarcables o en márgenes que dificultaban su implantación generalizada en proyectos como los estadios deportivos. Pero indisociablemente un gesto de esta magnitud lleva asociado un factor estético, punto en el cual aparecen los lazos conceptuales con las consideraciones explicadas a la hora de la proyección del volumen suspendido. En aquel punto se explicó el Estadio de fútbol Omnilife o “Estadio de Las Chivas de Guadalajara” (Figura 147) (México), obra de VFO arquitectos (2007-2010), también enmarcable en la presente tipología. Así un proyecto, tanto desde el punto de vista interior, como exterior, con un mismo gesto puede trabajar con las grandes luces como herramienta perceptiva, que redunde sobre la experiencia que el usuario tiene de la edificación. En el caso de este proyecto se ve así mismo, como la solución estructural adoptada, no corresponde al ámbito de las estructuras ligeras, trabajando con otros conceptos que redundan sobre la percepción exterior del elemento de cubierta, pero este hecho no impide su clara pertenencia así

Figura 147. Estadio de fútbol Omnilife o “Estadio de Las Chivas de Guadalajara” (México), obra de VFO arquitectos (2007-2010).

Este fragmento corresponde a un texto dedicado a las “Estructuras Laminas de Hormigón (1923-1959)”, pero expresa igualmente las virtudes intrínsecas a la formalización de las cubiertas ligeras, sea cual fuere el material y el contexto en el que se plasmen.

mismo a la presente tipología. Por lo tanto, lo que caracteriza a la presente clasificación no es ni la elección estructural o volumétrica concreta, sino la concepción espacial y la asunción de las grandes luces como herramienta para la resolución proyectual, como parte indisociable del proceso de pensamiento que conduce a la formalización de la obra.

En este marco proyectual, si no es un requisito indispensable, las soluciones de cubiertas ligeras son una de las principales líneas de actuación y por consiguiente resultan de gran relevancia los avances que puedan producirse en el campo de la ciencia de materiales, que permita la reducción de las cargas de peso propio y la confección de cubriciones con unas cualidades y durabilidad aceptables para los requerimientos proyectuales y económicos de la obra. Así mismo, los medios de cálculo dan una mayor libertad formal que la asumible en el marco del cálculo manual de las estructuras.

En casos como el Estadio Nacional de Pekín (Figura 148), supuso un alarde formal sorprendente, confeccionando la superficie exterior de la edificación como un *“nido de pájaro”*, entendiendo la piel como un todo indisociable, pasando los cerramientos laterales, a configurar la cubierta en la parte superior, sin una distinción formal. Esta obra trabaja con los conceptos espaciales expuestos, aunque desde el graderío, los nexos con el entorno se han roto y solo queda el referente del espacio central al aire libre, un caso extremo desde el punto de vista espacial. Así mismo la solución técnica y formal empleada, ha supuesto un gran sobre coste en el uso de material, frente a las soluciones más óptimas anteriormente comentadas, por lo que a la hora del proyecto, es necesario sopesar la procedencia de adoptar una u otra solución y las repercusiones económicas que ello plantea. En este caso, dicha adopción está claramente motivada por la percepción exterior de la edificación, como icono de los Juegos Olímpicos de Pekín (China), en 2008. Ha sido un ímprobo esfuerzo formal, enfocado en la percepción

Figura 148. Estadio Nacional de Pekín (China), obra de Jacques Herzog y Pierre de Meuron (2008).

exterior, sin ventajas evidentes desde el punto de vista de la conformación espacial interior del estadio. Este tipo de planteamientos, permite clarificar las prioridades proyectuales y el papel que juega cada decisión dentro del crisol que conforma el proyecto hasta la culminación de la obra. Como ya se ha hecho mención en numerosas ocasiones, el proceso de proyectación es un procedimiento complejo, en el que actúan múltiples agentes y consideraciones en muchos casos intangibles, como en el tema de la representatividad formal. Pero en el presente apartado, desde el punto de vista de la concepción espacial del proyecto, la repercusión sobre el usuario, como medio o entorno de referencia, resulta el principal factor. Más allá de una respuesta funcional a una problemática puramente práctica, se busca la adopción de soluciones espaciales y formales, que hagan de la experiencia de la obra un hecho trascendente, que redunde en el éxito de la intervención, como medio expositivo de una actividad. Éste ha sido el general de los casos expuestos, pero este tipo de soluciones pueden resultar de aplicación en otros contextos, siempre que la concepción del espacio resulte asimilable a los medios resolutivos expuestos, ya cambie el uso, forma, esquema resistente... De la misma manera, hay que ser conscientes de que el uso de herramientas de grandes luces para la conformación espacial de la obra, en muchos casos van ligadas a concepciones volumétricas exteriores dentro del marco expuesto de las grandes luces, por lo que no se puede entender la obra desde un único punto de vista, sino como la suma de múltiples líneas de actuación coordinadas, con una finalidad concreta, intrínsecamente plasmada en el germen proyectual que estructura la obra.

En proyectos como la Cubierta Textil para Polideportivo multiusos en un Colegio de Madrid (Figura 149), se trabaja con los mismos conceptos anteriormente expuestos, en este caso incluso con la adopción de soluciones de cubiertas ligeras, empleando material textil, y una sección antifunicular, óptima para el esquema de cargas al que está sometido. La cubierta permite una diferenciación espacial y una protección ante las inclemencias meteorológicas, pero no puede ser considerado plenamente un interior, al no establecer un control higrotérmico concreto. Si bien esta obra es mucho más sencilla y de menor escala que las expuestas (25 x 35 metros), logra la conformación de un espacio adaptado para la actividad a realizar y se entiende la obra como un medio de expresión espacial que matiza la experiencia en él vivida.

Figura 149. Cubierta Textil para Polideportivo multiusos en un Colegio de Madrid (España), realizada por la empresa CARRPATEC, como parte de los modelos que emplea.

La presente tipología, como parte de una gradación, plantea las dificultades de la concepción de unos espacios que conceptual y perceptivamente, se encuentran entre un interior y un exterior, pero en todo caso la concepción se centra en parámetros espaciales y no volumétricos como los expuestos en el apartado del “*Volumen Exterior*”.

- Firmamento

En la citada gradación espacial, entre la definición del espacio interior y el exterior, ésta es la siguiente escala. En esta tipología se definen espacios claramente diferenciados del exterior, en los que existe un control completo de los parámetros higrotérmicos, manteniendo al mismo tiempo los nexos visuales con el entorno en el que se emplaza la edificación. Este recurso visual es un medio para enmarcar conceptualmente la obra en un ámbito físico, enlazándola con el lugar y haciéndola partícipe de éste. En las antiguas estaciones de ferrocarril, aun con el empleo de formas procedentes de la técnica, el ornamento aparecía como elemento mediador con el lugar, capaz de conectar la obra con la urbe en la que se emplaza, en parte como representación de la misma. La presente tipología concebida dentro de los márgenes de la contemporaneidad, no suele contemplar la aparición del ornamento como medio independiente enfocado en el propósito expuesto, por lo que los nexos visuales con el entorno marcan esta interacción, siendo uno de los principales ámbitos de reflexión proyectual.

Como ambiente perceptivamente independiente del exterior, se produce una lectura de la cubierta como *"firmamento artificial"*, proporcionando, tanto una protección ante las condiciones climáticas exteriores, como un control sobre la iluminación, ajustando todos los parámetros habitacionales a los requerimientos de la actividad allí realizada. Este efecto se logra por la reducción de la influencia de las visiones del firmamento exterior, estableciendo unas nuevas referencias para la interpretación del espacio, centrándose los nexos visuales, en su mayor parte en ámbitos relativos a los elementos del entorno. La materialidad de la cubierta pierde parte de su relevancia, ya que se encuentra ahí como un elemento inalcanzable que nos guarece, determinando el marco de actuación de lo que bajo ella acontece. La cubierta puede estar resuelta mediante distintos materiales, sistemas estructurales y esquemas formales, pero en todo caso se mantiene inalterable su percepción como firmamento artificial. La resolución concreta, ya sea mediante una lámina de hormigón armado, cerámica armada, elementos textiles, mallas de cerchas metálicas o cualquier otro sistema resistente o material, marcan los matices que condicionan la lectura del firmamento y las connotaciones que lleva asociado. Así por ejemplo el empleo de soluciones en hormigón o cerámica, otorgan un entendimiento masivo, que potencia la percepción ingrátida del elemento de cubierta, aumentando el impacto visual que produce la intervención.

Un factor relevante a tener en cuenta, es la incorporación o no de elementos de lucernario, que permitan una mayor uniformidad de la iluminación mediante medios naturales, ya que desde el ámbito perceptivo esto influye en su interpretación como elemento de regulación de las condiciones interiores²⁷⁴. Así mismo la percepción de la

²⁷⁴ Un ejemplo de la correcta regulación que puede realizar la cubierta en las condiciones interiores de la edificación, son las innumerables cubiertas en diente de sierra de numerosas edificaciones fabriles, que perteneciendo a otro ámbito tipológico, pueden servir de referencia. Estas cubiertas establecen unos lucernarios, que orientados correctamente ofrecen una iluminación constante, así como gracias a la apertura de elementos de ventilación, permiten una renovación del aire interior. Así mismo, en el nivel de la cubierta se pueden incorporar las instalaciones de climatización e iluminación, que permiten establecer unas correctas condiciones higrotérmicas y lumínicas, cuando los medios naturales no lo

cubierta como elemento monolítico o como un sistema complejo, como el percibido en el caso de las mallas de cerchas metálicas, el entendimiento unitario de la intervención redunda en la potencialidad visual.

Se configura un pequeño cosmos adaptado a las necesidades del hombre, como un entorno ideal. Este medio emplea una escala superior a la humana, ya que conceptual y perceptivamente se encuentra un nivel por encima suyo, como un pequeño mundo concebido por y para el hombre, hecho que permite al usuario su comprensión y asimilación como medio en el que realizar sus actividades. No es necesario por parte del usuario una comprensión del funcionamiento estructural de la solución, sino más bien por el contrario, se suele optar por la ocultación de los medios de sustentación, para potenciar el efecto de *“levitación”* de la cubierta. Para ello se puede decantar por trasladar los medios de sustentación y sistema resistente al exterior o por el empleo de soluciones como las estructuras laminares, que ayudan a confeccionar el efecto deseado. Mediante el citado efecto de *“levitación”*, se potencia la interpretación por parte del usuario de la cubierta como firmamento, suspendido sobre él, condicionando su entorno.

Figura 150. Olympic Cycle Stadium and Swimming Pool en Berlín (Alemania), obra de Dominique Perrault (1992-1999).

permiten. Así como en el ejemplo expuesto, el ámbito proyectual que nos atañe presta gran relevancia a este tipo de consideraciones, para el establecimiento de un ambiente ideal para la realización de las actividades a las que está destinada la edificación, empleando espacios de grandes luces, que conceptualmente permiten generar un microcosmos centrado en el hombre, pero aún referenciado con el marco físico en el que se emplaza la edificación.

El factor dimensional de este tipo de espacios, la carencia de interferencias de los medios de sustentación en el interior del espacio y el control sobre las condiciones higrotérmicas, hacen en su conjunto que este tipo de soluciones se caractericen por su flexibilidad a la hora de ser habitados, pudiendo acoger un buen número de actividades distintas sin que su esencia se pierda en el proceso. Así mismo, esta capacidad adaptativa, permite que un espacio pueda modificar las actividades realizadas en su interior a lo largo de su vida útil, adaptándose a los cambios, ya sean programados a priori o como cambio de actividad general de la edificación. Un espacio deportivo, bien puede pasar a transformarse en uno apto para un concierto, una actividad expositiva o cualquier otra, transformando ligeramente aspectos como iluminación, climatización y transformaciones a nivel del suelo. Así en un buen número de proyectos, conscientes de esta potencialidad, optan por sacar partido de tal capacidad, modificando los atributos proyectuales para facilitar dicha transformación, convirtiéndose en muchos casos en procesos rutinarios, que exigen una mínima actividad transformadora.

El Olympic Cycle Stadium and Swimming Pool en Berlín (1992-1999) de Dominique Perrault (Figura 150), nos demuestra como una cubierta bien concebida permite dar cabida a cuantas acciones requiera el usuario, respondiendo a funcionalidades que pueden resultar sumamente diversas y variables. En este edificio el espacio del velódromo para ciclistas, cuando es preciso se transforma, para adaptarse a otros tipos de usos, acogiendo múltiples variedades de eventos públicos. La estructura radial de la cubierta, pierde importancia respecto a lo que bajo ella acontece, pese a que establece un punto de fuga, centrando la atención espacial en la pista de velocidad, logrando en conjunto, la libertad espacial que estos proyectos buscan desde su concepción, como medio base a adaptar para los fines más concretos a los que se destine en cada momento. Por su parte, las conexiones con el exterior se controlan mediante una visión perimetral del entorno, pero al encontrarse esta cubierta en una depresión artificial, establece como elemento contextual la ladera verde que rodea la sala, como referente idílico del entorno deseado. En este caso la edificación niega en cierto grado su propiedad urbana, para mediante un efecto escénico, trasladar al usuario a un entorno considerado más placentero, como un medio natural, tan ordenado y regulado, que denota su artificialidad y desvela su intención perceptiva. En la mayor parte de los proyectos de esta categoría, los nexos visuales con el exterior suelen resultar más directos, desvelando aquellas visiones deseadas del entorno que permitan enlazar la obra y supongan un aporte para el proyecto, de ahí que cuando no se considera que estas visiones puedan suponer una ventaja, se opta por en un esfuerzo escénico, formalizar un entorno representativo, que sirva hasta cierto punto de idílico entorno, marco de un espacio en cierto modo ideal para la actividad del hombre.

Un ejemplo remoto de la versatilidad de este tipo de soluciones lo encontramos ya en la obra de Eladio Dieste, quien con un mismo modelo proyectual da, tanto respuesta a la Asociación de Empleados Bancarios del Uruguay – AEBU (1964), como al Mercado

Central de Porto Alegre²⁷⁵ (1970) (Figura 151), obra de Carlos M. Fayet, Claudio Araujo y del ingeniero Eladio Dieste. En ambos emplea las bóvedas gausas de doble curvatura, realizadas en cerámica armada, en el caso del Mercado Central de Porto Alegre, de un ancho de 5 metros y una luz de 35 metros. Con este recurso estructural y formal, sumado a los tensores de acero, necesarios para compensar los empujes horizontales en la base de las bóvedas, se establecen los elementos básicos de la edificación. En la banda que queda bajo la cubierta, se establece un paramento que deja pasar la luz por la parte superior, abriendo visiones en aquellos puntos de tránsito. Al tiempo, en la cubierta entre cada elemento modular, se configuran los lucernarios que dan respuesta a la iluminación y la percepción del entorno, aunque se centre de forma casi exclusiva en el firmamento, como medio de conexión perceptiva entre el firmamento real y el artificial. Así mismo un recurso técnico como los cables que conectan los extremos de las bóvedas, concentran además la iluminación artificial, aprovechando su disposición en la espacialidad interior. Estos proyectos han demostrado su adecuación a las exigencias a lo largo del tiempo, empleándose variaciones de este esquema en polideportivos, almacenes y cuantos proyectos pueden valerse, tanto del recurso estructural y formal empleado por Eladio Dieste, como por esta tipología espacial de grandes luces, que ofrece una flexibilidad que, posiciona las obras que lo emplean como elementos ampliamente funcionales y longevos, ya que su adaptación a nuevos usos hace más económica la readaptación que la sustitución.

El término “flexibilidad”²⁷⁶ en la edificación, ha pasado de ser una visión transgresora de la arquitectura a comienzos del pasado siglo, a un requisito básico que hoy se plantea en un amplio rango de proyectos. La arquitectura no solo debe dar una respuesta a una problemática única y concreta, sino ofrecer respuesta a una variabilidad futura o una adaptación continua a exigencias rápidamente alterables. La presente tipología y las grandes luces, son recursos vitales para el entendimiento de la flexibilidad arquitectónica en los términos que el siglo XXI exige. Así los proyectos pertenecientes a este punto, conforman un “nuevo exterior”, libre de las ataduras y controversias del medio exterior, un ambiente ideal diseñado a la conveniencia de las exigencias del hombre, favoreciendo su actividad. En definitiva la arquitectura es la adaptación que el hombre hace del medio, para adecuarlo a su existencia, siendo el presente ámbito

²⁷⁵ Las conexiones visuales establecidas en esta obra con el entorno resultan mínimas, al punto de encontrarse en los límites de la actual clasificación, bien pudiendo concebirse como “microcosmos”. El hecho primordial de que pertenezca a la actual clasificación, es la interdependencia y el constante flujo de usuarios y mercancías que se producen con el entorno. Además las aperturas de los paramentos que sirven, tanto de nexo visual, como de circulaciones, establecen focos de atención, organizando la forma en la que se coloniza el interior de la edificación. El Mercado Central de Porto Alegre es sin duda una obra que visualmente materializa magistralmente el concepto de “firmamento artificial” y el control que éste ejerce sobre las condiciones higrotérmicas, aun con unos medios auxiliares mínimos.

²⁷⁶ “La flexibilidad en la arquitectura es la posibilidad que posee un ambiente, (por sus características de diseño) de admitir diferentes usos. (...)”

El espacio de mayor flexibilidad es la <planta libre> porque permite adecuar y dividir el ambiente único según las necesidades por actividad, función, etc.” (definición dada en la construpedia).

tipológico un punto extremo, rematado con la generación de un microcosmos independiente como se verá en el siguiente punto.

Figura 151. Mercado Central de Porto Alegre (Brasil), obra de Carlos M. Fayet, Claudio Araujo y del ingeniero Eladio Dieste (1970).

- Microcosmos

Estos proyectos llevan la idea de generar un ambiente propio, un paso más allá que en la categoría anterior, trasladando la metáfora de generar un pequeño cosmos a una realidad construida, en la que se configura un ambiente independiente del entorno. Éste puede estar enfocado a un uso muy específico o como ya se ha mencionado, dar respuesta a un amplio margen ocupacional.

Tal vez el ejemplo más claro de microcosmos lo encontramos en la construcción de invernaderos, dada la literalidad de la generación de un ambiente específicamente diseñado para el mantenimiento de unas condiciones ideales, en este caso para la vida de ciertas especies vegetales o incluso animales. Dentro de este tipo de proyectos destaca el Eden Project en Cornwall (Reino Unido) (1996-2001), obra de Nicholas Grimshaw (Figura 152). Este edificio recrea ambientes de otras partes del globo,

Figura 152. Eden Project en Cornwall (Reino Unido), obra de Nicholas Grimshaw (1996-2001).

radicalmente distintos al de Cornwall, en unidades independientes que denominaron “*biomes*”²⁷⁷, conectados entre sí para el discurrir de los visitantes. Permitiendo circular por espacios que dan sustento a especies vegetales de distintas zonas, concienciando al visitante de la riqueza de cada uno de estos ambientes y su vegetación, mediante su inmersión en la atmósfera artificial que recrea cada espacio. Se generan en este edificio una serie de microcosmos particulares adaptados a sus habitantes, en este caso vegetales, de forma independiente del entorno. Este proyecto podría situarse en medio del desierto del Sahara y no perdería su esencia particular. Este proyecto desde el punto de vista estructural y formal, se fundamenta en los conocimientos de cúpulas geodésicas desarrollados por Richard Buckminster Fuller (1895-1983), desde la primera cúpula geodésica del mundo erigida por él en 1949²⁷⁸. Por lo que respecta a la conformación de la cubrición, de forma acorde con el modelo estructural de cubierta ligera, se opta por una solución análoga, al tiempo que ecológica, empleando el tetraetileno de flúor (ETFE), que aúna gran resistencia, dureza y ligereza, al tiempo que permite un correcto paso de la luz, es mucho más aislante que el vidrio y es reciclable. Este tipo de elección estructural y de materiales dan cuenta de las ventajas de la adopción de los nuevos materiales, que pueden en conjunto suponer una mejora sobre líneas más clásicas de edificación. Si bien es solo una de las líneas de actuación dentro del marco de la generación de “*microcosmos*”, la obra expuesta da buena cuenta de cómo se pueden llegar a recrear las condiciones ideales, ya sea para el mantenimiento de unas condiciones climáticas concretas o las circunstancias ideales para la realización de ciertas actividades, pudiendo existir medios de regulación, que al igual que en el caso expuesto, permitan modificar los parámetros para adecuarse a la variación funcional de la edificación.

Un ejemplo de esta variabilidad lo podemos encontrar en los espacios expositivos, que lejos de la monótona exhibición de obras pictóricas o escultóricas, con unas condiciones muy concretas que permitan su contemplación y su conservación, actualmente se exige una gran flexibilidad, que posibilite el establecimiento de escenografías muy distintas, por lo que la edificación debe estar enfocada para permitir dichos cambios con naturalidad. Este hecho es plenamente patente en el Centro Georges Pompidou de París (Figura 153), obra de Renzo Piano y Richard Rogers (1977). En esta obra, más allá de las decisiones estéticas transgresoras de enviar al exterior las instalaciones transformándolas en un elemento estético, desde el punto de vista de la espacialidad interior se produce un salto evolutivo que marca un punto de inflexión y una vía para futuros desarrollos arquitectónicos. Al igual que las instalaciones, los elementos

²⁷⁷ Un bioma es una agrupación de plantas y animales que tienen características comunes, debido a su presencia en climas similares, pudiendo encontrarse en varios continentes. El término bioma, difiere del de hábitat, ya que un bioma puede englobar múltiples hábitats.

²⁷⁸ Richard Buckminster Fuller realizó en 1949 la primera cúpula geodésica del mundo con 4,2 metros de diámetro. Ésta permitió testar el modelo geométrico, dando paso en años posteriores a obras de mayor tamaño, adquiriendo un gran impacto mediático en la década de 1950. De este modelo estructural la obra más conocida internacionalmente es el Pabellón Americano de la Expo de Montreal de 1967, (ahora la Biosphère, en la Île Sainte-Hélène, Montreal).

estructurales se trasladan al perímetro para conformar cinco niveles sobre rasante, más el inferior, absolutamente diáfanos y adaptables a las condiciones exigidas por las exposiciones temporales, que buscan, en algunos casos, la creación de un ambiente sumamente particular en el que poder establecer una lectura contextualizada de las obras.

Si bien en esta obra existen nexos visuales con el exterior, estos son intrascendentes para la concepción espacial, que se centra en la generación de un marco de referencias internas cambiantes. El deseo original de *"flexibilidad espacial"*, claramente apunta a las soluciones de grandes luces, como medio de liberalizar los espacios de la influencia de los medios de sustentación, a cuya ordenación se ve subyugado el general de las edificaciones. Así mismo, la altura de cada uno de estos niveles, ha de ajustarse para asumir un mayor número de transformaciones, sin un detrimento de las condiciones lumínicas o higrotérmicas, optando por una altura de 7 metros. Así finalmente se organiza una estructura de grandes dimensiones, formada por 14 pórticos de acero, luces de 48 metros cubiertas por vigas celosía. El apoyo de vigas de tal entidad (45 metros) y las cargas por ellos sustentadas, exigía un especial cuidado en el apoyo,

Figura 153. Centro Georges Pompidou de París (Francia), obra de Renzo Piano y Richard Rogers (1977).

empleando como elemento intermedio unas grandes piezas de acero moldeado, que conforman la imagen exterior, llamados “*gerberettes*”, que volando al exterior tienen una dimensión de 8 metros. Estas piezas permiten primeramente el apoyo de las vigas y a su vez mediante la disposición de unos tirantes en el extremo exterior, permiten equilibrar los esfuerzos a ambos lados, para impedir la transmisión de momentos flectores a los soportes. Esta obra da buena muestra de cómo la técnica libera los espacios del corsé estructural y ornamental al que había estado sometida la arquitectura en siglos anteriores, las soluciones de grandes luces permiten la creación de espacios auto-referenciados, claramente enfocados al desempeño de una actividad, así como para el cambio de ésta. Además la resolución técnica y espacial en sí misma, resulta bella y una forma de transmitir sensaciones, un nuevo lenguaje de la arquitectura, que conocemos como Arquitectura High Tech. Las obras incluidas en este estilo arquitectónico, desarrollado durante los años setenta, establecieron las bases para el actual entendimiento de la arquitectura y del papel de la técnica como parte estética de la edificación. El High Tech hace un ejercicio de sinceridad constructiva y uso de los avances del ámbito técnico del momento, mostrando lo que tiene que ofrecer la contemporaneidad arquitectónica.

En esta tipología de las grandes luces, aunque el High Tech solo representa una de las líneas de actuación, como marco en el que se produce un entendimiento más extremo, tanto desde el punto dimensional, como expresivo, los conceptos manifestados en buena medida trabajan con dicho marco conceptual. En cualquier caso, es un ámbito en el que se produce un mayor uso de los avances, tanto en los sistemas constructivos, como en los materiales, perdiendo ante la magnitud técnica, relevancia otros factores más superfluos. Por ello, en este tipo de obras, siempre aparece una estética condicionada por los medios estructurales.

Como se ha visto, este tipo de proyectos pueden dar respuesta, tanto a invernaderos, como a centros expositivos, pero entre la multitud de ámbitos es de reseñar el papel de este tipo de soluciones en la arquitectura religiosa. En este tipo de templos y en especial en el cristianismo, la espacialidad interior intenta sobrecoger al espectador eliminando las referencias exteriores del microcosmos que configura, empleando la luz como principal herramienta para matizar los espacios, ensalzando con ella la imagen

Figura 154. Iglesia de San Pedro en Durazno (Uruguay), obra de Eladio Dieste (1971).

reverenciada, claro centro de la representación arquitectónica de la obra. Por esta razón a lo largo de los siglos, las grandes luces han sido la herramienta espacial empleada en este tipo de obras, logrando en la actualidad con mayor facilidad los efectos deseados, otorgando así mismo una mayor libertad expresiva. Entre la producción de Eladio Dieste encontramos obras como la Iglesia de San Pedro en Durazno (Figura 154) de 1971, donde mediante cerámica armada, logra conformar una cubierta en la que sorprende la desaparición de los medios de sustentación, allí donde la tradición nos ha dicho que deben estar, usando la luz para desmaterializar visualmente el apoyo de la cubierta y orientar todas las miradas al altar, que aparece como un foco de luz. Así la resolución técnica, se enlaza con el trasfondo religioso de la edificación, para convertir el gesto en símbolo. La arquitectura religiosa a lo largo de los siglos, ha sido caldo de cultivo de los avances técnicos y aunque actualmente haya perdido ese papel, continua haciendo uso de esas herramientas, con una marcada intencionalidad simbólica, buscando un trasfondo expresivo de todo gesto y todo reto gravitatorio, por ello aún es un ámbito del que se puede aprender y enriquecerse.

Esta tipología de grandes luces es el ámbito más extremo y donde se produce un mayor acercamiento a la espacialidad ideal del hombre, por lo que se constituye como un margen propicio para la experimentación y donde buscar aquellos avances que pueden repercutir en la globalidad del entendimiento arquitectónico. Así mismo, al hacer uso en general de unos rangos dimensionales límites, aportan nuevas experiencias desde el punto de vista técnico, enriqueciéndose de todos aquellos avances en materiales y soluciones técnicas que permitan ampliar los rangos dimensionales. Como ya se ha recalcado en apartados anteriores, las limitaciones dimensionales reales de la técnica las encontramos en los puentes.

La arquitectura está condicionada por el objetivo funcional al que se encuentra destinada, que define los márgenes dimensionales razonables en los que se debe encontrar el espacio, justificando la adopción de este tipo de soluciones. Por su parte, aquellos proyectos como centros feriales, expositivos... que tienen un claro carácter multiusos, no cuentan con unos márgenes tan claramente definidos como en el caso de espacios deportivos o invernaderos, por lo que otorgan la posibilidad de establecer unos parámetros más extremos en la búsqueda, tanto de una superación técnica, como de una mejora de las cualidades espaciales.

Grandes espacios autónomos del entorno, muy especializados y flexibles, son las tres principales características que distinguen a los proyectos de esta categoría. Este tipo de obras, por todo lo comentado, es el caldo de cultivo para la concepción de los espacios propios del siglo XXI, logrando materializar el concepto de *“planta libre”*, así como los espacios ideales para el hombre, reflejo de sus necesidades y aspiraciones.

4. Conformación visual. Lectura enfática de la obra

En las anteriores clasificaciones proyectuales se ha atendido a parámetros volumétricos y espaciales, para intentar clarificar las líneas de actuación que se pueden adoptar en la conformación de los proyectos de grandes luces, así como las potencialidades y complejidades que entraña cada uno. En todas las actuaciones en las que se opta por la adopción de soluciones de grandes luces, se perciben unas claras motivaciones, que pueden ir desde las exigencias funcionales, hasta la expresión visual de la obra. Este último punto resulta de tal relevancia en el marco de los proyectos de grandes luces, que exige su escisión en un ámbito tipológico propio. Anteriormente se ha hecho mención a como en el siglo XX el ornamento fue sustituido por una expresión volumétrica y espacial. Si durante siglos los muros de las edificaciones sirvieron de soporte para un grafismo arquitectónico que permitía la lectura de la edificación, este medio fue sustituido por la expresión de la forma arquitectónica pura, las formas y elementos constructivos en sí mismos han conformado un medio de expresión. Así las grandes luces como medio resolutivo extremo, es una clara vía de exaltación estética y un recurso para incidir sobre usuarios y transeúntes en defensa de una idea, una marca...

Los edificios en sus paramentos contienen la historia de las urbes, atrayendo de una u otra manera un cierto interés, generando una imagen global, dentro de la que ciertas obras desean

Figura 155. Sede de Endesa en Madrid (España), obra de Rafael de La-Hoz Castany (2003).

destacar, estableciendo focos de atención en la ciudad. Si antaño esto hubiera sucedido a través del empleo de caros materiales y un magnífico ornamento, hoy las herramientas volumétricas y los retos gravitatorios son el oportuno proceder para establecer un contrapunto arquitectónico, que permita primar la lectura de unas obras sobre otras.

En este caso la clasificación de las obras de forma acorde, ha de establecerse atendiendo a las motivaciones que originan su adopción. En algunas ocasiones, las funciones del edificio pasan por algo más complejo que las necesidades físicas, para entrar en el campo de la imagen y el requisito proyectual de constituirse como una figuración representativa de una ciudad, un colectivo o una empresa. En estos casos las decisiones proyectuales y de configuración espacial, tienen un claro enfoque visual, ya que en la mayor parte de los casos, la difusión de estas obras icónicas se producirá mediante la fotografía u otros medios que no permiten una percepción tridimensional del conjunto, sino más bien la imagen conjunta de la serie de volúmenes que lo constituyen. Los proyectos icónicos, frecuentemente están enfocados hacia la percepción exterior de los mismos, ya que allí es donde se suele configurar la imagen que representará al edificio. En esta categoría las distinciones vienen dictadas precisamente por el enfoque expresivo del proyecto como imagen, distinguiéndose entre: una necesidad representativa, una exaltación de los medios técnicos o la expresión del gesto, este último como forma de expresión de la obra más allá de una finalidad representativa, buscando la adopción de una imagen reconocible.

En muchas ocasiones, cuando un proyecto ha de ser predominantemente funcional pero necesita establecer un sistema de representación, se opta por proyectos en los cuales la generalidad de la edificación responde a la problemática funcional, concentrando el esfuerzo representativo en una parte de la obra, como medio de conformar una imagen reconocible, sin que ésta resulte un agravio en la racionalidad proyectual. Aunque existen ejemplos más flagrantes, en la mencionada sede de Endesa en Madrid (Figura 155), la ordenación de la edificación se produce siguiendo un esquema en peine al norte, una ordenación consecuente con la racionalidad funcional de la edificación. El esfuerzo representativo se centra en la fachada sur, que da a la autovía M-40, desde donde el gesto del amplio voladizo es percibido por quien lo contempla como un claro esfuerzo representativo, dejándose ver el nombre de la empresa que desea verse reflejada en la edificación, plasmando en ella unos valores de los que desea hacer gala. De forma análoga, en algunos edificios fabriles se concentra el esfuerzo representativo en la parte más pública de la edificación, creando un gesto reconocible y así mismo un icono que sirva de representación visual de un ente inmaterial como el de una compañía. Un símil de este proceso lo podríamos encontrar en la publicidad y los recipientes de perfumería, que intenta representar, mediante una imagen, un sentimiento y una sensación que sirva de referencia para una esencia, que ninguno de estos medios es capaz de transmitir de forma directa. Sin un contacto directo nadie puede conocer el olor de un perfume, pero su comercialización se fundamenta en la venta de una imagen que represente ese olor, aunque no exista ninguna relación lógica entre ambos. En el caso de las empresas como entes inmateriales ocurre un proceso análogo, en el que la arquitectura se plantea como dar rostro a estos entes, atendiendo, tanto a su actividad, como a sus intereses y preocupaciones. En todo esfuerzo de representación, se desea establecer un énfasis sobre la percepción de la cotidianidad, apareciendo en este punto las grandes luces y la expresión volumétrica donde antaño se encontraba el ornamento y la ostentación, como en el caso del Edificio Chrysler

(1928-1930) (Figura 156), que dio una imagen y un prestigio a una marca automovilística, la Chrysler Corporation nacida en 1925. En este caso la ostentación del ornamento y la altura de la edificación, fueron los puntos que permitieron a esta obra convertirse en imagen y representación de la marca. Hoy el reto gravitatorio, la imagen ingravida y el desafío a la percepción de equilibrio, se han convertido en las herramientas más efectivas para la representación de este tipo de entidades.

Como se ha hecho mención anteriormente, éste no es un hecho nuevo, sino que desde hace siglos las catedrales han empleado estos medios para materializar la firmeza y poder de unas creencias, plasmadas en las piedras de los templos, erigidos, altos en busca de dios, dejando entrar su gracia a través de los ventanales que permiten que la luz bañe el interior, tamizada por el trabajo de las vidrieras, generando un ambiente capaz de infundir sensaciones y servir de imagen a un culto. Las catedrales, tanto desde su conformación exterior, como de su espacialidad, han sido un referente, tanto de la fe, como de las urbes que las erigen siendo a su vez en cierta medida un símbolo de poder. Si bien en el siglo XIX, con la incorporación al panorama constructivo del hierro y posteriormente el acero a la construcción, se produjo una universalización en el uso de las grandes luces, al reducirse su coste, transformándose en una opción funcional ante ciertas problemáticas. Así en el panorama actual, precisamente el énfasis se pone en la presentación atípica y provocadora ante la percepción convencional de las edificaciones, incluyendo las presentaciones más comunes de las grandes luces en la arquitectura de una manera primordialmente pragmática.

El empleo de las grandes luces como medio de representación, suele llevar asociada una concepción transgresora de la percepción gravitatoria de la edificación, retando la apreciación de la estabilidad o la sustentación de los elementos desde el punto de vista visual. Así mismo los medios técnicos dada su relevancia en este ámbito proyectual, son uno de los principales recursos lingüísticos de la edificación, sumados a la concepción volumétrica. La presencia estética de la resolución estructural, va en la línea de una sinceridad constructiva, lo que se enfrenta a la ocultación de estos medios, como forma de sorprender al espectador ante la duda suscitada sobre el sistema resolutivo que permite el reto gravitatorio.

Entendidas las grandes luces como solución estética y de representación, es necesario aclarar varios puntos. Primeramente si la finalidad representativa de la edificación va destinada a un ente comercial o a uno cultural. Así mismo, como se ha comentado, aquellas obras que hacen

Figura 156. Edificio Chrysler, en Nueva York (Estados Unidos), obra de William Van Alen (1928-1930).

de la exaltación técnica, no solo un medio de expresión, sino una finalidad en sí mismo, continúan con los principios de la Arquitectura High Tech, adaptados a los tiempos, mostrando un reflejo de la contemporaneidad técnica y conceptual de la arquitectura. Por último, como se ha comentado, la arquitectura hoy ha sustituido la expresión mediante el ornamento por una volumétrica y en este marco, las formas y los gestos adquieren significación por sí mismos, capaces de transmitir sensaciones o hacer referencias a simbolismos arraigados en la sociedad contemporánea, lo que de por sí permite fijar la obra dentro de su marco temporal²⁷⁹. En su conjunto todas estas líneas de actuación, ya aparezcan de forma aislada o coordinada, establecen la lectura que se hace de la edificación como medio de representación.

²⁷⁹ Anteriormente se ha dicho que la producción arquitectónica de un tiempo y en especial en el ámbito de las arquitecturas de grandes luces, se encuentra condicionada por las limitaciones técnicas del marco temporal en el que se construye la obra, siendo posible que solo unos años antes dicha producción hubiera resultado inviable. Esta afirmación se ve relegada en muchas de las resoluciones formales adoptadas en la actualidad, solo posibles gracias a los medios de cálculo y representación digitales. Pero en un proceso inverso, las formas empleadas y los referentes de éstas, pueden enmarcarse en un tiempo concreto, de forma que en otro marco temporal la lectura de la edificación modifique sus connotaciones o pierda parte de su esencia. Este hecho permite igualmente hablar de contemporaneidad cuando analizamos una obra, así aquellos proyectos que empleasen actualmente, por poner un ejemplo, los ordenes clásicos como en siglos pasados, por más que recurriesen a medios técnicos y espaciales actuales, nos impedirían hablar de la obra en términos de contemporaneidad, ya que se referencia en historicismos, ajenos al panorama técnico, social o ideológico actual.

4.1. Representatividad. Lectura singularizada de la obra como ente simbólico y personificador

A la hora de concebir el proyecto y su imagen ante el mundo, se plantea si ésta está concebida como un medio de aceptación social, una forma de interacción con los usuarios o una vía de representación de un ente o concepto ajeno a la propia esencia de la edificación. Este último punto resulta de especial relevancia, en un marco proyectual como el de las obras que emplean las grandes luces, dadas las connotaciones de la adopción de estos en el panorama arquitectónico. Si bien la figuración ha sido una línea de actuación en la posmodernidad, en la actualidad resulta más fructífera la adopción de formas de representación abstractas, fundamentadas en la búsqueda de la esencia perceptiva y nexos conceptuales más allá de la literalidad visual. Además, este hecho se ve potenciado por los objetos a representar mediante la obra arquitectónica, que difícilmente encuentran un referente visual preciso en el plano material. Como se comentaba anteriormente, al respecto del esfuerzo representativo en torno a los productos de perfumería, la arquitectura intenta dar rostro a conceptos o entidades, que percibimos exclusivamente por sus productos y los objetos que a ella se ven ligados. Éste es el caso de las sedes empresariales, que a través de formas y conceptos intentan plasmar una imagen de marca, que puede estar o no ligada a los productos o publicidad asociados. En cualquier caso la conformación formal está ligada a dicho proceso representativo, sea en el total de la edificación o de forma puntual.

A la hora de la representatividad arquitectónica, es de vital importancia entender a qué entidad está representando, ya que dependiendo de ésta el proyecto puede optar por unas u otras líneas de actuación. Así en grandes rasgos se pueden diferenciar entre aquellas obras con un marcado carácter “comercial”, que intentan confeccionar un icono o imagen de marca y aquellas de carácter “cultural”, que más allá del reflejo de una entidad, plasman unas ideas, creencias o un entendimiento particular del mundo. En este segundo grupo se encontrarían las edificaciones de carácter religioso y todas aquellas que con una finalidad cultural, deportiva... representan una actividad o buscan la atracción hacia un espacio expositivo mediante el establecimiento de una imagen que sirva de foco de atracción. Así obras como el Caixa Forum de Madrid, intentan establecer una llamada de atención a los viandantes mediante un reto gravitatorio, que estable, tanto un punto de atención, como una imagen reconocible que permite identificar este espacio expositivo dentro de la urbe, facilitando el éxito de la intervención. Así dentro de la representatividad de la obra, aparece la necesidad inherente de generar una imagen reconocible, con una clara personalidad, como asimilaríamos a un rostro, que pese a emplear los mismos elementos básicos, podemos reconocerlo, denotando diferentes grados que nos permiten destacar algunos rostros sobre la masa. Precisamente en esta exaltación sobre la masa general de la edificación, se encuentran las herramientas proyectuales de las grandes luces, que ya introducidas en la cotidianidad constructiva, permiten establecer retos gravitatorios y formales, que posibilitan generar un mayor impacto en aquellos que lo contemplan, marcando su experiencia de la obra, asociando una imagen arquitectónica, con un centro en concreto, una idea, marca...

Vivimos en un tiempo donde la imagen ha adquirido una especial relevancia, en la mayor parte de los casos el conocimiento de las obras no se produce ya mediante la experiencia directa, sino a través de su imagen, que se transmite por televisión, fotografía o medios digitales, permitiendo una difusión masiva de una imagen que antes resultaría infinitamente más limitada. Este punto de vista orienta la producción arquitectónica de iconos a formas personalistas y claramente reconocibles, como ocurre en la actualidad con personajes como Frank Owen Gehry, cuya producción arquitectónica comparte un entendimiento muy personal del gesto y la libertad formal otorgada por los medios de representación digital. Este hecho es aprovechado para generar iconos como en el caso del Museo Guggenheim de Bilbao, cuya imagen es reconocida a escala mundial, sirviendo de representación, tanto del espacio expositivo que conforma, como de la urbe en la que se emplaza. Este poder expresivo y los medios actuales de difusión, impulsan a ejercer un esfuerzo en los márgenes de lo experimental, buscando nuevos modelos y estéticas que permitan un reconocimiento directo como el del Museo Guggenheim. En obras como esa se percibe la capacidad proyectual para representar incluso a una ciudad en su conjunto, quien puede dudarlo con iconos como la Ópera de Sídney, obra de Jørn Utzon, que supuso en su momento un reto para la técnica y para la economía de la ciudad, pero que la perspectiva del tiempo permite entender como una obra maestra, con suficiente personalidad y presencia para su reconocimiento indudable en cualquier lugar.

Si hace siglos el poder lo representaba el ornamento y la calidad de los materiales, desde el siglo XIX este papel lo toma la edificación en altura, siendo representación indiscutible del poder de las grandes marcas y aunque actualmente esa interpretación se mantiene, las grandes luces han tomado dicho papel en otros ámbitos proyectuales, donde las soluciones en altura no son la mejor línea de actuación. Así es necesario especificar las particularidades del esfuerzo representativo de los dos principales grupos objeto de interpretación:

- Cultural

Uno de los fenómenos arquitectónicos más remotos, es la arquitectura como medio de representación de un conjunto de creencias o una estructura política o de poder. Con esas herramientas se ha organizado la humanidad desde sus orígenes. Palacios templos, fortalezas, han sido símbolos dentro de la estructura social que han permitido configurar una estructura social desde la transformación arquitectónica del entorno. Dentro de este tipo de elementos de especial significación, las grandes luces han estado presentes, no solo desde el ámbito funcional de generar grandes espacios, sino como una herramienta espacial capaz de representar poder y suscitar un sobrecogimiento en los usuarios. Este efecto ha sido explotado hasta la saciedad a lo largo de los siglos, siendo en el caso de las catedrales un factor clave, muestra de la importancia de la urbe y la sede que ostenta esa edificación. Ya se ha visto como la arquitectura gótica, mediante la racionalización de las formas, permitió optimizar el uso del material, al tiempo que se realizaban obras cada vez más sorprendentes, retándose unas urbes con otras, como en el caso de Siena y Florencia por superarse dimensional y expresivamente en dichas obras.

Durante los dos últimos siglos, gracias al conjunto de avances que se han producido, las soluciones de grandes luces han dejado de ser exclusivas del poder religioso, político o económico, para convertirse en una opción funcional. Así su adopción ha pasado de un alarde, a una respuesta lógica a una problemática social. Esta universalización si bien ha reducido su impacto, dada la aceptación por la sociedad de los estándares dimensionales y expresivos empleados por estos medios, no ha minorado su impacto visual cuando el diseño se enfoca en la exaltación de dicho gesto. Ejemplo de ello son las franjas de luz que se organizan en el apoyo de algunas cubiertas, como medio para, desde el interior, entender desmaterializado el apoyo, potenciando la interpretación ingravida de la cubierta, como veíamos anteriormente en la Iglesia de Durazno de Eladio Dieste.

Otro efecto acontecido durante los dos últimos siglos, que ha modificado radicalmente las pautas expresivas de este tipo de proyectos, es la expresión externa de las grandes luces, ya que antaño éstas se centraban exclusivamente como medio de generación espacial. Así hoy aparece la conformación volumétrica por estos medios, como una nueva línea de expresión. Por lo tanto se puede diferenciar entre actuaciones internas y externas, como ya hemos visto anteriormente.

Desde el punto de vista de la espacialidad, actualmente la expresión se centra en una interpretación gravitatoria, así en proyectos como los vistos, que conforman un firmamento artificial o un microcosmos, se produce más un reflejo de un entendimiento de un entorno ideal, que de una entidad en sí misma. El uso de la luz, en este tipo de espacios, siempre ha tenido un trasfondo expresivo, que los templos religiosos continúan empleando como abstracción de la gracia divina. Un gran ejemplo de este tipo de concepción es la catedral de Nuestra Señora de los Ángeles (Estados Unidos) (Figura 157), obra de Rafael Moneo, en la que se configura una gran sala en el interior, donde las matizaciones y el establecimiento de focos de interés se produce mediante la luz. En el caso de los edificios eclesiásticos, la expresión se produce de forma casi

exclusiva en términos espaciales, desdeñando la representación volumétrica mediante las grandes luces. Esto no solo se produce por la necesidad funcional de conformar grandes espacios, sino por las intenciones proyectuales de suscitar un estado emocional propicio, en definitiva permitir *“un estado del alma que nos acerque a la percepción de dios y sus enseñanzas”*. Este tipo de escenificación es resultado de siglos, aunque las condiciones actuales han permitido ampliar los modos en que se materializa dicho efecto.

Por su parte, hoy en buena medida el éxito de multitud de edificaciones, como es el caso de los edificios expositivos, depende de la afluencia de visitantes, lo que no solo está condicionado por el continente de la edificación, sino que así mismo, el diseño proyectual puede suponer un factor de atracción, que incida sobre el éxito de la intervención. Ya se ha mencionado como el Museo Guggenheim de Bilbao ha repercutido, incluso sobre la imagen de la propia ciudad, constituyendo un foco de atracción. Con el empleo de herramientas de grandes luces, vemos como a menor escala el Caixa Forum de Madrid, obra de Herzog & De Meuron, logra confeccionar en el principal eje de la ciudad, un foco de atracción que sorprende al viandante, que ante la sorpresa, se acerca gracias a la imagen de la edificación, introduciéndose en ella, tanto por el material expuesto, como por los muros en que se exponen. Así mismo se conforma

Figura 157. Catedral de Nuestra Señora de los Ángeles (Estados Unidos), obra de Rafael Moneo (1998-2002).

como un icono reconocible, tanto para la difusión mediática de la imagen²⁸⁰ y el reconocimiento del centro expositivo, como dentro de la urbe. Así, un espacio de carácter social y cultural, encuentra su imagen mediante estos medios, aunque al unísono la Caixa se vea representada en cierto grado (Figura 158).

Este tipo de percepción representativa de la obra arquitectónica, mediante las herramientas proyectuales de las grandes luces, se puede encontrar en proyectos sumamente diversos. Ejemplo de ello es el mercado de Santa Caterina (Figura 159), una obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue (1997-2005), que busca sustituir al antiguo mercado, reemplazando la vieja edificación por otra propia de nuestros tiempos, tanto desde el punto de vista técnico, como expresivo, buscando ser un elemento de regeneración urbana para el barrio. Por su parte la forma ondulada de la cubierta, que recordaría las olas del cercano mar, se caracteriza por las piezas cerámicas, que le dan su

Figura 158. Caixa Forum de Madrid (España), obra de Herzog & De Meuron (2002).

²⁸⁰ En el Caso del Caixa Forum de Madrid, aunque su finalidad es la conformación de un centro expositivo, se ve claramente como la entidad que ha hecho posible su materialización, La Caixa, no solo aparece en el nombre, sino que la imagen de la firma se ve enaltecida por la obra arquitectónica, como símbolo representativo de ésta, pese a que su finalidad sea otra. Así una entidad bancaria, puede expresar su interés por los fines sociales mediante una edificación que simbolice este hecho. El edificio es un icono de la compañía, aunque solo la represente parcialmente.

colorido característico²⁸¹, confeccionando un nuevo tapiz para la plaza. Este nuevo firme, lleno de color, es un gesto hacia las edificaciones circundantes y la percepción del barrio. En esta obra las grandes luces juegan su papel desde dos puntos de vista diferentes. Desde el exterior la cubierta vuela sobre la acera, cubriendo los muros restaurados del viejo mercado, dando a entender un respeto por la historia y el deseo de ligarse a ella. Así mismo la solución permite generar un espacio interior, que asumiendo las referencias tradicionales, enaltece la imagen del mercado mediante la expresión arquitectónica. En el caso de esta obra, no es tanto el esfuerzo representativo, como el deseo de realizar un aporte al barrio y dignificar este tipo de mercado que actualmente está casi en vías de desaparecer, frente a las grandes superficies que han proliferado durante estas últimas décadas, marcando el final de miles de negocios. Así la obra se establece como una protesta y una reivindicación de este tipo de comercio, un mensaje que manda el proyecto entre líneas, para aquel que se molesta en leer lo que la arquitectura tiene que contar, al tiempo que en el subconsciente de los usuarios sus repercusiones resultan palpables.

Este tipo de expresión “cultural”, en definitiva es la defensa de unos ideales a través de

Figura 159. Mercado de Santa Caterina de Barcelona (España), obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue (1997-2005).

²⁸¹ El colorido mosaico que define el exterior de la cubierta, es obra de Antoni Cumella i Serret, un artista y profesional de la cerámica que defiende los procesos artesanales frente a la producción seriada. Este hecho en sí mismo resulta congruente con el espíritu del mercado y sus productos, frente a las grandes superficies, que carecen de la cercanía al barrio de estos pequeños comercios locales.

la expresión arquitectónica y por lo que en el presente estudio nos atañe, centrado en el empleo de soluciones de grandes luces, como medio para conseguir el énfasis arquitectónico y suscitar el impacto deseado, al tiempo que logra la relación psicológica deseada desde las intenciones que dan origen al proyecto. Como ya se ha dicho, el acto proyectual es un proceso complejo, en el que intervienen múltiples factores y actores, en el que las reacciones del usuario y las acciones sobre éste son la clave para el funcionamiento del proyecto, más allá de la pragmática respuesta funcional a una problemática previa. Así se pone en valor, tanto lo que el hombre *“hace”* en el edificio, como lo que *“siente”*.

Esta expresión arquitectónica se encuentra enlazada prioritariamente a los espacios y volúmenes, más allá de la configuración técnica concreta, aunque como parte de la gramática edificatoria, dicha elección juega un papel en la lectura del proyecto. Por lo tanto este tipo de interpretación de la obra, se encuentra en todas las tipologías estudiadas, tanto desde la concepción exterior, como interior. Esta visión del proyecto se encuentra claramente relacionada con una necesidad expresiva de origen, que condiciona todo el proceso de concepción de la obra, considerándose sobremanera el impacto de la actuación sobre los usuarios, como medio de influencia sobre estos. Así las herramientas proyectuales, explicadas con anterioridad, se ven implantadas por una motivación más allá de la propia conformación funcional de los espacios como respuesta a una problemática directa. La necesidad de expresión de la edificación es en sí mismo una visión funcional de ésta, aunque en términos más abstractos. Así se emplea la interpretación que el hombre realiza del medio, como vía para la confección de proyectos comunicativos, capaces de responder al trasfondo social, mediante las formas, los espacios y la técnica, más allá de las concepciones ornamentales del pasado, que aún hoy trasciende en la lectura que se hace de la ciudad. El hombre escribe páginas de su historia en la edificación, aún sin la consciencia de que así fuera²⁸², confeccionando una lectura contemporánea, que algún día será fiel reflejo del camino seguido, tanto en la edificación, como en el conjunto de la sociedad.

²⁸² Precisamente en el presente punto se hace referencia a los proyectos que actúan desde la consciencia de la funcionalidad expresiva de la edificación, con un objetivo claramente establecido desde las premisas que dan origen a la labor proyectual.

- Comercial

Durante los últimos años, varias grandes empresas han optado por centralizar sus oficinas en un único complejo, erigiendo nuevas sedes, que como se ha mencionado, han de servir de representación material de sus actividades y valores, al tiempo que imagen de su poder, plasmado en formas que mediante las fotografías y los videos, permitan su difusión global. Así se pasa de una expresión arquitectónica de las diferentes creencias y credos²⁸³, en las líneas en que históricamente se han desarrollado, a emplear estos medios, para la exaltación arquitectónica de las nuevas entidades que dan forma al panorama actual. Así el ámbito empresarial se convierte desde hace más de un siglo, en el principal consumidor de arquitectura representativa. Quién no recuerda ejemplos tan ilustrativos como la Fábrica de Turbinas AEG (1908-1910) de Peter Behrens (Figura 160) o la Fábrica Fagus (1911-1913), obra de Walter Gropius (Figura 161) y Adolf Meyer, ambos materialización del deseo de que la arquitectura

Figura 160. Fábrica de Turbinas AEG, en Berlín (Alemania), obra de Peter Behrens (1908-1910).

Figura 161. Fábrica Fagus, en Baja Sajonia (Alemania), obra de Walter Gropius (1911-1913).

²⁸³ En el punto anterior queda patente cómo la expresión de aquellas arquitecturas enlazadas a elementos culturales o religiosos, requieren en su mayor parte un conocimiento directo, por lo que la labor proyectual se centra en la confección de una “*experiencia*”, que incida sobre el usuario. Por su parte, en el caso de las compañías, la obra actúa como elemento de difusión, centrando su interés en generar una imagen, desligada en muchas ocasiones del conocimiento directo de la obra. Este hecho rige la generalidad de las actuaciones, aunque el conocimiento cercano y distante del proyecto, son factores que en este tipo de obra actúan al unísono, como parte de las consideraciones proyectuales.

empresarial y en este caso fabril, adquiriera expresión propia y una dignificación de la que hasta ese momento carecían. Si se habla del ámbito fabril, aparece al unísono la necesidad de confeccionar espacios pragmáticos y funcionales, que den respuesta a la actividad productiva. Al tiempo, en muchas de estas construcciones aparece una necesidad expresiva, lo que transforma radicalmente las consideraciones adoptadas en la definición proyectual. Ejemplos aún más ilustrativos de este tema, son las edificaciones fabriles realizadas por Eduardo Torroja, que en este caso conciben plenamente la edificación desde las herramientas proyectuales de las grandes luces, ya que como el expresa *“... el tiempo empleado en la concepción y tanteo de nuevas soluciones es el más útil de todos para la formación del individuo, y el que ha de permitirle, después, enjuiciar los nuevos problemas que se le planteen, con mucha más soltura y probabilidades de éxito”*²⁸⁴. Un reflejo, tanto del interés científico sobre el progreso edificatorio, como una percepción de las potencialidades inherentes en éste, para concebir el mundo en unos nuevos términos, como su obra expresa, confeccionando naves en las cuales la resolución técnica tiene una clara trascendencia expresiva, aunque los intereses de Torroja difieren sobremanera de este tipo de percepción de la arquitectura.

Durante el último siglo las empresas, desde los centros de producción hasta sus sedes, han buscado su expresión en el plano físico a través de la arquitectura. *“Por lo general, una arquitectura de empresa se desarrolla porque las personas clave (stakeholders) tienen preocupaciones que deben ser abordadas por los sistemas de negocio y de TI dentro de la organización...”*

...El papel del arquitecto es hacer frente a estas preocupaciones, mediante la identificación y el perfeccionamiento de los requisitos que tienen los interesados, desarrollando vistas de la arquitectura que muestran cómo sus preocupaciones y necesidades van a ser abordadas, y mostrando las ventajas y desventajas que habrán de ser tratadas al realizar la conciliación de los intereses potencialmente conflictivos de los diferentes grupos de interés.

*Sin la arquitectura, es poco probable que todas las inquietudes y necesidades sean consideradas y cumplidas”*²⁸⁵. Así claramente desde el ámbito empresarial, la representación se entiende como una función práctica y necesaria para el funcionamiento en términos sociales de las empresas, cuya imagen se confecciona como un collage de imágenes publicitarias, productos e intenciones, que encuentran en la arquitectura un reflejo menos efímero de su presencia, adquiriendo la permanencia y firmeza que la producción arquitectónica ha llevado asociada a lo largo de la historia.

²⁸⁴ TORROJA MIRET, Eduardo, *“Razón y Ser de los Tipos Estructurales”*, Madrid, Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento, 1957, p. 357.

²⁸⁵ Esta afirmación está realizada por Open Group – ArchiMate en 2013.

De la arquitectura empresarial solo un mínimo porcentaje lleva asociada esta necesidad expresiva, primando otros factores funcionales y económicos. De forma especialmente reseñable durante los últimos años, un buen número de empresas han decidido concentrar las distintas edificaciones administrativas que tenían distribuidas por las urbes, en una única edificación. Mediante la concentración de sus actividades buscan, tanto reducir los costes operativos, como otorgar la oportunidad de expresar visualmente la relevancia de la empresa. El proyecto actúa como símbolo de poder, así como medio de transmisión de los intereses que ésta quiere hacer partícipes de su imagen pública. Así grandes empresas deciden representarse a través de la arquitectura, eligiendo altas torres o edificios de grandes luces, en ambos casos formas resistentes que desafían la percepción monótona de la ciudad, simbolizando el poder y el reto ante las limitaciones a las que se ve sometida la producción del hombre. Las torres, han sido y son, un ámbito proyectual en el que los límites dimensionales constantemente se ponen en tela de juicio. El World Trade Center (1 y 2) (1975-1985) (Figura 162), ha sido un símbolo a nivel mundial de una época y del ámbito financiero, sin representar a ninguna entidad en concreto. Hoy el Burj Khalifa (2004-2010) (Figura 163), el rascacielos más alto del mundo, erigido en los Emiratos Árabes Unidos, diseñado por el arquitecto Adrian Smith para el estudio Skidmore, Owings & Merrill, con sus 830 metros de altura hasta la cúspide de la antena y sus 163 plantas²⁸⁶, simboliza el poder de un país y su economía, así como el deseo de éste de buscar nuevas vías para el desarrollo económico, más allá de la industria del petróleo, que actualmente mueve su economía. Estas obras, junto con todas aquellas que han retado los límites dimensionales en altura²⁸⁷, han

Figura 162. El World Trade Center, en Nueva York (Estados Unidos), obra de Minoru Yamasaki, Emery Roth & Sons y los ingenieros Leslie Robertson y Leslie E. Robertson Associates (1975-1985).

Figura 163. Burj Khalifa, en Dubái (Emiratos Árabes Unidos), obra de Adrian Smith para el estudio Skidmore, Owings & Merrill (2004-2010).

²⁸⁶ La torre Burj Khalifa (برج خليفة), tiene 163 plantas útiles sobre rasante, disponiendo de otras 46 de servicio y dos subterráneos de aparcamiento, en total 211 pisos.

²⁸⁷ La producción de torres en los límites de lo considerado posible, se ha producido de forma casi continua, dibujando un panorama del territorio experimentado por la edificación y por consiguiente posible. Si quisiéramos enumerar algunas de las obras más reseñables en estos márgenes, desde la citada construcción del World Trade Center (526 m), se encuentran: la Torre Jin Mao (421 m), Trump

conformado una imagen global, que sirve de base expresiva para el establecimiento de cualquier imagen ligada a la construcción en altura, aunque las obras no alcancen los sorprendentes márgenes dimensionales expuestos. De forma análoga, el panorama de las grandes luces, tanto en el ámbito arquitectónico, como en la ingeniería civil, ha generado una visión del “reto” de la producción del hombre frente a las limitaciones que le vienen impuestas. Este referente, aun en proyectos de dimensiones contenidas, busca mantener en todo momento esa referencia visual, para lograr confeccionar una imagen impactante y en cierto grado trascendente. En este ámbito proyectual se busca ante todo la generación de una imagen claramente reconocible, reflejando un rostro único, capaz de suscitar el interés de la gente.

En Madrid encontramos un buen compendio de empresas que han optado, en los últimos tiempos, por construir sus sedes centrales, concentrando actividades y expresión. Los ejemplos más relevantes son: Endesa, Telefónica y el BBVA. Las dos primeras optan por soluciones relacionadas con las grandes luces, mientras que la última actúa mediante la conformación de un cuerpo bajo y una torre representativa que se erige desde el centro del complejo, siendo una solución de las comentadas anteriormente al hablar de las connotaciones relativas a la edificación en altura.

De la sede de Endesa en Madrid (Figura 164) hemos hablado varias veces y queda claro el gesto, tanto del gran voladizo que remata uno de los extremos de la edificación, otorgándole expresión a la autovía, como de la cubierta que parece levitar sobre los volúmenes de las oficinas, al tiempo que oculta la tramoya de las instalaciones emplazadas en la cubierta, algo relevante para un proyecto cercano a un aeropuerto y cuya visión aérea es objeto de reflexión. A los grandes gestos y las herramientas de proyectación propias de las grandes luces, se le suma la imagen técnica, que se emplea, tanto para mostrar su interés por el medio ambiente y la sostenibilidad, así como para incorporar este tipo de referentes visuales a la imagen final. En el gran voladizo se emplea una estética similar a la de los puentes, dejando el hormigón armado visto al exterior, enlazando perceptivamente referentes de arquitectura e ingeniería civil. Este hecho modifica la percepción de la obra, añadiendo las complejidades de este ámbito mediante un solo gesto, como parte del rostro arquitectónico de la empresa a la que representa. La obra encarna así, tanto intereses y preocupaciones, como un carácter, que difícilmente pueden explicar las palabras, más claramente que la lectura reflexiva de los gestos. Proyectos como éste, dan fe de la complejidad de la actividad en el estudio y la dificultad de la problemática inherente a los proyectos con una marcada función representativa. Estos proyectos mediante las concisas líneas de la respuesta material, deben dar medida contestación, que cumpla, tanto los objetivos funcionales, como representativos.

International Hotel and Tower (423 m), 432 Park Avenue (426 m), Marina 101 (427 m), Wuhan Center (438 m), Guangzhou International Finance Center (439 m), Kingkey 100 (442 m), Torre Willis, antigua “Sears Tower” (527 m), Torre Zifeng (450 m), Torres Petronas (452 m), International Commerce Centre (484 m), Shanghai World Financial Center (494 m), Taipei 101 (508), Chow Tai Fook Centre (530 m), One World Trade Center (546 m), Goldin Finance 117 (597 m), Ping An Finance Center (599 m), Torres Abraj Al Bait (601 m), Torre de Shanghái (632 m) y finalmente la Torre Burj Khalifa (830 m).

En ese proyecto se ve claramente, como la adopción de una solución de grandes luces, ha estado motivada por un deseo de representación, carente de otro tipo de justificación capaz de motivar tal alarde. Si bien, como se ha explicado con anterioridad, el gesto empleado no tiene por que encontrarse en las cercanías de los límites técnicos, sí en aquel margen, que asociativamente permite que lo entendamos en dichos términos. Este hecho potencia el impacto de la intervención, imponiendo un énfasis dentro de la imagen global, al tiempo que permite captar más eficientemente la atención de los viandantes y usuarios. Estos perciben la edificación como algo especial, que según las premisas proyectuales terminará enlazado con la imagen comercial defendida. Es imprescindible diferenciar la respuesta funcional, de la sensitiva, como dos caras de la misma moneda arquitectónica.

De forma pareja, en la nueva sede de Telefónica en Madrid, el “*Distrito Telefónica*”, un proyecto de Rafael de la Hoz (2004-2008) (Figura 165), se emplean las grandes luces como medio de representación. En este caso la envergadura de este proyecto deja claro, incluso desde su denominación como “*distrito*”, la intención de hacer ciudad, en un intento de transmitir una imagen de rotundidad y firmeza, propia de la marca, mediante un complejo pensado como conglomerado de los recursos anteriormente dispersos de la firma. Esta concentración lleva asociada una magnitud tal, que exige la incorporación de una serie de recursos adicionales. Ante dicha problemática el proyecto responde con una serie de servicios auxiliares, tales como: policlínica, bancos, farmacias, comercios... Así los 14.000 usuarios, que suele haber en este complejo, encuentran cuanto pudieran

Figura 164. Sede de Endesa, Madrid (2003), obra de Rafael de La-Hoz Castanyes (2003).

necesitar de la ciudad dentro del propio edificio. Esta concentración de las actividades de Telefónica, supone un considerable ahorro, frente a un sistema disperso como el que anteriormente tenía, por esta misma razón muchas empresas han optado por este tipo de proyectos, que van en la línea de la reducción de costes.

En el interior de este edificio, se integran los servicios que se considera que podrían necesitar de la ciudad. Por una parte este hecho lleva inexorablemente asociada una forma de entender la ciudad, así como un aparente desligamiento del resto de la urbe, configurándose como un ente exento. Este hecho resulta obvio cuando vemos su emplazamiento entre grandes vías de circulación, sin un tejido urbano del que pueda depender. Desde este punto de vista de ente cerrado, se opta por un esquema perimetral, que logra definir un gran espacio interior, en el que las zonas verdes,

Figura 165. Distrito Telefónica, Madrid (España), obra de Rafael de la Hoz (2008-2011).

ordenadas con patrones geométricos, generan la imagen de lo que Rafael de La-Hoz entiende que debe ser la urbe, ya que desde este espacio, cuantas referencias visuales hay pertenecen al propio proyecto, lo que permite un control completo de los nexos visuales. Este hecho hace posible entender el proyecto desde un punto de vista interior, mostrando una interpretación particular de cómo hacer ciudad. Mientras desde el exterior el conjunto se establece como un hito, que destaca en el territorio, percibido desde las múltiples autopistas que lo circundan. Este emplazamiento entre grandes vías de circulación, primeramente le impone un aislamiento de los tejidos urbanos circundantes, orientando a un funcionamiento autónomo de la intervención, al tiempo que permite una mayor difusión directa de la imagen, por el amplio número de personas que pasan ante la edificación continuamente.

Desde la misma elección del lugar, se plasma el deseo de mostrar una nueva forma de hacer ciudad. Pero frente a las problemáticas habitacionales desarrolladas en la urbe, este complejo se centra de forma exclusiva en las necesidades propias a un centro empresarial de esta envergadura y los requerimientos asociados al desarrollo de sus actividades.

Compositivamente, en este complejo destacan las cuatro torres prismáticas dispuestas en las esquinas, que definen el ámbito de actuación y la inmensa cubierta que sobrevuela el resto de las edificaciones, otorgándole una unidad perceptiva a los volúmenes limitativos del recinto, definiendo el perímetro y las referencias visuales para el patio interior ajardinado. Los prismas de los vértices, transmiten estabilidad y firmeza, al tiempo que conforman puntos de referencia. Por su parte, las grandes luces hacen acto de presencia en la conformación de la cubierta unificadora de los volúmenes perimetrales, la rotundidad de este elemento, incluso desde la elección del color (negro), permite su imposición sobre las formas que cobija. La línea perimetral definida por la cubierta, se quiebra en altura, para no definir un plano de cubierta único, así mismo en esos puntos de especial tensión se evita la presencia de soportes, en un intento de transmitir una mayor ingravidez del elemento suspendido. Los soportes de la cubierta, se encuentran retranqueados respecto al perímetro un módulo, de los seis que componen el ancho total, siendo de reducida entidad en comparación con el plano definido por la cubierta. Al tiempo, cuando estos se encuentran sobre una edificación y gracias a su color negro, se disimulan entre las sombras proyectadas por la cubierta, de esta forma perceptivamente pierden entidad frente al plano elevado, lo que permite entender éste, como un volumen suspendido. El plano de cubierta está formado por una malla de vigas metálicas de gran canto, apoyándose únicamente en algunos de los nudos. Esta cuadrícula se colmata con paneles perforados de chapa y en la cara superior placas solares, que denotan, tanto el interés de este edificio por el medio ambiente, como la posibilidad de que este tipo de elementos se integren en el diseño del proyecto, aunque esto claramente suponga un detrimento de la eficiencia de las placas solares.

Por su parte, las cuatro torres se emplazan fuera del perímetro, entendidas como entes exentos, que definen los límites de la manzana, más allá del recinto interior comentado. Este hecho supone la definición de un segundo plano perceptivo desde el interior, regulando la imagen que se tiene del exterior, generando la ilusión de que la

intervención pudiera continuar expandiéndose más allá del perímetro. Se juega con la percepción espacial para aumentar el impacto visual de la intervención concebida desde el interior. Este área de negocios no busca solo difundir una imagen mediática, sino generar un ambiente propicio, que permita transmitir su influencia sobre el mundo y en cierta forma su poder. Una carta de presentación que más allá de la fachada, busca acercarse a las personas, mostrando cuanto hay detrás de una gran firma como Telefónica, preocupaciones e intereses ligados a la actividad de la gente y su modo de entender el mundo actual, indisolublemente relacionado con los medios de comunicación.

El esfuerzo por aplicar las grades luces en el proyecto, se centra como se ha visto, en la cubierta del conjunto, aunque a su vez los volúmenes, bajo ella cobijados, también se encuentran diseñados con grandes voladizos y grandes luces, que hacen comprender que forman parte de un todo que se regula por unas estrictas reglas de diseño y un esfuerzo por mostrar lo que una ciudad puede ser y el modo de vida que una empresa como Telefónica puede ofrecer a sus empleados. El proyecto configura un pequeño cosmos congruente, que ofrece una nueva interpretación de la ciudad, enlazando esta visión de futuro, con el propio espíritu de la compañía que se ve representada. Este ejemplo, no es el primero ni el último de empresas que buscan otorgar una calidad de vida superior a sus empleados, lo que redundará en un sentimiento de unidad y protección, que hacen de la empresa el ente social que permite su permanencia en el tiempo.

En este proyecto, la cubierta permite entender el perímetro como una unidad, en lugar de como una suma de volúmenes. Este hecho otorga una mayor rotundidad a su visión desde el aire, al unísono que se entienden los límites de la intervención como algo etéreo, materializados por una sombra y una sensación de cobijo, algo suficiente para percibir el tránsito al interior del proyecto. El otro aspecto vital de esta obra, es el factor icónico que lleva asociada esta intervención, al ser el buque insignia de una gran compañía, transmitiendo al exterior una imagen de firmeza y cobijo, como valores a defender por la empresa. Como ya hemos visto, este tipo de proyección representativa de la empresa a la que dan rostro, va más allá de la mera conformación visual, para hacer suyas nociones que permitan un entendimiento de conceptos complejos, asociados a la conformación constructiva de la edificación. Por términos generales este hecho está relacionado con la lectura de las formas y referentes visuales, ya comentados, como los relativos a la resolución técnica, que inevitablemente llevan asociadas connotaciones de las que se hace un uso expresivo. La intervención se convierte en un icono y un manifiesto, que dan respaldo al ente que motivó su realización.

Como se ha visto, hoy los proyectos encargados de representar a las empresas y reflejar el poder de las mismas, ya no optan por el ornamento y la ostentación, sino por la escenificación arquitectónica, enfocada en la transmisión perceptiva de los conceptos que se desean relacionar con dicha entidad. La arquitectura siempre ha sido un medio de expresión, relacionado con un concepto de permanencia y cierta atemporalidad, un hecho que hace inevitable el interés de las empresas por verse reflejadas en este

soporte, más allá de su empleo funcional. Este entendimiento de la problemática proyectual, engloba un amplio rango de obras, que en mayor o menor escala emplean las grandes luces y las herramientas de diseño espacial asociadas, como medio de expresión, como respuesta funcional a un requerimiento, que inmaterial, resulta vital para la integración social de dichos organismos y su éxito empresarial, más allá de los productos relacionados a ellos.

Esta idealización de la imagen de una marca, se ve claramente materializada en proyectos como los de las múltiples bodegas realizadas durante los últimos años. Estos edificios ya no son edificaciones puramente fabriles, ya que responden a la necesidad de una imagen de marca, lo que incluso da lugar a la conformación de espacios expositivos, que hagan alarde del producto y el proceso de producción del vino, como puesta en valor de la firma.

En estos proyectos, la problemática se centra claramente en la definición de una imagen de marca. Al igual que se ha comentado, el hecho de intentar reflejar un ideal, no siempre tiene una respuesta proyectual directa, apareciendo consideraciones en muchos casos ajenas, pero que en conjunto logran definir no solo volúmenes y espacios, sino una imagen claramente reconocible y diferenciable. La edificación en estos casos adquiere una condición pictórica, de una forma abstracta relacionada con el producto. La obra principalmente adquiere su difusión mediática mediante la fotografía, un hecho que potencia esta interpretación escenográfica, que puede englobar a toda la edificación en su conjunto o concentrarse de forma puntual. En este segundo caso, el matiz representativo, con una menor repercusión en el conjunto, busca asumir la función icónica de la edificación, centrando la realización del resto del proyecto en consideraciones prioritariamente funcionales.

Los proyectos de bodegas, durante los últimos años, se han conformado como un compendio edificatorio, en los que al existir una mayor libertad de actuación, se tiende en mayor medida al alarde formal, en busca de una diferenciación y promoción de la marca, que como en el caso de los perfumes, antes que un producto vende una imagen. En España se encuentran un buen número de bodegas que han optado por este sistema representativo y de puesta en valor. Un ejemplo de ello son las Bodegas Ysios (Figura 166), obra de Santiago Calatrava, en las que a través del desplazamiento de las vigas de cubierta, verticalmente en ambos sentidos alternativamente, se configura una techumbre ondulante, que nos recuerda el viento que mece las vides en los cultivos que rodean el edificio, acrecentándose esta ondulación en el espacio central de acceso, disponiendo un mirador que permite contemplar la finca. Un proyecto realizado con una concepción sencilla y atractiva para el visitante, aunque precisamente su carácter icónico hace que su atención se centre en la fachada enfrentada al pueblo, mientras que el acceso real desde los vehículos queda en uno de los extremos, concebido como algo secundario, pese a encontrarse precisamente destinado para su contemplación por los visitantes. En este proyecto la sencillez de las líneas que lo definen, son las que permiten que su imagen se plasme en la mente de los que lo conocen, quedando otros aspectos ocultos tras esta representación comercial. En este proyecto, antes que cualquier aspecto dimensional, materiales... se hace patente la potencia expresiva de la forma,

tanto desde el punto de vista volumétrico, como espacial, ya que ambas visiones conforman la experiencia vital del visitante y la imagen que estos llevarán consigo de la marca, como medio de difusión directa.

El proyecto, como objeto de referencia relacionado con una marca o producto, es algo que encontramos constantemente en nuestro entorno y en una sociedad basada en el consumo, es vital para la interpretación del tejido arquitectónico que define la vida en sociedad. Así mismo, como se ha hecho mención, en este contexto las grandes luces actúan como sistema de representación y herramienta proyectual, clave para la confección de aquellas obras comunicativas, propias de la contemporaneidad.

A lo largo de esta enumeración de las tipologías proyectuales basadas en el empleo de grandes luces, se percibe la rica variedad de gérmenes de ideación que dan como fruto los edificios que habitamos cada día. Esta taxonomía ayuda a entrever los puntos de partida, prioridades y proceso de la concepción de los edificios de grandes luces. Estos recursos técnicos, ya no son algo excepcional, sino una herramienta a emplear de forma cotidiana, conformando un campo de actuación más rico, para aquellos arquitectos que sean conscientes de estos hechos. Además se perciben en algunos de los proyectos, atisbos de las líneas de actuación de la arquitectura de los próximos años, ya que al llevar la técnica en muchos casos al límite, se opta por nuevos procedimientos, que ensayan sistemas constructivos que en unas décadas podrían pasar a concebirse como habituales.

Cuando observamos un edificio, nuestra mente intuitivamente intenta leerlo conforme a unas pautas lógicas, buscando primeramente un origen general, que permita encajar las piezas, pero hay proyectos en los que deliberadamente se genera un aparente caos, al no reconocerse las leyes generadoras de la configuración general del proyecto. Pero *“... cuando un arquitecto decide emplear formas muy complejas que son difíciles de reconocer, no es probable que lo haga con el propósito de que el visitante se pierda en*

Figura 166. Bodegas Ysios, Álava (España), obra de Santiago Calatrava (2001).

un laberinto. Más bien organiza su edificio de tal manera que su estructura básica es potencialmente visible, pero ha de ser liberada de la maraña de elaboraciones”²⁸⁸. Este tipo de proyectos, se encuentran enfocados claramente a la configuración de una imagen aparentemente cambiante, pero apta para generar una entidad que le confiera una capacidad icónica y representativa, pese a que resulte imposible establecer una base asociativa entre el proyecto y el objeto o actividad, que representa dicho icono. Este hecho suscita un interesante tema de debate, respecto a si en estas situaciones adquiere el objeto representador mayor importancia, que el representado, que queda ligado a una imagen, que pese a serle ajena, goza de una fuerza expresiva que logra hablar en su nombre. Este tipo de expresión, resulta más efectiva y rica que la adopción de modelos de representación literales, en los que mediante un proceso figurativo, se enlaza directamente un objeto físico de representación, con la arquitectura. Un ejemplo claro de esto, se ha visto en los proyectos de bodegas realizados durante las últimas décadas, en los que se intenta recrear la imagen abstracta de un sector agrícola, con una tradición milenaria, que desde hace unos años anhelaba cambiar su imagen y acercar al usuario de sus productos a la realidad productiva, con el fin de promocionarlos y aumentar su prestigio, en un sector económico, donde calidad e imagen resultan fundamentales para su supervivencia. Este punto de vista ha conducido durante los últimos años a multitud de encargos, con un marcado énfasis visual, que busca desesperadamente la generación de nuevos iconos. Los proyectos emplean geometrías que dialogan entre lo natural y dinámico, con lo artificial y rígido, alcanzando el equilibrio capaz de representar un producto, tan valorado en multitud de culturas como es el vino. Tierra y piedra, de la que surge la vida y el fruto que el hombre transforma para lograr el producto valioso, se ven representados por otro elemento surgido de la tierra, la arquitectura, como producto tecnológico, enlazado inexorablemente a su desarrollo social.

Desde el punto de vista expuesto, la arquitectura como medio de expresión enlazado por lo general a la permanencia, es la principal vía de expresión, de creencias y entidades comerciales, entre otros. En la arquitectura y en especial mediante el uso de las herramientas de diseño de las grandes luces, estos ámbitos encuentran reflejo material en la sociedad, los frutos de ésta, tanto desde un punto de vista económico, político y religioso. La expresión está ligada a las herramientas de un tiempo y las grandes luces son las soluciones propias del marco actual, ya que como se ha explicado en repetidas ocasiones, hoy nos encontramos ante un panorama de posibilidades, que ha posicionado a las grandes luces como una herramienta al alcance de la producción arquitectónica cotidiana y no un alarde factible solo por medios extraordinarios. Hoy el acto de representación arquitectónica está plenamente ligado a este tipo resolutivo y por consiguiente ha de ser considerado en tales términos a la hora de la proyectación.

²⁸⁸ ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977, p. 97

4.2. Exaltación técnica. Resolución técnica como medio de expresión visual

Si en el punto anterior nos referíamos a los factores motivacionales del proyecto y al objeto de representación, es momento de exponer los medios empleados en el acto de expresión arquitectónica. Así la arquitectura, actualmente desprovista de la capa ornamental de antaño, basa su dialéctica en factores formales y relativos a su propia construcción, distinguiéndose entre la conformación y los medios de conformación. Por lo que respecta a la forma, puede establecerse, tanto como expresión espacial, como volumétrica, aunque puesto que en buena parte de los proyectos ésta se produce al exterior, suele concentrarse en factores volumétricos. Por su parte el proceso constructivo, que históricamente ha estado oculto tras los acabados de los paramentos, durante los dos últimos siglos ha ido adquiriendo entidad propia, como elemento estético en sí mismo.

La exaltación técnica de la resolución proyectual, tiene su cenit con la aparición en la década de 1970 de un *“estilo arquitectónico”*, el High-Tech, que en un intento de transgredir y superar los ideales de la arquitectura moderna, da una respuesta nueva, en la que la fascinación por la innovación tecnológica del momento se hace estéticamente patente.

Durante la década de 1960 el grupo Archigram y los arquitectos del Movimiento Metabolista (fundado en 1959), inspirados en la tecnología, desarrollan propuestas de arquitecturas hipotéticas, que ponen en tela de juicio los procesos de concepción arquitectónica empleados hasta el momento, planteándose cómo la incorporación de la tecnología en la arquitectura transforma ésta hasta el punto de resultar irreconocible. Ejemplo de ello lo expone Banham en el texto *“A Home is not a House”* en 1965, donde muestra como las necesidades habitacionales del hombre pueden llegar a estar cubiertas por una burbuja de plástico, transparente e hinchable, asociada a un núcleo tecnológico, que conecte la vivienda con el mundo y proporcione las condiciones higrotérmicas necesarias. Este es uno de los ejemplos que ayudaron a transformar la visión que se tenía del mundo y de la arquitectura, como medio para dar respuesta a las necesidades del hombre. La tecnología se percibió como la vía para el desarrollo, no solo de la actividad del hombre, sino de forma pareja de los espacios en los que habita. El High-Tech con esta percepción del panorama arquitectónico, planteó la obra como una respuesta de tecnología punta, haciendo uso de todo avance, para dar una respuesta plenamente contemporánea a toda problemática. Así en un acto de sinceridad, toda esta contemporaneidad resolutive, se muestra sin velos que endulcen su imagen. Estructura e instalaciones pasan a constituirse como elementos estéticos. Estos proyectos muestran una ruptura con las líneas de actuación que venían heredadas del movimiento moderno. Este proceso, a nivel conceptual, supuso un salto similar a la introducción estética de las estructuras metálicas en las estaciones de ferrocarril, que abrieron nuevas vías resolutivas y una estética técnica que chocaba con los modelos heredados de la tradición.

Durante las últimas décadas, el amplio desarrollo de la técnica y la informática, han hecho que el abanico resolutivo sea sumamente extenso y el High-Tech ha permitido que dichas

soluciones encuentres una belleza estética en sí mismas, haciendo alarde de las capacidades propias de un tiempo. Este tipo de entendimiento de la arquitectura, concibe obras conceptualmente contemporáneas, en las que aparece el “*ornamento técnico*”²⁸⁹ como respuesta expresiva para un gran número de proyectos, que desde los años setenta hasta la actualidad, han representado la expresión estética más intrínsecamente ligada a la contemporaneidad. Hoy la mente de las personas está abierta a la ciencia y la tecnología, respondiendo positivamente a la experimentación espacial y la expresión en dichos términos, como medio resolutivo y de pensamiento enlazado con nuestros tiempos.

Algunos de los principales exponentes de este tipo de estilo arquitectónico que hace alarde de la técnica son: Norman Foster, Richard Rogers, Renzo Piano, Nicholas Grimshaw, Thomas Herzog, Francoise-Hélène Jourda, Gilles Perroudin, Kenzo Tange, Jourda Kiyonori Kikutake y Kisho Kurokawa. Así dadas las problemáticas ecológicas, de sostenibilidad... planteadas, durante los años noventa se refunda el High-Tech²⁹⁰, como vía conceptual y estética, para la introducción de los medios tecnológicos asociados a las energías renovables en la edificación. Esta nueva faceta del High-Tech, se ha llegado a denominar “*Eco-Tech*”, que busca la sostenibilidad de la arquitectura.

Este tipo de obras encuentran su estética en la racionalidad resolutiva, desprovista de maquillajes que hagan socialmente aceptable la obra, eso hoy en día, resulta innecesario dada la aceptación social de este tipo de soluciones. Actualmente el punto de vista de la sostenibilidad de la edificación es vital, tanto en los procesos constructivos, como durante la vida útil de la edificación, limitando los consumos derivados de la normal actividad de la obra. Este tipo de preocupaciones hoy están presentes en el campo de la edificación a todos los niveles, por ello la concepción expresiva de estos medios tiene mayor relevancia, aunque en el general de los casos se busca que resulten lo menos perceptibles posible.

Estas valoraciones, generalizadas en el ámbito constructivo, tienen un claro ejemplo sobre aquellas obras especialmente reseñables, de gran impacto social, como en el caso de aeropuertos y otras obras en las que se busca, no solo una respuesta meramente funcional, sino una expresión de unos valores e implicación con los condicionantes propios de un tiempo. Este hecho ha tenido como resultado, que muchos de los proyectos públicos de gran envergadura empleen la exaltación técnica como medio de expresión, aunque de igual forma entes privados han usado este medio de expresión para transmitir sus valores, como veíamos en el caso de la sede de Endesa en Madrid. Este tipo de estética, pese a las décadas que han pasado desde sus orígenes, hoy podemos considerarla como una de las más intrínsecamente

²⁸⁹ El término “*ornamento*” hace referencia a un adorno o motivo que sirve para embellecer una cosa. Así al hablar de “*ornamento técnico*” se alude a la faceta estética de la solución técnica, sin añadiduras superfluas que lo haga aceptable visualmente, ya que por sí misma encuentra expresión.

²⁹⁰ El movimiento High-Tech se refunda en 1993 en la Conferencia Internacional de Florencia, sobre la energía solar en la arquitectura y el urbanismo, mediante la creación de READ, con el apoyo de la Comunidad Europea.

CASAS, Narciso, “*ESENCIAL, Narciso Casas - Muestra sus obras y secretos en las artes plásticas*”, España, Bubok, 2011, p. 267.

ligadas con la contemporaneidad, por su implicación con las condiciones técnicas y las preocupaciones ecológicas.

Como se ha reiterado en numerosas ocasiones, los proyectos de grandes luces son factibles gracias a la confluencia de avances en la técnica, los materiales y los medios de cálculo y representación. Esto es resultado de un extenso proceso a lo largo de los siglos, que nos ha conducido hasta el momento actual, en el que no solo es factible la resolución técnica de este tipo de reto espacial, sino que su visión técnica al desnudo es socialmente aceptable, gracias a movimientos como el High-Tech, que han injertado este tipo de imágenes dentro de la conciencia colectiva de la sociedad. Así la propia resolución estructural se convierte en una herramienta de expresión formal. Si las grandes luces, tanto en su faceta espacial, como volumétrica establecen un énfasis sobre la edificación, cuando la técnica juega un claro papel estético, se produce una *“exaltación de la técnica”*. Este proceder corresponde con una sinceridad constructiva, que hace alarde, tanto de los medios de construcción, como de los esquemas resistentes, recordemos todos el HSBC Building (Figura 167), realizado por Norman Foster en 1979. Esta obra traslada la estructura principal al exterior, descolgando los volúmenes edificados de las grandes perchas que marcan la lectura de la fachada, como elementos en tensión, que no solo establecen un orden y una división de la edificación en paquetes resolutivamente independientes, sino que expresa en sí mismo los valores de la

Figura 167. HSBC Building, Hong Kong (China), obra de Norman Foster & Partners y las ingenierías Ove Arup & Partners y Cleveland Bridge Ltd. (1979).

prefabricación y la resolución técnica con grandes gestos, capaces de resolver la obra, de forma eficiente. Se establecen escalas perceptivas, al diferenciar entre la estructura global o principal y la secundaria, que dependiente de ésta, conforma los espacios interiores de la edificación. Así, a través de la materialización del edificio se hacen patentes los medios que la hacen factible, así como la resolución tensional, de forma análoga a lo que ocurría en las estructuras góticas, que reducían los elementos constructivos al mínimo necesario para la sustentar las cargas a las que está sometida la edificación y cubrir los espacios definidos por ésta. La estructura es parte indisociable de la estética de este tipo de proyectos, pasando de ser un elemento exclusivamente funcional a cubrir así mismo una función estética. Este hecho influye en la concepción de los elementos estructurales, que se diseñan con mayor cuidado, en la búsqueda de una imagen concreta, capaz de potenciar la expresión técnica de los elementos constructivos, lo que en muchas ocasiones ha venido ligado al color (Figura 168), que suele estar presente en este tipo de obras, como medio de definición formal capaz de producir un impacto más directo sobre el espectador, así como una lectura más esquemática de la propuesta.

Actualmente la expresión arquitectónica, mediante la conformación estructural de la obra, es habitual y en especial en los proyectos de grandes luces en los que ésta adquiere mayor entidad y por consiguiente un mayor peso visual. Un ejemplo de cómo una obra establece su centro argumental en la resolución técnica lo encontramos en proyectos como el de las Bodegas Protos, obra de Richard Rogers Stirk Harbour + Partners, realizada en Valladolid (2003-2008) (Figura 169). En este caso el material usado es madera laminada, curvada para formar una serie de arcos triarticulados. Estos se separan de la lámina de la cubierta, exaltando la presencia de los arcos con este sutil gesto, que transforma la percepción estructural de la obra. Así, se enfrentan visualmente la maquinaria que interviene en el proceso de fermentado del vino, con los arcos de madera, que establecen un nexo con la tradición, mientras ponen de manifiesto los avances de la técnica y el hecho de que hoy los elementos clásicos pueden ser empleados con otras reglas distintas, que modifiquen su interpretación. Se establece un diálogo que contrapone la expresión tecnológica de la producción del vino y de la arquitectura, con los materiales empleados y su relación con la

Figura 168. Centro Renault en Swindon (Reino Unido), obra de Norman Foster & Partners y las ingenierías Ove Arup & Partners (1982).

naturaleza y la tierra, como la de los vinos que allí se producen.

Por tanto se concibe la representación de la técnica, como medio para otorgar armonía y sinceridad a la materialización de un espacio productivo, que desea dialogar como espacio expositivo, en el que se muestran los procesos productivos del vino de la marca Protos, desde las materias naturales. El edificio se concibe como medio de difusión de los valores intrínsecos de los procedimientos productivos de los que la marca cuenta. A lo que la arquitectura responde con un lenguaje, que basado en la técnica, no olvida las raíces del material, estableciendo una dialéctica similar a la que el propio edificio desea expresar en su interior. Por lo tanto, la estructura ha pasado a ser el elemento estético más importante a la hora de la conformación del espacio y el ambiente particular que lo caracteriza. En proyectos como éste, se percibe la profundidad conceptual y el trasfondo de este tipo de consideraciones estéticas, que afectan al funcionamiento de la edificación, desde la concepción estructural como medio de expresión.

En el caso expuesto, dicha concepción se enfoca en la espacialidad interior, afectando la forma en la que se habita la edificación, pero cuando este esfuerzo se concentra en el exterior, se

Figura 169. Bodega Protos, Valladolid (España), obra de Richard Rogers Stirk Harbour + Partners (2003-2008).

habla en términos volumétricos y como ya se ha mencionado con anterioridad, este esfuerzo puede estar orientado a la conformación de iconos o imágenes proyectuales que hagan reconocible la obra, al tiempo que permitan establecer una serie de valores intrínsecos a la imagen generada. La estructura se entiende como un elemento estético y bello, que se debe mostrar para configurar la percepción del proyecto desde la sinceridad estructural. Así mismo, en este tipo de obras, puede entrar en juego la innovación técnica, como puesta en énfasis de la contemporaneidad e interés por la mejora del panorama arquitectónico. Un pequeño ejemplo lo encontramos en el proyecto Fluid Vehicle Bus Station (Figura 170) en Hoofddorp (Países Bajos), obra de NIO Architects (2003). En este edificio el color y las formas orgánicas que emplea, muestran la naturaleza inusual del material y la técnica que lo ha hecho posible. Si bien este ejemplo no resulta tan directo como otros realizados en acero, donde las grandes cerchas se dejan a la vista, tiene su relevancia, en tanto hace muestra de las capacidades de los nuevos materiales, como la combinación de espuma de poliestireno, con un acabado exterior de poliéster, que permite que un volumen aparentemente muy pesado, sea en la realidad sumamente ligero. Es una muestra sutil de las virtudes de una técnica, formando una imagen dinámica, con una clara función icónica. En este proyecto se alcanza un nivel casi escultórico de la obra, como icono reconocible en el lugar. Además, el proyecto hace un sutil alarde de la técnica, en este caso solo perceptible para los profesionales del sector, que conozcan las particularidades materiales de la obra. El público en general escasamente es capaz de percibir más allá del alarde formal, por otros medios difícilmente realizable²⁹¹. Así la obra se encuadra entre la exaltación técnica y el propio gesto, actuando de forma diferente dependiendo del público que la contempla. Es una pequeña, pero rica muestra de lo que algunos de los nuevos materiales pueden aportar a la riqueza proyectual.

La expresión técnica ha de considerar en todo instante el estado técnico del momento y por ello al hacerse eco de los avances disponibles, es uno de los ámbitos en los que se puede presentar en mayor medida la innovación técnica, tanto en sistemas estructurales, como en materiales. El uso en términos estéticos de las soluciones técnicas, permite la difusión de los descubrimientos, que a cada paso transforman el panorama resolutivo ante el que nos encontramos. Así se modifican, tanto los límites de actuación, como las posibilidades que se brindan en el estudio para dar respuesta a una única problemática.

La estructura como recurso comunicativo es un elemento de gran rotundidad expresiva, siendo éste el más definitorio de la esencia intrínseca de la edificación. Este tipo de solución permite, tanto la expresión de la propia edificación que reivindica su posición dentro del panorama actual, como en términos representativos la asociación de valores, que mediante este tipo de elementos permiten enlazar diversos conceptos a una imagen, con la capacidad de representar a una entidad independiente. Éste es el caso que se ha comentado anteriormente de las empresas, que buscan un icono arquitectónico y encuentran en los referentes técnicos de la arquitectura, el lenguaje capaz de expresar principios como la sostenibilidad,

²⁹¹ El gesto se convierte en un medio de expresión de las capacidades técnicas. Así esta obra se puede entender, tanto desde el punto de vista de la expresión técnica, como del gesto, ya que ambos conceptos aparecen indisolublemente ligados en este proyecto.

preocupación por la ciudad o el medio ambiente, que se asocian perceptivamente a la marca mediante el objeto arquitectónico.

Figura 170. Fluid Vehicle Bus Station en Hoofddorp (Países Bajos), obra de NIO Architects (2003).

4.3. Gesto. Libertad expresiva como principio estructurante del proyecto

La materialización formal de la obra, lleva inherentemente asociadas unas connotaciones referenciadas al panorama social contemporáneo, en el que permiten establecer referentes reconocibles, que modifiquen la percepción conceptual de la obra. Este proceso actualmente se produce mediante referencias abstractas, pero en este punto es necesario recordar la *“posmodernidad figurativa”*, que concibe toda forma como elemento estético, sea cual sea su procedencia, descontextualizándose para establecerse una ambigüedad arquitectónica, que permita atender a las implicaciones simbólicas, comunicativas y decorativas, primando sobre la concepción funcional de la obra. Este tema lo explica Venturi y Scott Brown en el libro *“Complejidad y contradicción en la arquitectura”* (Nueva York, 1966), en el que muestran una forma de concebir la arquitectura más allá de los conceptos expuestos por la Arquitectura Moderna. Este tipo de concepción arquitectónica ejerció una influencia liberadora sobre los parámetros conceptuales y estéticos de la edificación.

En el panorama actual, raramente se recurre a la literalidad referencial de la figuración, no se referencian objetos físicos, sino sensaciones y conceptos que se desea introducir en la experiencia de la edificación. Ejemplo de ello lo encontramos en las referencias que se hacen al mar, mediante una ondulación de la cubierta, que más allá de la rigidez de las formas, muestra una variabilidad y una respuesta a los componentes de la edificación, como ocurre con la ondas del agua cuando se encuentran con una roca. Este tipo de referencia no requiere ni de una literalidad, ni del empleo del color, sino más bien de una forma particular de entender la producción arquitectónica como una metáfora formal, que nos asocia perceptivamente un concepto, sin representarlo figurativamente. Así mismo un alejamiento de la ortogonalidad de las formas y la repetición, puede asociarse con una espontaneidad formal, permitiendo representar el concepto de *“libertad”* (la capacidad de la conciencia para pensar y obrar según la propia voluntad de la persona). Así una condición del hombre se pudo ver plasmada en la obra, como una declaración de intenciones o un grito ante el mundo para hacer gala de las capacidades de un tiempo.

Como se vio en un apartado anterior, toda forma tiene una interpretación psicológica, como expresaba la Teoría de la Empatía Simbólica de Einfühlung, que manifestaba la capacidad del hombre de comprender en base a expresiones y signos externos, la vida mental de otros. Siendo la producción arquitectónica el medio en el que el hombre tiende a proyectar las estructuras de su propio cuerpo (espacio, frontalidad, vertical, horizontal, equilibrio etc.) y sus propios sentimientos cuando está llevando una carga. Este tipo de referentes o rasgos del edificio, suscitan una respuesta inconsciente, que produce en el usuario una empatía o simbolismo. Así tras cada forma plasmada en la arquitectura, hay un trasfondo ligado con el propio artífice, así como al objeto de representación, referenciado a la obra arquitectónica, (sea una idea, una imagen, una creencia o una entidad que se vea representada). La obra arquitectónica siempre, más allá de su motivación funcional, ha sido un medio de expresión,

mediante el que la sociedad ha plasmado y defendido conceptos relativos a su experiencia vital: política, social, religiosa...

Investigaciones como las de Melanie Klein, Hannah Segal y Adrian Stokes han relacionado las sensaciones transmitidas por cada forma (horizontalidad, verticalidad, ángulos, formas plásticas...), un simbolismo oculto en cada gesto de la edificación, que permite confeccionar una lectura compleja, que de forma inconsciente transmite al usuario un mensaje o una imagen deseada desde la concepción proyectual.

El aspecto formal ha sido el principal medio de expresión arquitectónica, incluyéndose el ornamento dentro de esta concepción. El Movimiento moderno relegó el ornamento de la concepción formal de la edificación, pasando la forma arquitectónica pura a ser el elemento expresivo. En 1908 Adolf Loos (1870-1933), publica el artículo *“Ornamento y delito”*, en el que defiende la expresión volumétrica de la arquitectura desprovista de ornamento alguno, *“La casa debe agradar a todos, a diferencia de la obra de arte que no tiene por qué gustar a nadie. La obra de arte es un asunto privado del artista. La casa no lo es. La obra de arte se sitúa en el mundo sin que exista exigencia alguna que la obligase a nacer. La casa cubre una exigencia. (...) La obra de arte es revolucionaria, la casa es conservadora.*

*(...) ¿No será que la casa no tiene nada que ver con el arte y que la arquitectura no debiera contarse entre las artes? Así es. Sólo una parte de la arquitectura, muy pequeña, corresponde al dominio del arte: el monumento funerario y el conmemorativo. Todo lo demás, todo lo que tiene una finalidad hay que excluirlo del imperio del arte”*²⁹². Con estas palabras Loos intenta decir que el ornamento o *“formas decorativas gratuitas”*, ya no tienen un lugar dentro del panorama arquitectónico de la vivienda, lo que podríamos extender al resto de ámbitos. Este cambio conceptual modificó radicalmente la forma de concebir la arquitectura, pasando el gesto a interpretar un papel fundamental en la expresión arquitectónica, la dialéctica que antes contenían los muros, pasa a estar intrínseca a su conformación. En cierta manera se pasó a un *“ornamento de las formas”*. Estructuras como las cubiertas laminares de Félix Candela adquieren expresión, marcando un énfasis en la conformación proyectual y la definición formal. Estas cubiertas laminares, atendiendo a unas consideraciones estrictamente estructurales, logran formas que no dejan indiferente, produciendo un claro impacto sobre los usuarios, estableciéndose en muchas ocasiones estas obras como elementos icónicos. Las estructuras en su conformación adquieren una belleza relacionada con la racionalidad resistente.

La expresión de las formas constructivas se presenta a todas las escalas, atendiendo a justificaciones muy diversas y a conformaciones estructurales o meramente de los paramentos. En nuestro caso nos interesan aquellas que se centran en la conformación estructural, conjugando una respuesta resistente y expresiva. Como se puso de manifiesto en el correspondiente apartado, las superficies horizontales están intrínsecamente ligadas a la actividad del hombre y por ello se busca la conformación de planos horizontales, pero en la cubierta existe un mayor margen de actuación, pudiendo aprovechar el factor de forma para la

²⁹² LOOS, Adolf, *“Ornamento y delito y otros escritos”* (Arquitectura, 1910), Barcelona (España), Gustavo Gili, 1972, p.229.

resolución de estructuras más eficientes. Así desde el uso de estructuras en arco, a las superficies de doble curvatura, la definición formal se ha establecido como uno de los principales medios de expresión arquitectónica. Pero como se ha comentado anteriormente, puesto que la representación arquitectónica se produce, tanto desde el punto de vista espacial, como en mayor medida volumétrico, la complejidad formal y la exaltación dimensional, aparecen como factores clave para el entendimiento de la nueva expresión gestual.

El ya nombrado Mercado de Santa Caterina (Figura 171), es un gran ejemplo de la importancia del gesto en el panorama arquitectónico actual. Si bien esta obra hace uso de las características perceptivas de los materiales, el gesto se impone en la lectura general. Los materiales se eligen de forma que empleando superficies de madera y vigas y tirantes de acero, se transmite la idea simbólica del matrimonio entre la tradición y la contemporaneidad, mientras que al exterior la cubierta se recubre de piezas cerámicas coloridas, que combinan la

Figura 171. Mercado de Santa Caterina de Barcelona (España), obra de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue (1997-2005).

tradición constructiva del lugar con los procesos artesanales de producción, para enraizar la obra en el marco social del lugar. Esta intervención busca así mismo revitalizar el barrio, simbolizando la renovación de éste y la coexistencia de referentes del pasado en la sociedad actual. Pero en esta obra, ante todo destaca la independencia formal del plano de cubierta, que se ondula de forma aparentemente libre, como si de olas se trataran, relacionando el mercado con el mar y los lazos que han unido tradicionalmente a su gente con éste.

El proyecto plasma la importancia estética de la estructura para la configuración espacial del proyecto, haciendo uso de las herramientas técnicas, tanto desde el punto de vista resolutivo, como expresivo. Queda patente el papel dominante del gesto como elemento estructurador del discurso arquitectónico, siendo el resto de elementos matizaciones de éste. El gesto puro sin una competencia habitacional sería escultura, pero en este tipo de obras no solo resulta patente la respuesta funcional de la edificación, sino que la elección del gesto responde a una función expresiva plenamente ligada con la actividad de la edificación.

El gesto puede ir en consonancia a la resolución estructural, como respuesta lógica, o ser una imposición previa, a la que la estructura se adapta, generalmente con una menor eficiencia estructural. En el segundo caso, la edificación queda marcada por un gesto puramente formal que define estructura y espacio, en función de unas formas con una clara finalidad expresiva. En el caso comentado la relación con el mar y el viento, para simbolizar el matrimonio entre la tradición y la modernidad en un barrio antiguo, que desea la convivencia de ambas realidades.

En el interior de este mercado, las personas discurren por las calles entre comercios, bajo una techumbre de madera ondulante, como si el plano de cubierta casi levitara ondulado por el viento, guareciendo los comercios tradicionales, que guardan la esencia de un barrio, atesorando sus raíces con los ojos de la contemporaneidad. Si el interior es un gesto enfocado a la personalidad del barrio, al exterior se muestra hacia los vecinos más directos con la intención de configurar un plano artificial y colorido. Este plano, sin ser transitable, permite generar una referencia visual agradable, como un paisaje idílico. Así, contrasta esta cubierta con la del viejo mercado, ya que ésta era una respuesta meramente funcional, que no tenía en consideración el factor perceptivo de los vecinos. La decisión proyectual de la conformación de la cubierta al exterior, genera una imagen claramente reconocible y representativa del barrio, en tanto en cuanto, se hace eco de sus preocupaciones, en un intento de reflejar parte de su espíritu. Desde el punto de vista conceptual, resulta aún más relevante la concepción interior, ya que es la materialización gestual y espacial del nuevo espacio público del mercado, como reflejo de la sociedad que lo utiliza. La ondulación de la cubierta al interior, produce en el usuario una cierta independencia de los lazos que los unen con lo que sucede en el suelo, dado que el trazado de la cubierta y el de las calles comerciales no presentan una relación aparente. La cubierta se concibe compuesta por formas independientes y cambiantes, según discurrimos por el mercado, enfrentando la rigidez de los puestos y la imagen clásica del mercado, con el dinamismo de la techumbre, haciendo una clara referencia a la acción dinámica del usuario y la rotura con las tradiciones, como un reto resolutivo, en el que el usuario difícilmente tendrá una concepción única del espacio, sino más bien una sensación de movilidad. No todos los proyectos de esta categoría emplean las mismas reglas, pero en todos ellos un gesto en el trazado y concepción de la estructura, ha logrado ser el generador del espacio, obteniendo una

imagen personal y de mayor relevancia respecto al resto de factores considerados durante la fase de desarrollo del proyecto.

Así el gesto si bien no es una herramienta única, ni independiente, puede ser el hilo conductor que estructure el proyecto. Las formas tienen la capacidad de evocar recuerdos, sensaciones y estados de ánimo, lo que las convierte en el lenguaje de expresión arquitectónica por excelencia. Hoy en un panorama donde el ornamento ha desaparecido, el diseño formal es el núcleo representativo de la proyección arquitectónica, enlazado en muchos casos directamente con la resolución estructural. Este hecho es así, más si cabe, cuando se trata de proyectos de grandes luces, en los que la resolución espacial y volumétrica es tan relevante dentro del proceso de formalización. Así el gesto y la resolución resistente forman un todo, ya sea la forma impuesta a priori o como resultado de la racionalidad constructiva, congruente con las problemáticas proyectuales planteadas en un origen.

Las herramientas de diseño espacial asociadas a las grandes luces, comentadas en la presente relación taxonómica, desde el un punto de vista interior y exterior, son indispensables, para desde el acto proyectual, concebir no solo una resolución en términos espaciales y volumétricos, sino de forma aun más notable, en términos perceptivos. La arquitectura siempre ha estado conformada por la suma de gestos, que dan lugar a la respuesta concreta, que responde a un compendio de necesidades previas, eso engloba, desde los aspectos funcionales, a los expresivos, como contestación a las exigencias procedentes de un marco técnico y socioeconómico concreto. Hoy desprovista de la película artística u ornamental, que otorgaba una lectura más profunda a la obra, el gesto adquiere un papel más relevante. Además actualmente, tanto el panorama técnico, como la capacidad de los medios digitales para la resolución formal y numérica de casi cualquier solución concebible, pone en primera línea el gesto, como medio de transmisión y ostentación de las capacidades resolutorias propias de nuestro tiempo. Cuando hablábamos en el punto anterior de la Fluid Vehicle Bus Station, la resolución formal de la obra era vital para la expresión de la misma y la puesta en valor de los nuevos materiales (poliéster y espuma de poliestireno). El gesto logra conformar una obra icónica, con grandes virtudes, que pone de manifiesto el trasfondo técnico, permitiendo la difusión mediática de los procesos de producción en taller de los elementos que hacen posible tal ostentación formal. Así mismo, esta resolución gestual es una ostentación del reto técnico, ya que con otros materiales resultaría difícilmente realizable²⁹³. Hoy el “*gesto*” es la principal línea lingüística de la arquitectura, sumada a la expresión técnica.

En numerosas ocasiones, como se ha comentado, las funciones del edificio pasan por algo más complejo que las necesidades físicas, para entrar en el campo de la imagen y el requisito proyectual de constituirse como una figuración representativa de una ciudad, un colectivo o una empresa. En estos casos las decisiones proyectuales y de configuración espacial tienen un claro enfoque visual, ya que en la mayor parte de los casos, la difusión de estas obras icónicas

²⁹³ Esta obra, sin considerar el empleo de los nuevos materiales, hubiera tenido que recurrir a soluciones ligadas a estructuras metálicas trianguladas, con la disposición de una piel definitoria del volumen. La solución adoptada colmata la totalidad del volumen, por lo que al hacer referencia a que resultaría difícilmente materializable, se alude a los sistemas estructurales a los que visualmente hace referencia la intervención, que para el ojo inexperto podría entenderse resuelta en hormigón.

se producirá mediante la fotografía u otros medios que no permiten una percepción tridimensional del conjunto, sino más bien la imagen global de la serie de volúmenes que lo constituyen. Los proyectos icónicos, frecuentemente están enfocados hacia la percepción exterior de los mismos, ya que allí es donde se suele configurar la imagen que representará al edificio. En estos casos, las distinciones vienen dictadas precisamente por el enfoque expresivo del proyecto, como imagen generalmente ligada al *“alarde”*, que distinga la obra de la cotidianidad. En ese marco, las grandes luces son hoy la principal línea de actuación y su conformación se constituye como algo más complejo que la resolución funcional, se trata de transmitir emociones y conceptos que marquen la experiencia de la obra, haciendo de ello algo reconocible.

En el caso de numerosos estadios deportivos, como los de fútbol, las grandes cubiertas realizadas en la actualidad no son un requisito estrictamente indispensable, sino una medida enfocada en el confort de los asistentes, que dada su entidad y el alarde espacial que suponen, adquieren una especial expresión, estableciéndose en numerosas ocasiones como un icono o imagen más reconocible del estadio, enlazada con el equipo al que pertenece. A este respecto se puede destacar el Estadio Olímpico de Pekín (Figura 172), realizado por Herzog & De Meuron (2008), al que popularmente se ha denominado *“nido de pájaro”*, en el que la maraña de elementos de acero, conforma gestualmente el estadio, con una imagen claramente reconocible y una auténtica ostentación de lo que un país es capaz de hacer, retando a los estándares resolutivos para este tipo de espacios deportivos. Están claras las connotaciones asociadas a la obra desde sus orígenes, respondiendo el conjunto de arquitectos e ingenieros,

Figura 172. Estadio olímpico de Pekín (China), obra de Herzog & De Meuron (2008).

con una solución gestual y técnicamente impactante²⁹⁴, que conforma la totalidad del exterior dando, tanto respuesta a los cerramientos y comunicaciones verticales, como a la cubrición, que se completa con una serie de “cojines” hinchables de ETFE (copolímero de etileno-tetrafluoretileno). El gesto hace uso de las capacidades técnicas y de su imagen, para conformar un icono rotundo y cumplir una de las funciones más etéreas y fundamentales de proyectos como éste.

La importancia del trazo, adquiere especial relevancia cuando su misión va más allá de las respuestas regladas y se busca la innovación formal y la ostentación del gesto, como medio de interacción. Se produce así de forma independiente a consideraciones técnicas o funcionales, una expresión estética y emocional que busca la respuesta directa del usuario a las decisiones proyectuales. En la mayor parte de los proyectos comentados hasta el momento este hecho de produce, sea o no la principal consideración tomada durante la proyectación. Precisamente esta primacía o no de la función expresiva como motivación de la obra, es la que determina el tipo de solución a adoptar. Existe durante la ideación del proyecto, un proceso reflexivo que ha de sopesar si prima la lógica resolutive y la economía de medios de las soluciones fundamentadas en principios estructurales o se opta por la expresión como principio estructurante. La adopción de la expresión como principal finalidad, no tiene por que ir asociada a un sobre coste resolutive, aunque este hecho se dé en buena parte de los proyectos que eligen esta vía. Así en el proyecto se puede discernir entre el gesto, como configurador espacial y como medio de representación, entrando en cada caso a sopesar distintas consideraciones, por lo que desde el punto de partida es necesario clarificar esta postura.

En aquellos proyectos donde prima el acto representativo, se presenta la problemática de materializar nuevos iconos, generando una identidad propia que sirva de medio de reconocimiento visual. En estos términos se encuentran proyectos a todas las escalas y categorías proyectuales, un ejemplo de ello lo encontramos en la Estación de Autobuses del Casar de Cáceres (Figura 173), obra de Justo García Rubio (1998-2004). En este proyecto de reducidas dimensiones, se decide emplear las grandes luces como medio de materialización del gesto representativo y conformador del espacio cubierto de la estación, en un claro alarde formal. Así se pone de manifiesto la belleza de las cubiertas laminares de hormigón armado, que como ya se comentó en el punto correspondiente, actualmente se encuentran prácticamente en desuso, por su falta de adecuación a los condicionantes socioeconómicos del panorama actual.

En esta obra se dejan de lado aspectos funcionales e incluso la confortabilidad de los suelos horizontales²⁹⁵, para centrar toda la atención en la forma ondulada y plegada, que manifiesta

²⁹⁴ En el Estadio Olímpico de Pekín se empleó una gran cantidad de acero para su resolución, siendo una solución considerablemente más costosa, que otras opciones más óptimas, enfocadas desde el punto de vista estructural. En esta obra prima la conformación de un gesto y una imagen sorprendentes, pasando la economía de medios y la optimización a un segundo plano.

²⁹⁵ En el proyecto de la Estación de Autobuses del Casar de Cáceres, se han dejado todos los aspectos no enfocados a la consecución del gesto continuo, conformador de todo el proyecto, en un segundo plano. Tal es así que incluyéndose en el programa una pequeña cafetería, ésta se configura siguiendo las líneas marcadas por la decisión proyectual del gesto. Quedando forzada a disponer las mesas en un plano

ser libre, sin ataduras o reglas técnicas que la coarten, aunque obviamente, se basa en todos los conocimientos adquiridos a lo largo de los años de la construcción de láminas de hormigón armado de doble curvatura. En este caso concreto se regruesan en los extremos, para configurar los puntos de apoyo como una prolongación de la lámina, que se pliega sobre sí misma, para formar el pavimento, como una continuidad del gesto que da lugar a la totalidad del proyecto. En esta obra la imagen es el aspecto clave. Tanto espacialidad, como función y técnica, han pasado a un segundo plano, tomando exclusivamente aquellas decisiones que van en la línea defendida por el arquitecto, aunque actúen en detrimento de alguno de los factores secundarios, como el propio uso de la construcción. Por lo tanto, en esta categoría estamos cerca de lo que podríamos considerar como escultura habitada, aunque la globalidad del concepto sea mucho más rico y todos esos factores secundarios que se han nombrado, resulten de una importancia tan sustancial, que claramente definen la diferenciación que la enmarca en el campo de la arquitectura y no de la escultura. Así se percibe, cómo la concepción visual de la obra puede marcar gradaciones, desde la pura necesidad expresiva de la construcción como ente material, al extremo de la representación pura, en el que se da forma a un concepto o un gesto superior a la propia edificación, convirtiéndose este hecho en sí mismo en una finalidad de la obra, con igual o superior importancia a la propia resolución funcional, que da origen a la arquitectura como respuesta a unas necesidades del hombre.

Las grandes luces son un medio para la resolución de un amplio margen de problemáticas, a

Figura 173. Estación de Autobuses del Casar de Cáceres (España), obra de Justo García Rubio (1998-2004).

inclinado, resolviendo dicha problemática mediante la disposición de un escalonamiento con unas piezas de madera, lo cual hace factible la correcta ocupación del espacio. Otro de los puntos de interés, son los aseos, que precisamente por la dificultad que implicaría su incorporación en el conjunto, se han dispuesto bajo éste en una planta sótano, accesible desde la cafetería.

las que los rangos de luces convencionales no pueden dar respuesta, pero al mismo tiempo son parte fundamental de la dialéctica arquitectónica contemporánea y como tal, parte de un lenguaje que permite la expresión arquitectónica en el marco actual. Este hecho, encuadra estos recursos proyectuales en la frontera, no solo de los límites dimensionales y técnicos, sino de la misma expresión, siendo un énfasis y experimentación en la interpretación arquitectónica de los usuarios. La resolución técnica es el medio que hace posible la obra, imponiendo una interpretación lingüística, pero el gesto es la expresión en sí misma, en términos que han suscitado múltiples interpretaciones psicológicas, en un intento de racionalizar los procesos interpretativos que hace el hombre de la arquitectura. Hoy en el estudio, este tipo de procesos se realizan atendiendo a consideraciones relacionadas con la propia experiencia vital del arquitecto, reflejando su propio sentimiento en la obra, pero la experiencia arquitectónica es tan variada, como el número de usuarios que la contemplan. Por esta razón, el conocimiento de la presente taxonomía, puede aportar unas bases sobre las cuales estructurar los conceptos a desarrollar en el proyecto. El diseño perceptivo, debe ir en paralelo al diseño formal de la obra, siendo un proceso más complejo, por su carácter intangible y variable.

La conformación geométrica, como medio de expresión en líneas distantes de la convencionalidad, establecen el contrapunto que permite que se ensalcen sobre la visión cotidiana, para establecer una llamada de atención y una defensa de la propia libertad del diseño u otro concepto, que aparece ligado a la edificación como parte de su esencia. Si bien la lectura de las obras arquitectónicas cambia con el transcurso del tiempo, si la obra se encuentra implicada con la representación de la contemporaneidad, será en sí misma el reflejo de un tiempo para las generaciones futuras.

5. Límites dimensionales. Procedimiento para la determinación del marco dimensional

Un factor vital, a tener en consideración a la hora de la proyectación, es el alcance de las capacidades resistentes de los diferentes materiales y soluciones asumibles. Un concepto relacionado con esta preocupación es el “*tamaño máximo*” de un objeto, el estudio de este modelo se remonta a Galileo Galilei en 1638, determinando la mayor altura alcanzable con un prisma de sección constante, sometido exclusivamente a peso propio. Este tipo de razonamiento permitió relacionar la tensión de servicio y la densidad del material. Así se puede llegar a la determinación de la longitud máxima de una barra sometida a un esfuerzo tractor, debido a la carga de peso propio mediante la fórmula ($L = \frac{\sigma}{\rho}$) (donde L es la longitud de la barra (cm), σ la resistencia (g/cm^2), ρ el peso específico del material (g/cm^3)). A este término se define “*alcance*” de un material. En este razonamiento el área de la sección de la propia barra no influye sobre la longitud máxima alcanzable. En el caso concreto de una barra de acero A-42 podría alcanzarse una longitud de 5.343 metros. En el caso de los esfuerzos de compresión entra en juego el factor de pandeo del elemento, lo que minora la longitud alcanzable por la barra obtenida por el presente razonamiento, debiendo añadirse un coeficiente de pandeo, que está intrínsecamente relacionado con las proporciones de la barra.

Mediante el proceso expuesto se determina la longitud máxima en el punto de rotura, pero lo que nos interesa desde el ámbito estructural es la definida por el límite elástico²⁹⁶, ya que las estructuras deben de mantenerse dentro de los márgenes elásticos del material, para evitar la aparición de deformaciones permanentes. La ley de Hooke determina las deformaciones del material, estableciendo una proporcionalidad entre la fuerza aplicada y las deformaciones de los materiales en el margen elástico del material, respondiendo a la fórmula ($\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{AE}$) (donde δ es el alargamiento de la barra, L es la longitud original, E es módulo de Young y A es la sección transversal de la pieza estirada). Así la tensión máxima en estado elástico se determina mediante la fórmula:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Para el caso específico de un problema unidireccional, donde las deformaciones y tensiones perpendiculares a la dirección principal resultan irrelevantes, se puede simplificar a ($\sigma = E\varepsilon$), determinando la tensión máxima en estado elástico. En las estructuras, este punto referencia las limitaciones reales de actuación, a las que se dejan unos márgenes de seguridad suficientes para garantizar que en la vida útil de la edificación no se alcance nunca dicho valor. Así la

²⁹⁶ Límite elástico es la tensión máxima a la que se puede someter un material elastoplástico sin sufrir deformaciones de carácter permanente.

longitud máxima anteriormente citada para el acero A-42, se ve reducida a una longitud máxima de servicio de 2.200 metros.

Este razonamiento establece la dependencia en la determinación de los límites dimensionales, (de los elementos sometidos exclusivamente a cargas de peso propio), tanto de las características materiales (densidad y módulo de elasticidad o módulo de Young), así como del tipo de esfuerzo, teniendo vital relevancia, en el caso de las compresiones, el factor dimensional del elemento, como agente limitativo de la longitud máxima realizable.

En este contexto, desde el punto de vista pragmático, al respecto de la solución resistente adoptada, aparece la consideración de óptimo. Así un factor enfocado en la determinación de dicho parámetro, es la *“cantidad de estructura”*²⁹⁷. En este ámbito, se pasa de hablar de las capacidades inherentes al material, a las que se hacía referencia anteriormente, a las capacidades del sistema estructural, lo que engloba tanto los materiales constituyentes, como la configuración de un esquema resistente concreto. Así el factor de forma y la conformación resistente, se constituyen como las principales variables a la hora de establecer las limitaciones dimensionales alcanzables con los materiales propios de un tiempo, como entes en constante evolución. Desde esta perspectiva las diferentes resoluciones técnicas marcan múltiples limitaciones dimensionales, conformando un panorama en el que cierta resolución lleva asociados unos condicionantes proyectuales y unas limitaciones dimensionales, siendo la labor del arquitecto alcanzar el equilibrio entre el factor dimensional y resolutivo de la obra.

El concepto de *“cantidad de estructura”*²⁹⁸ no es algo nuevo, sino que se fundamenta en los estudios de Maxwell. Se plantea un *“Problema de Maxwell”*, lo que consiste en definir una estructura capaz de poner en equilibrio el sistema de fuerzas, (acciones y reacciones), que tomamos como base, definidas previamente, tanto en posición, como en magnitud, siendo la función de la estructura, interconectar dichas fuerzas entre sí, para *“construir la ligazón física que permita materializar el equilibrio”*, definiendo una *“Estructura de Maxwell”*²⁹⁹. Dicha estructura puede ser o no estricta, dependiendo de si cumple un dimensionado estricto de las barras (de un material dado), ante los esfuerzos a los que se encuentran sometidas, estando todas las secciones de la estructura sometidas a la tensión máxima compatible con la seguridad. Ante dicho planteamiento, se define la *“Cantidad de estructura” (W)*, como *“la*

²⁹⁷ A este respecto resultan de gran interés, entre los múltiples documentos existentes, los siguientes:

AAVV, *“Geometría y proporción en las estructuras: ensayos en honor de Ricardo Aroca”*, Madrid (España), Outer ediciones, 2010.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Concebir y analizar estructuras”*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011.

²⁹⁸ Al respecto del concepto *“cantidad de estructura”* se habla largo y tendido en el correspondiente apartado *“Avances en los medios de cálculo. Conocimiento resistente como apriorismo dimensional y limitador formal”*, por lo que en el presente punto meramente se recordarán los conceptos básicos.

²⁹⁹ Una Estructura de Maxwell es aquella compuesta exclusivamente por barras sometidas a esfuerzos axiales (compresiones y tracciones) y cargas aplicadas de forma puntual en los nudos.

integral extendida a toda la estructura de los productos $|N| ds$ ³⁰⁰ siendo N el esfuerzo axial en la “sección” y ds el elemento longitudinal de pieza en el punto considerado”³⁰¹.

$$W = \int |N| ds$$

Esta expresión, logra dar una imagen numérica del concepto cantidad de estructura y por consiguiente de lo apropiada que resulta una determinada solución ante un problema resistente previo, un factor de gran interés a la hora de la toma de decisiones durante la proyectación. Así desde el estudio, existe la consciencia del grado de optimización de la solución adoptada, pudiendo servir, tanto para la toma de decisiones previas, como para la evaluación del proyecto desde el punto de vista de la eficiencia. Precisamente este último facto, la “eficiencia” es una cualidad especialmente valorada en el panorama actual, donde se busca la confección de proyectos sostenibles, con un menor consumo energético, tanto durante la vida útil de la edificación, como durante el proceso constructivo. No hay que olvidar que sistemas estructuralmente óptimos como las estructuras laminares, desde el punto de vista climático, ofrecen un escaso aislamiento térmico, que limita sus áreas de implantación. Así eficiencia estructural y de utilización no van parejas, siendo factores a considerar durante el diseño del proyecto.

Sobre la “cantidad de estructura” se habló detenidamente en el apartado oportuno, por lo que aquí se prescindirá de mayores explicaciones. “El alcance en el paradigma del peso propio es un modo de medir la capacidad autorresistente”³⁰². Así mismo es importante hacer una distinción entre “Peso de la estructura” y “Cantidad de estructura”, ya que son conceptos distintos. Ya que el peso, es el resultado del volumen total de la estructura, multiplicado por la densidad correspondiente. No hay que confundir ambos términos, relacionados por lo que se ha definido anteriormente como el “alcance” del material.

$$\text{Alcance del material:} \quad L = \frac{\sigma}{\rho}$$

$$\text{Peso de la estructura:} \quad \text{Peso} = \frac{\rho}{\sigma} W$$

$$\text{Cantidad de estructura:} \quad W = \text{Peso} \frac{\sigma}{\rho}$$

Un término claramente implicado con las problemáticas arquitectónicas es la “esbeltez”, visiblemente relacionado con la “cantidad de estructura”. Así la esbeltez es el cociente entre las dimensiones ortogonal y paralela al esfuerzo que se considera. Apareciendo la proporción

³⁰⁰ $|N|$ es un valor absoluto, tomándose por consiguiente valores positivos, tanto para compresiones, como para tracciones.

³⁰¹ CERVERA BRAVO, Jaime, “Concebir y analizar estructuras”, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011, p. 161.

³⁰² Esta frase es de Ricardo Aroca y pertenece a uno de los cursos de doctorado de la ETSAM, “Geometría y proporción”, 1996.

como factor intrínsecamente relacionado con el comportamiento resistente y los límites dimensionales en la dirección principal.

Desde hace más de un siglo la búsqueda del “*óptimo*”, se centra en el ámbito numérico, donde la arquitectura gótica actuaba a través del análisis empírico y los conocimientos adquiridos de éxitos y fracasos. Desde el concepto de “*cantidad de estructura*” hay que tener claro que en todo caso: “*el producto de la “Cantidad de Estructura Horizontal” por la “Cantidad de Estructura Vertical” permanece constante en una estructura aunque modifiquemos su proporción*”. En estos términos “*si la posición inicial es la óptima, su cantidad de estructura es la mínima W_0 y en ese caso las cantidades de estructura horizontal y vertical son iguales $W_0 = W'_0$* ”.

$$\text{Cantidad de estructura horizontal:} \quad W^- = W_0^- \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

$$\text{Cantidad de estructura vertical:} \quad W' = W_0' \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

$$\text{Constante del producto de } W^- W' : \quad W^- W' = W_0^- \frac{\lambda}{\lambda_0} W_0' \frac{\lambda_0}{\lambda} = W_0^- W_0'$$

$$\text{Si } W_0^- = W_0' \quad W_0 = W_0^- + W_0' = 2W_0^- = 2W_0'$$

De lo anterior se obtienen tres expresiones, que como expone Ricardo Aroca, expresan de forma sencilla, una vez conocida la cantidad de estructura y la esbeltez de la solución adoptada, el “*esquema proporción*”, averiguando la cantidad de estructura y esbeltez de la solución óptima, de entre cuantas permite el esquema resolutivo empleado.

$$\text{Tomando:} \quad W^- = W_0^- \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{W_0}{2} \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad \text{y} \quad W' = W_0' \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{W_0}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

$$\text{Sumando los términos:} \quad W = \frac{1}{2} W_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} + \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)$$

$$\text{Multiplicando los términos:} \quad W_0 = 2\sqrt{W^- W'}$$

$$\text{Dividiendo los términos:} \quad \lambda_0 = \lambda \sqrt{\frac{W'}{W^-}}$$

A este respecto en la ETSAM se han llevado a cabo interesantes investigaciones en la búsqueda de la determinación del “*tamaño máximo*” de los elementos estructurales. Como se decía en un principio, el tamaño máximo se encuentra determinado por la resistencia exclusiva de las cargas de peso propio, por lo que el “*tamaño máximo*” se encuentra definido por la expresión:

$$\text{Siendo:} \quad W_{\text{Peso Propio}} = W_{PP} = \text{Peso } L \left(A\lambda + \frac{B}{\lambda} \right)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{B}{A}}$$

$$\text{Se deducen las expresiones:} \quad \text{Peso} = \frac{\rho}{\sigma} W_{PP}$$

Tamaño máximo:
$$L_{max} = \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{A\lambda + \frac{B}{\lambda}}$$

Estas formulaciones permiten su aplicación a casos concretos. Un ejemplo de ello, sería el tamaño máximo de las vigas biapoyadas de sección rectangular:

Siendo:
$$\text{Área} = A = bh$$

$$\text{Peso Propio} = A\rho = bh\rho$$

$$\text{Módulo resistente} = W = \frac{I}{\frac{h}{2}} = \frac{bh^2}{6}$$

Tamaño máximo para viga biapoyada:
$$L_{max} = \frac{8}{6} \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{\lambda}$$

Tamaño máximo de vigas no biapoyadas:
$$L_{max} = \frac{8}{6} \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{\lambda} \frac{M_i}{M_{max}}$$

(Siendo $\frac{M_j}{M_{max}}$ la relación entre el momento máximo (M_{max}) al que está sometida la viga y el momento isostático (M_i)).

De forma análoga, se puede aplicar esta expresión para la determinación de los tamaños máximos en perfiles metálicos u otras resoluciones estructurales, estableciendo un referente numérico de las capacidades dimensionales máximas (con cargas solo de peso propio). Este tipo de estudios permiten saber los marcos dimensionales que nos posibilita la técnica, aunque las problemáticas proyectuales engloban una mayor complejidad, tanto resolutive, como de esquemas de cargas, que minoran dichos factores dimensionales, así como los márgenes de seguridad con los que ha de contar la edificación.

A la hora de la proyectación es imprescindible conocer las limitaciones a la producción arquitectónica, ya vengan condicionadas por el material, el esquema resistente o los medios de cálculo y representación. Estos últimos como ya se ha expresado, desde hace unos años han dejado de coartar la producción arquitectónica, aunque son un factor a tener en cuenta en la lectura de la producción arquitectónica anterior. Como dice el propio Ludwig Mies van der Rohe ³⁰³: *“La tecnología tiene sus raíces en el pasado, domina el presente y tiende al futuro. Es un movimiento histórico real, uno de los grandes movimientos que conforman y representan su época. Únicamente puede ser comparado con el descubrimiento clásico de la personalidad humana, la voluntad de poder de Roma y el imperio religioso de la Edad Media. La tecnología es mucho más que un método, es un mundo en sí misma. Como método es excelsa en cada uno de sus aspectos, pero sólo cuando se expresa libremente, como en la construcción de máquinas o en las gigantescas estructuras de ingeniería se revela su verdadera naturaleza. Se hace evidente que no es solamente un medio útil. Que es, en sí misma, algo más. Algo que tiene un significado y una forma poderosos.*

³⁰³ Durante las décadas de 1940 y 1950, Frank J. Kornacker (1886-1969) fue el ingeniero estructural a cargo de la mayor parte de las obras de Ludwig Mies van der Rohe.

*¿Es esto Tecnología o es Arquitectura? Siempre que la tecnología consigue algo importante se convierte en Arquitectura. La Arquitectura depende de su tiempo, es la cristalización de su estructura interna y el lento despliegue de su forma. Esta es la razón por la que la Tecnología y la Arquitectura están tan estrechamente relacionadas. Nuestra esperanza es que crezcan juntas, que algún día una sea expresión de la otra.*³⁰⁴

En estas palabras de Mies queda claramente marcada una comprensión del panorama arquitectónico, coincidente con el expresado a lo largo del presente estudio. La expresión arquitectónica está indisociablemente ligada a la evolución de la técnica³⁰⁵ (Figura 174), presagiando ya en 1950 la exaltación técnica como medio de expresión arquitectónica, contemplando así el High-Tech como el paso evolutivo lógico. Así mismo establece la

Figura 174. Neue National Gallery, Berlín (Alemania), obra de Ludwig Mies van der Rohe (1965-1968).

³⁰⁴ Fragmento del discurso impartido por Ludwig Mies van der Rohe el 17 de abril de 1950, en el Hotel Blackstone, en Chicago.

³⁰⁵ Entendiendo técnica como el citado compendio de avances materiales, en esquemas resistentes y medios de cálculo y representación. La técnica es en sí misma “la divulgación y universalización del hacer. Tecnología como lógica de la Tecne. Tecne: como virtud de la poiesis, entendida como búsqueda de un bien emancipador de lo humano hacia el hacer. Como excelencia en el hacer.(...)”.

relevancia de los recursos técnicos, como elementos claramente condicionantes de la concepción arquitectónica, no siendo solo un medio, sino parte sustancial de la arquitectura, como parte del marco técnico de un tiempo. Anteriormente se ha explicado como obras realizadas durante estas últimas décadas, hace escasos años resultaban inviables por diversas causas, lo que pone de manifiesto la relevancia de la omnipresencia del factor técnico en la lectura arquitectónica. De esta manera, se hace posible entender los razonamientos que condujeron a la formalización de la obra, ya que desde los ojos de otro marco temporal y de capacidades resolutorias, este proceso puede conducir a inexactitudes y falsas interpretaciones. Como ya se ha expresado en repetidas ocasiones, a lo largo de toda la historia el hombre ha hecho lo que las circunstancias le han permitido, como marco de limitaciones que condicionan la producción arquitectónica. Un marco de referencia, sin el cual cualquier lectura de la obra arquitectónica resulta cuando menos imprecisa e inexacta, siendo una línea de conocimientos que ha de estar ligada a cualquier análisis histórico de la producción arquitectónica³⁰⁶.

La interdependencia de la concepción arquitectónica y estructural, como dos puntos de vista de un mismo cuerpo conceptual, la expresa claramente Heino Engel cuando dice: *“Toda forma material, es decir, todo objeto representado por una forma, está sometido fundamentalmente a la acción del peso propio (peso). Las demás fuerzas actuantes se deben, en primer lugar, a la función del objeto; en segundo lugar, a las propiedades y la estructura de la materia, y, finalmente, a las condiciones del entorno.*

Por lo tanto, la existencia de un objeto y de su forma, parte de la hipótesis de que el objeto puede resistir estas fuerzas; su condición descansa en su capacidad de soportar diferentes fuerzas. La consecuencia que concede esta capacidad es la estructura.

*Por ello, es válido lo siguiente: las formas materiales del entorno solo pueden existir gracias a su estructura y, con ello, satisfacer sus funciones. Las estructuras son los verdaderos guardianes de las funciones funcionales del entorno material, tanto natural, como técnico.”*³⁰⁷

Con sus palabras, Engel da fe de la implicación entre la resolución funcional y la estructural, haciendo de la estructura, la espina dorsal que organiza la concepción de la obra, dando sentido a la concepción espacial. A este punto de vista hay que sumarle que en el panorama actual, *“Ha aparecido la “gran ciencia”, grande por el volumen de sus recursos, (...) y, por tanto de su dependencia de su entorno económico, social y político. Los cuerpos de las ciencias y, en particular, de la investigación científica se nos muestran ahora entretreídos con las raíces mismas del desarrollo tecnológico y social. (...) [Hoy] Las interacciones entre las diferentes ciencias experimentan un fuerte incremento.*

La interdisciplinariedad no borra las distancias categoriales ni lleva al proceso de reabsorción de algunas ciencias en el seno de otras. Simplemente ocurre que a los “hombres de ciencia” han

³⁰⁶ Desde la presente tesis se intenta reclamar el puesto que le corresponde a la *“historia de la técnica”*, como medio imprescindible para la comprensión del proceso evolutivo que ha conducido hasta el panorama arquitectónico actual.

³⁰⁷ ENGEL, Heino, *“Sistemas de estructuras”* (título original *“Tragsysteme. Heino Engel”* (1975)), Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001, p. 23.

de desplegar conductas más versátiles en lo concerniente a sus adaptaciones a los procedimientos característicos de otras disciplinas. (...)”³⁰⁸. Esta visión del marco del conocimiento actual, como un inmenso compendio de conocimientos accesibles e interconectados, muestra la complejidad de los procesos reflexivos inherentes a la producción arquitectónica (aún en mayor medida que en otros ámbitos). Actualmente en el estudio se exige una coordinación interdisciplinar, que en muchos casos hace imprescindible la presencia de profesionales de otros ámbitos, como actores activos en la conformación de la obra. Entre ellos los ingenieros estructurales juegan un factor vital, como ya se ha visto, estando ligados ingenieros y ingenierías con la confección de los principales proyectos del panorama actual, como artífices de las obras de forma conjunta con los arquitectos, por lo que el papel de estos no resulta en ningún caso auxiliar, sino parte del grupo responsable de la proyectación.

Actualmente cuando hablamos de un sinnúmero de obras y en especial en el marco resolutivo de los proyectos de grandes luces, arquitectos e ingenieros son coautores de la obra, como dos polos del acto reflexivo del proyecto. Así los conceptos relativos a los límites dimensionales y las implicaciones relativas a la adopción de cada material o sistema resolutivo, no son un mero ejercicio teórico, sino parte del compendio de conocimientos con los que se puede trabajar en aras de una mayor adecuación a la problemática presente en cada obra. En el panorama actual, este tipo de conceptos de los límites marcados a la actuación técnica, no se aplican en la resolución real de los proyectos, pero en un futuro, podría ser una vía pragmática para la toma de decisiones. Si bien el tipo de cálculo expuesto se realiza como respuesta a un modelo previo, los medios de cálculo actuales hacen posible, tanto la confección de respuestas a un amplio número de soluciones previsibles, como una evaluación de la solución adoptada. Sin duda una nueva perspectiva, que enfrenta objetivamente las soluciones al concepto del “*óptimo*”, aunque como se ha puesto de manifiesto, no se puede evaluar la adecuación de una obra meramente desde un parámetro, ya que es una respuesta compleja a una problemática que atiende a múltiples factores, en algunos casos que exigen actuaciones opuestas³⁰⁹. Así solo desde la consideración del episteme³¹⁰ arquitectónico en su conjunto, se puede ser capaz, tanto de dar justa respuesta a los tiempos, como evaluar ésta. El “*episteme arquitectónico*” se concibe como “*la estructura cognoscitiva que comparten todos los discursos racionales de una edad de lo humano en la que los conocimientos, considerados fuera de cualquier criterio que se refiera a su valor racional o a sus formas objetivas, hunden su positividad y manifiestan así una historia que no es la de su perfección creciente sino la de sus condiciones de posibilidad*”. Así

³⁰⁸ BUENO MARTÍNEZ, Gustavo, “¿Qué es la ciencia?: La respuesta de la teoría del cierre categorial”, Oviedo (España), Opúsculos Pentalfa, 1995, p. 100.

³⁰⁹ Al referirnos a factores que exigen actuaciones opuestas, se puede hacer referencia, a título ilustrativo, a las estructuras laminares, que enfrentan la obtención del “*óptimo estructural*”, a la inapropiada adecuación a factores climáticos, derivados del escaso aislamiento. Así un factor loable desde cierta perspectiva, puede resultar adverso en otra. Este hecho pone de manifiesto, que una obra ha de evaluarse atendiendo a múltiples factores, siendo mejor o peor desde la perspectiva global de todas estas consideraciones.

³¹⁰ *Episteme*, según el Diccionario de la Real Academia Española es: El conjunto de conocimientos que condicionan las formas de entender e interpretar el mundo en determinadas épocas. Saber construido metodológica y racionalmente, en oposición a opiniones que carecen de fundamento.

nuevamente se expresa la realidad innegable de que el hombre está condicionado a su marco temporal y las capacidades resolutorias dictadas por éste.

Existen tres paradigmas que condicionan nuestra visión de la arquitectura y de las capacidades ligadas a un tiempo:

- El peso propio

Desde que en el siglo XVI se origina el conocimiento científico, se busca explicación a los límites resistentes de los materiales, investigando la definición, tanto de estos límites, como de forma consecuente la de las estructuras con ellos realizadas. Así de forma previa se conocen las limitaciones a las que se ve condicionada la producción arquitectónica, mediante el “*conocimiento científico*”, en contraposición con el “*conocimiento empírico*”, que dictaba anteriormente los límites de actuación en función de los colapsos estructurales acontecidos. Se pasa del valor de la memoria, al valor del análisis, para la determinación de los condicionantes dimensionales. En estos términos el hombre solo ha podido actuar en dos frentes. El primero, como ya había ocurrido con la arquitectura gótica, mediante la configuración de esquemas resistentes más óptimos, que exijan de un menor uso de material, reduciendo el peso propio de la estructura. El segundo, claramente ligado con la evolución de los materiales, acontecida en estos dos últimos siglos, está ligada a la mejora de las capacidades resistentes de los materiales, lo que lleva a que los elementos estructurales puedan ser más ligeros para cubrir un mismo vano. Así cualquiera de las actuaciones, comprende desde una u otra perspectiva, la reducción del peso propio como línea básica de actuación para aumentar los márgenes dimensionales alcanzables. Claro ejemplo lo encontramos en puentes como el Gran Puente de Akashi-Kaikyō (Figura 175), citado con anterioridad, en el que se emplea un esquema resistente óptimo, como el de los puentes suspendidos y donde el peso propio es el principal factor condicionante, dada la irrelevancia relativa de las cargas variables (a excepción de las cargas de viento). Así los límites dimensionales aplicables a cada material, dependen del esquema resistente empleado y de lo óptimo que éste sea.

Así mismo aparece la importancia del tamaño o “*escala*”, como factor del que dependen formalmente las soluciones. Este entendimiento, expresado por Galileo, nos muestra que según aumentamos el tamaño de los objetos, la masa de estos crece en relación al volumen (cubo de la dimensión), mientras que la resistencia está condicionada por el área de la sección (cuadrado de la dimensión), una diferencia de grado, que hace que en cualquier caso se incremente la masa más rápidamente³¹¹ y por tanto las cargas de peso propio a resistir. A este respecto Galileo enunció que “*si intentábamos construir barcos, palacios o templos de tamaño excesivo, las vergas, las vigas y pernos no podrían mantenerse unidas. Tampoco puede la naturaleza hacer un árbol o un animal superior a cierto tamaño, conservando las proporciones y empleando los mismos materiales que los utilizados en el caso de una estructura pequeña*”. A este respecto habla D'Arcy Wentworth Thompson en su libro “*Sobre el crecimiento y la forma*” (1917). Así el crecimiento se ve limitado por cuestiones escalares, que inciden sobre el peso propio de la edificación, como factor limitativo³¹².

³¹¹ Este paradigma de las estructuras naturales y artificiales lo formula Galileo Galilei en 1638 en “*Diálogos sobre dos Nuevas Ciencias*”.

³¹² Anteriormente se ha comentado que los límites dimensionales a la técnica se refieren a estructuras que solo se soportan a sí mismas. Por lo que los límites dimensionales aplicables en la práctica, son

Las reglas que regulan los límites al crecimiento de plantas, animales y estructuras de carácter natural, son de igual aplicación en los márgenes de la arquitectura, donde el hombre hasta el siglo XVIII ha actuado a través de la optimización de la forma y la consecuente reducción del peso propio para realizar obras de grandes luces. Esto solo cambia en el siglo XIX con la revolución de los materiales iniciada, que más allá de la incorporación de un nuevo material capaz de soportar esfuerzos tructores, demostró que las cualidades de los materiales eran una variable y que a través del conocimiento se podían mejorar sus cualidades, cambiando para siempre las reglas que definían los límites a la actuación humana. Hoy los materiales desarrollados a lo largo de los dos últimos siglos, han permitido un sorprendente incremento de los límites dimensionales, pero así mismo actualmente se encuentran en fases iniciales nuevos materiales que a lo largo del siglo XXI pueden suponer una nueva revolución a las pautas de actuación de la proyección arquitectónica y las grandes obras de ingeniería civil. Obras aparentemente de

Figura 175. Gran Puente de Akashi-Kaikyō (Japón, 1998). Comparativa dimensional entre tres puentes suspendidos de referencia.

inferiores, considerando las cargas variables que lleva asociada toda edificación en su vida útil y que han de estar contempladas desde la proyectación.

ciencia ficción como la de los ascensores orbitales³¹³, actualmente se están considerando³¹⁴, gracias a materiales como los nanotubos de carbono, que dan atisbos de que en un futuro este tipo de construcciones puedan ser una realidad.

Un personaje relevante del siglo XX, estudiante de Mies van der Rohe y Pier Luigi Nervi, es Myron Goldsmith (1918-1996), que desde su tesis de máster *“The Tall Building: The Effects of Scale”* (1953) reconoce la relevancia de la proporción en la producción arquitectónica. En este documento, entre otras cosas expone los márgenes de luces alcanzables en puentes con las distintas tipologías edificatorias empleadas (Figura 176)³¹⁵. En sus estudios muestra un razonamiento proyectual “gráfico-

Figura 176. Myron Goldsmith: Tipos de estructuras y puentes (1953).

³¹³ El primero en considerar el concepto de los ascensores orbitales fue Konstantin Tsiolkovski, tras el impacto que le produjo conocer en 1895 la Torre Eiffel. Esta obra inspiró a Tsiolkovski, pensando que *“en la Tierra el peso desaparece en el extremo de una torre con una altura de 34.000 verstas [36.000 kilómetros], o sea, cinco veces y media el radio de la Tierra”*. Este modelo desarrollado hace más de un siglo se acerca a los modelos considerados en la actualidad, motivados por los avances acontecidos en la ciencia de materiales en este lapso de tiempo. Los ascensores orbitales son un reto puro a las limitaciones dimensionales derivadas del empleo del material, por lo que dada la incapacidad de los materiales actuales, requieren de la experimentación y el surgimiento de un nuevo material que posibilite su aparición.

En 1960 Yuri Nikolaévich Artsutánov, realizó un estudio teórico en un intento de encontrar los medios para llevar este tipo de construcción a la realidad y así ganar la carrera espacial en la que se encontraba el país. En este caso la estructura considerada debería medir 46.000 kilómetros y el ascensor debería asemejarse a una locomotora eléctrica. Pero este modelo teórico requería de un material que soportara tensiones 20 veces superiores a las del acero, algo que no ocurriría hasta la década de 1990, cuando se descubrieron los nanotubos de carbono, lo que dio un nuevo impulso a este tipo de proyectos más allá de las capacidades de nuestro tiempo.

³¹⁴ A principios de 2012 la empresa japonesa Obayashi Corp. anunció sus intenciones de construir un ascensor orbital de 36.000 kilómetros, empleando cables formados por nanotubos de carbono. Otro proyecto es el de la empresa canadiense Thoth Technology, que ha patentado en Estados Unidos su propia versión de este proyecto, que alcanzaría los 20 kilómetros de altura, un margen dimensional más reducido, pero que se estima reduciría los costes para subir cargas hasta las naves que atracarían en su cúspide. Estos son unos de los muchos proyectos que apuntan a que en un futuro próximo este tipo de construcciones puedan llegar a materializarse, reduciendo los costes de transportar materiales y personas hasta la órbita terrestre.

formal-numérico", estructurado en torno a los siguientes conceptos:

- Existen múltiples tipos estructurales y cada uno lleva asociados unos márgenes dimensionales máximos y mínimos concretos.
- Según se aumenta el margen dimensional de actuación, las técnicas disponibles se reducen, condicionando el tipo de soluciones empleadas.
- La expresividad arquitectónica está ligada a la elección del tipo estructural, condicionado por los márgenes dimensionales.

Así desde este planteamiento se enfoca la producción arquitectónica como un conjunto de elecciones dentro del margen técnico y dimensional, realizable. Un conocimiento previo de las capacidades y de las soluciones técnicas entre las que se puede optar, condiciona la producción arquitectónica. Este enfoque permite, tanto una elección más directa de los esquemas capaces, como una mayor libertad en el desarrollo de los mismos, conociendo los márgenes de actuación concretos de cada solución.

Del trabajo de David Sharpe en 1962, Myron Goldsmith saca como principal conclusión que para luces de 50 pies (15,24 metros) todos los tipos estructurales son igualmente capaces de dar respuesta, pero ya con luces de 100 pies (30,48 metros), las diferencias entre el comportamiento de los distintos tipos estructurales se incrementan, apareciendo la *"eficiencia"*, como factor decisivo para la elección. Así según Goldsmith las tres líneas básicas organizativas que estructuran la elección del tipo de construcción son, las edificaciones: largas, altas o extensas³¹⁶.

Desde esta perspectiva, se pone de manifiesto la vital relevancia del peso propio, como factor del que dependen, tanto el diseño, como los límites dimensionales, el *"alcance"*. Enlazando con el concepto anteriormente explicado de los límites dimensionales correspondientes a cada material y esquema resistente, del que vimos la formulación de la limitación dimensional, mediante la expresión³¹⁷:

$$L_{max} = \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{A\lambda + \frac{B}{\lambda}}$$

La *"forma resistente"* se constituye como entendimiento de la generación espacial, es tanto una variable de las opciones dimensionales, como un medio de diseño de la

³¹⁵ Se recuerda que a este respecto en la presente tesis, se ha desarrollado un esquema análogo desde la perspectiva técnica actual.

³¹⁶ Las construcciones *"largas"* hacen clara referencia a la problemática presente en los puentes, las *"altas"* a los edificios en altura y las *"extensas"* a los proyectos arquitectónicos que emplean las grandes luces.

³¹⁷ Esta expresión se deriva del trabajo y formulaciones de personajes como: Galileo Galilei, Maxwell y Michel, así como de los estudios realizados en la Universidad Politécnica de Madrid por Joaquín Ruiz Hervás, José Luis de Miguel y Ricardo Aroca Hernández-Ros, entre otros, que han establecido unas bases de cálculo para el desarrollo del concepto del óptimo resistente y la evaluación de soluciones. De estos trabajos se han derivado otros estudios, como el de Jaime Cervera Bravo, *"Concebir y analizar estructuras"* (2011), que hoy son referente de este tipo de análisis.

espacialidad proyectual, derivado del razonamiento resistente. Así a lo largo de la taxonomía proyectual realizada con anterioridad, se establece una clara distinción entre aquellos proyectos en los que este tipo de consideraciones resistentes y de preocupación sobre el peso propio, están presentes y aquellas en las que se busca un efecto escenográfico sin llevar asociada una reflexión en este tipo de aspectos. Ambas opciones reflejan procesos de pensamiento claramente diferenciados y condicionantes muy distintos. Los proyectos realizados partiendo de un esfuerzo estructural sincero, se muestre o no, resultan de mayor valor a la hora del avance proyectual de la arquitectura. Ya sea mediante la reinterpretación de modelos estructurales consolidados o la experimentación de nuevas configuraciones, el esfuerzo derivado del proceso proyectual va más allá de la mera materialización, para ser una prueba de la validez resolutoria de una propuesta. Ejemplo de ello serían buena parte de los proyectos en los que interviene Schlaich Bergermann und Partner, aportando en todos ellos una visión personal a la resolución estructural, estableciendo el conjunto de su producción como una sinergia positiva en el conjunto evolutivo de la arquitectura e ingeniería, que apunta a los razonamientos propios del siglo XXI³¹⁸. En sus obras se ve un especial interés por las estructuras ligeras, donde adquieren especial relevancia los conceptos expuestos de “*cantidad de estructura*”³¹⁹, cuya evaluación futura puede dar lugar a una nueva clasificación de las opciones resolutorias de las que se cuenta.

En base a los desarrollos numéricos anteriormente explicados de este concepto, se dedujo que la L_{max} para vigas rectas biapoyadas de sección rectangular era:

$$L_{max} = \frac{8 \sigma}{6 \rho} \frac{1}{\lambda}$$

En base a esta formulación, a efecto ilustrativo podemos ver las luces alcanzables con una sección maciza de acero A-42. Con este material cuando estudiamos el “*alcance*”, la longitud máxima de servicio se estableció que es de 2.200 metros. Así el Tamaño máximo (T_{max} o L_{max}) en función de la esbeltez (λ) es:

³¹⁸ Al referirnos a los razonamientos propios del siglo XXI, no se niega la aplicación de dichos modos de resolución proyectual en el siglo XX, pero se reconoce su especial relevancia dentro de la forma de actuar, que marcará el nuevo siglo.

³¹⁹ Este concepto ha sido desarrollado en capítulos anteriores, por lo que en el presente punto no se realiza un mayor tratamiento de este criterio.

λ	T_{max}	5% T_{max}	-	20% T_{max}
8	366 m	18 m	-	73 m
10	293 m	15 m	-	58 m
12	244 m	12 m	-	48 m
14	204 m	10 m	-	40 m
16	183 m	9 m	-	36 m
18	162 m	8 m	-	32 m
20	146 m	7 m	-	29 m
25	117 m	6 m	-	23 m

En el ámbito constructivo las estructuras se encuentran lejos de emplear el tamaño máximo, estando los márgenes óptimos de aplicación comprendidos entre el 5% y el 20% del tamaño máximo. Este margen es el que se define como de validez de una solución.

$$5\%T_{max} \leq L_{optima} \leq 20\%T_{max}$$

Por su parte la expresión de L_{max} correspondiente a los perfiles de caras paralelas y alma llena es:

$$L_{max} = 2,5 \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{\lambda}$$

De forma análoga a la anterior el Tamaño máximo (T_{max} o L_{max}) en función de la esbeltez (λ) para perfiles de caras paralelas y alma llena de acero A-42 es:

λ	T_{max}	5% T_{max}	-	20% T_{max}
8	687 m	34 m	-	137 m
10	550 m	27 m	-	110 m
12	458 m	23 m	-	92 m
14	392 m	20 m	-	78 m
16	343 m	17 m	-	69 m
18	305 m	15 m	-	61 m

20	275 m	14 m - 55 m
25	220 m	11 m - 44 m

El incremento de las luces alcanzables, está claramente relacionado con la optimización de la sección, distribuyendo el área resistente de forma más eficiente. Se concentra en las alas, en el extremo superior e inferior, aumentando el brazo de palanca del área resistente sometida a tracciones y compresiones, derivadas de la resistencia a esfuerzos flectores. Así la masa de la zona central, que resulta menos eficiente y añade carga de peso propio, se limita a la necesaria para resistir los esfuerzos cortantes. Así el diseño de la sección, influye de forma decisiva en los límites de actuación de las estructuras.

Este es un ejemplo concreto, pero como ya se ha dicho resulta extrapolable al general de las estructuras, pudiendo ofrecer una visión de los márgenes de actuación de los que se dispone y la idoneidad de la solución adoptada³²⁰. Desde el conocimiento resistente, se muestran las opciones a la elección de materiales, sistemas estructurales y factores tan relevantes como la esbeltez de los elementos empleados.

En los márgenes comentados se ha establecido un tamaño mínimo, aunque no se encuentra limitado por una imposición resistente, sino por una estadística dictada de la práctica constructiva que marca los márgenes de la racionalidad constructiva. A este respecto Ricardo Aroca hace *“dos reflexiones, una como síntoma y otra como criterio:*

- *Son frecuentes las estructuras demasiado complejas para el tamaño que tienen. En Europa, por ejemplo, los rascacielos tienen una complejidad mayor que la que les corresponde por su tamaño.*
- *Los edificios que hacemos no deberían tener un tamaño menor que el 5% del tamaño máximo de su esquema proporción.”*

³²⁰ En el presente estudio no se pretende realizar un compendio de cálculos que reflejen los límites pormenorizados de las distintas soluciones estructurales, pero sí mostrar que existen las vías para ello y el interés de la consecución de dicho estudio futuro, en base a los medios de cálculo disponibles. Una línea de investigación, que como se ha demostrado ya está activa desde hace décadas, pero que desde el ámbito proyectual es necesario que se motive, enlazando los conceptos resistentes y de proyectación, como así por naturaleza se encuentran intrínsecamente relacionados.

- El análisis numérico

Como se ha puesto de manifiesto en numerosas ocasiones, en buena parte, el avance producido durante los dos últimos siglos, es debido al cambio de un modelo de dimensionado basado en el “*conocimiento empírico*”, a otro fundamentado en el “*conocimiento científico*”. Hasta el siglo XVIII, los límites dimensionales de aplicación estaban dictados por la experiencia acumulada con el transcurso de los siglos y los numerosos colapsos estructurales acontecidos. A partir del siglo XIX entra a efecto el cálculo numérico como medio de dimensionado previo de las estructuras, empleando soluciones que numéricamente se podían determinar como seguras. A este respecto el hombre empezó a limitar su producción a los esquemas resistentes que resultaban abarcables por los medios de cálculo disponibles, lo que a su vez estableció los avances en el cálculo numérico como medio de ampliar el marco proyectual calculable y por consiguiente realizable³²¹.

Este cambio de pensamiento lo origina Galileo Galilei (1564-1642), cuando publica en 1638 “*Diálogos y consideraciones sobre dos nuevas ciencias*”, en este momento establece las bases para el análisis de la “*resistencia de los cuerpos sólidos a la fractura*”. Sobre estos datos experimentarán poco después Robert Boyle (1627-1691) y Edme Mariotte (1620-1684), quienes formularán de forma independiente la ley que relaciona el volumen de los gases y la presión ejercida sobre una cierta cantidad de gas a temperatura constante. A ésta se le llama ley de Boyle-Mariotte o ley de Boyle, siendo formulada por Boyle en 1662 y por Mariotte en 1676.

La mecánica clásica es insuficiente para abarcar gran parte de las problemáticas estructurales, ya que no es válida para los problemas hiperestáticos. En este punto Robert Hooke (1638-1703) investiga sobre la elasticidad y la respuesta de los cuerpos físicos ante las fuerzas aplicadas en ellos y en consecuencia sobre las deformaciones. A este respecto publica en 1678 “*De Potentia Restitutiva*” o “*Of Spring*”, definiendo el comportamiento elástico de los muelles y las propiedades elásticas de los cuerpos. Posteriormente Jacob Bernoulli (1654-1704) y John Bernoulli (1667-1748) investigan las deformaciones de vigas rectas. Los hijos de John, Daniel Bernoulli (1654-1704) y Nicholas Bernoulli (1687-1759), ayudarán a Leonhard Euler (1707-1783) en la formulación de las deformaciones de algunos cuerpos elementales. Habría que esperar a comienzos del siglo XIX para que Thomas Young (1773-1829), publicara “*A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*” en 1807. Este texto introduce por vez primera el término “*Módulo de elasticidad*”, en el análisis de las deformaciones de barras prismáticas. Así mismo observa que la validez de la ley de Hook, solo resulta aplicable hasta un cierto límite, sobre el cual las deformaciones ya son de carácter permanente.

³²¹ A este respecto encontramos numerosas obras, que pese a la imposibilidad de su cálculo en el momento de su realización, a través del conocimiento y la racionalidad resolutive, fueron llevadas a término. Pero en el panorama general de las edificaciones, el cálculo al tiempo que se constituía como vía resolutive para el dimensionado de las estructuras, se impuso como límite a la actuación del hombre.

A Agustín Cauchy (1789-1857) debemos la definición de la noción de tensión como *“fuerza uniforme por unidad de superficie o de presión sobre un plano”*, en su publicación en 1821 de *“Curso de Análisis de la Escuela Politécnica”*. Por su parte, Claude-Louis Navier (1785-1836) formula ese mismo año 1821, la teoría general de la elasticidad en forma de una ecuación matemática, fijando *“la forma de las ecuaciones diferenciales del equilibrio para un elemento paralelepípedo rectangular”*. En 1826 publica *“Resumen de Lecciones de Mecánica”*. Navier enfrenta el modelo empírico de conocimiento, en el que estaba fundamentado el dimensionado hasta el siglo XVIII, con el método científico, basado en el conocimiento del comportamiento elástico de las estructuras, previo a la fase plástica y posterior colapso. Así, Navier sugiere calcular mediante las fórmulas de cálculo elástico las edificaciones existentes, deduciendo de la experiencia los coeficientes de seguridad aplicables a las nuevas estructuras, dimensionadas ya partiendo de dichos medios de cálculo. Posteriormente formula las *“Ecuaciones diferenciales de Navier para el equilibrio de los cuerpos elásticos isótropos”*, en el que aplica simplificaciones en las notaciones, lo que implica la autorreferencia y la autojustificación. Siméon Denis Poisson (1781-1842), de forma continuista con los conceptos expuestos por Cauchy en 1821 y Navier en 1826, publica varios documentos, entre ellos sus memorias y un *“Tratado de Mecánica”*. En este último, partiendo de un sistema de partículas en equilibrio sobre el que actúan fuerzas moleculares, obtiene tres ecuaciones de equilibrio y tres condiciones de borde.

Barre de Saint Venant (1797-1886), presenta en 1853 su memoria sobre la torsión y en 1864 realiza unos comentarios sobre *“Resumen de Lecciones de Mecánica”* de Navier. Establece que se pueden calcular las tensiones rápidamente en cualquier punto de un cuerpo *“sustituyendo las funciones conocidas $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$ y $w(x,y,z)$ en las expresiones de Navier y derivando”*, obteniendo así *“las expresiones de las deformaciones unitarias y de los giros unitarios y las componentes de la tensión que pueden obtenerse utilizando la ley de Hooke”*. Además realiza la definición definitiva del concepto tensión como *“la resultante de todas las acciones que las moléculas situadas a un lado del plano que se considera ejercen sobre las moléculas del otro”*. Así dividiendo la presión total sobre la superficie, entre la superficie considerada, se obtiene el valor de la tensión.

Este recorrido histórico, muestra algunos de los acontecimientos vitales que han marcado el sendero del pensamiento científico de las estructuras desde Galileo³²², perfeccionando y refinando el conocimiento, en busca de la comprensión del comportamiento interno de la materia.

El pensamiento contemporáneo de las edificaciones, está intrínsecamente ligado a los medios de cálculo disponibles y los procesos informáticos que hacen posible su aplicación a un nivel inconcebible en otros tiempos. Hoy prácticamente cualquier estructura resulta calculable en base al establecimiento de un cálculo matricial, con matrices de enormes proporciones, imposibles de resolver mediante procedimientos

³²² A este respecto se realiza un recorrido más amplio y meticuloso en el apartado *“Avances en los medios de cálculo. Conocimiento resistente como apriorismo dimensional y limitador formal”*.

manuales. A este respecto se ha hablado con anterioridad y se ha hecho referencia a la importancia del método de elementos finitos, actualmente empleado en los medios informáticos para la resolución del cálculo de las estructuras.

El método matricial reduce el cálculo estructural a un proceso sistemático, para cuya resolución son suficientes unos conocimientos básicos de álgebra, matrices y vectores, sumados al conocimiento de los teoremas básicos que rigen el comportamiento estructural. *“Los métodos matriciales de análisis son de una gran simplicidad y se podría decir que no han aportado grandes ideas conceptuales al análisis de estructuras. Son una evolución de las ideas de Maxwell y Mohr de finales del siglo XIX”*³²³. Este proceso de cálculo, solo encuentra su aplicación práctica en el momento en que entran en escena los ordenadores y especialmente desde las últimas décadas del siglo XX hasta nuestros días. Este método se ha convertido en la vía universal para el cálculo de cualquier estructura. Así a lo largo del siglo XX la capacidad dimensional, espacial y de diseño de la arquitectura se ha encontrado ligada a la evolución de los ordenadores, aplicando medios de cálculo que precedieron a la aparición de un medio capaz de realizar dichas operaciones a un nivel práctico, aplicable en el general de las edificaciones.

Parte de la lingüística arquitectónica, encuentra fundamento en el cálculo numérico que da origen a las formas racionales, que materializadas establecen la obra como respuesta a las capacidades de un tiempo, tanto desde el punto de vista material y técnico, como en lo que nos atañe del *“conocimiento resistente”*, el cual desde la aparición del cálculo moderno³²⁴ ha estado ligado a los cálculos numéricos y los elementos diferenciales. Así a partir de este momento, la resolución de un pilar o una viga con acciones en los nudos, se podía reflejar mediante una integral en un entorno definido y conocido de las formulaciones generales de la elasticidad.

Todo lo explicado en relación al *“peso propio”* de las estructuras, sería imposible sin los medios de cálculo, que son la herramienta fundamental del conocimiento resistente. Pero más allá de los medios de cálculo, solo mediante los recursos informáticos se pueden resolver el gran número de ecuaciones necesarias para la resolución de las estructuras, atendiendo a la interferencia, no solo de las acciones sobre cada pieza, sino el impacto del comportamiento de cada pieza sobre las demás. Los programas de cálculo de estructuras actuales resuelven de forma rápida cálculos matriciales de proporciones anteriormente inabarcables por medios manuales.

³²³ PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006, p. 6.

³²⁴ La paternidad del cálculo moderno se le atribuye a Issac Newton (1642-1727) y a Gottfried Wilhelm Leibnitz (1646-1716). Estos dos personajes, actuando de manera independiente, desarrollaron las bases del cálculo moderno, aunque se desconoce cuál fue el artífice original, lo que ha llevado a un debate sobre quien plagió a quién. Pero Newton (inglés) en su carrera logró hacerse con la presidencia de la Royal Society y desde esa ventajosa posición convocó un *“tribunal imparcial”* que hundió en la miseria a Leibniz (alemán), desacreditándole en el panorama público.

Esta capacidad resolutoria ha permitido calcular de forma directa la estructura deseada, empleando el cálculo elástico. Anteriormente las estructuras más complejas requerían en muchos casos la realización de un modelo simplificado abarcable, que diera un resultado aplicable al modelo real. Así mismo el cálculo plástico es más abarcable, por lo que resultaba la principal vía para la determinación dimensional de las estructuras, definiendo el modelo en el que se produce el colapso, aplicando sobre éste unos márgenes de seguridad suficientes para garantizar el correcto funcionamiento de la estructura. Las simplificaciones orientadas a definir un modelo abarcable para los medios de cálculo disponibles, se hacen patentes en un sinnúmero de obras, cuya resolución formal se ve limitada por este condicionante. Así el análisis numérico y sus limitaciones se ven como una imposición sobre la resolución arquitectónica, que determina los márgenes a los que se puede llegar, desde el punto de vista de la configuración resistente.

Desde que los medios de cálculo se establecieron como sistema de dimensionado de las estructuras y como garantía de la seguridad de la edificación, han marcado las pautas resolutorias de las estructuras, estableciendo tanto las limitaciones dimensionales, como formales. Así toda obra fuera de las capacidades de cálculo, pasó a considerarse fuera de los márgenes de lo construible, aunque se pueden encontrar obras, que desde la cautela, sobrepasan estos límites con el convencimiento previo de la experiencia que hace presagiar su funcionamiento. Este tipo de casos son la excepción que confirma la regla y en el momento de su realización fueron la constatación de lo lejos que aun se encontraban los medios de cálculo de reflejar las capacidades reales de la construcción, algo a lo que solo mediante el método matricial y su resolución informatizada, se ha alcanzado. Si hoy comparamos cualquier obra actual, con un modelo equivalente realizado de forma previa a este tipo de recurso, se ve como más allá de las consideraciones estéticas y funcionales relativas a cada momento, las capacidades de cálculo han sido la limitación que ha establecido la mayor diferenciación.

En la actualidad, a la hora del dimensionado de las estructuras, nos encontramos que el factor resistente no es el mayor limitativo, sino las deformaciones de la estructura (Figura 177). Así mucho antes de que se produzca el colapso, las deformaciones de los elementos resistentes resultan inasumibles para el correcto uso de la edificación, por lo que este factor es el determinante de las dimensiones de la estructura. Por consiguiente, se establecen unos márgenes que definen las deformaciones aceptables, sin producir interferencias funcionales en la edificación. Normalmente las deformaciones aceptables, dependiendo de la finalidad son $L/300$ o $L/500$, estableciendo un valor máximo a la flecha, que actúa de factor limitativo a las dimensiones alcanzables³²⁵. Estos márgenes definen un marco en el que se mantiene el “*comfort*” en el uso de la edificación.

³²⁵ En el apartado del peso propio, a la hora de definir el tamaño máximo, se aludía a que el límite dimensional óptimo se encontraba en el 20% de T_{max} . Esta reducción de los márgenes no es dictaminada por la resistencia, sino por la deformabilidad de los elementos estructurales, marcando de forma aproximada un límite de referencia que cuenta con este factor.

Así hoy se contempla el panorama edificatorio desde una capacidad de cálculo casi absoluta, que posibilita cualquier resolución proyectual imaginable, como una opción en los márgenes de lo analizable. Esto otorga una libertad de actuación mayor que en cualquier momento de la historia, lo que a su vez nos exige la consciencia de este factor a la hora de contemplar la producción arquitectónica previa, poniéndola en contexto con las capacidades de cálculo disponibles. Ese factor resulta considerablemente más relevante en las obras arquitectónicas que emplean grandes luces, ya que llevan al límite las capacidades resolutorias del momento, conformando obras, que dentro de su contemporaneidad³²⁶ resolutoria, ofrecen un fiel reflejo del momento que las dio lugar. Solo desde esta perspectiva de las capacidades resolutorias, se puede encarar la arquitectura del siglo XXI con la altura de miras que exige y la perspectiva de que el progreso resolutorio de la arquitectura, ya no recaerá en la mejora del conocimiento resistente, sino en las mayores capacidades de los materiales, hoy surgidos de la experimentación en laboratorio.

Figura 177. Evaluación estructural de una viga de hormigón deteriorado por corrosión en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

³²⁶ Al hablar de la contemporaneidad de las obras, se hace referencia a su marco temporal concreto. Estas obras emplean cuantos recursos son propios del momento, lo que hace a una obra propia de un momento histórico, no pudiendo en muchos casos materializarse en los mismos términos en otro marco temporal, anterior, ni posterior.

- El conocimiento científico

Indudablemente el panorama técnico y científico ha evolucionado a gran velocidad durante los dos últimos siglos. Esto ha conducido a que la producción arquitectónica refleje en su resolución tales avances, tanto desde el punto de vista dimensional, como resolutivo. Así ya la clásica crítica de la arquitectura en términos lingüísticos resulta insuficiente, requiriéndose un nuevo punto de vista, una *“crítica científica”*, como la que propone Antonio Miranda. Un término que solo durante el siglo XX encuentra justificación, para la lectura arquitectónica, analizando los medios y fines de las acciones que conforman el proyecto, como acto reflexivo, plenamente arraigado en el momento concreto de la realización de la obra.

La lógica y capacitaciones derivadas de los avances científicos y del conocimiento, encuentran en algunas obras un reflejo, no solo de sus resultados, sino de su propia estética. Se produce una exteriorización de los medios que hacen posible la obra. Este tipo de razonamiento está claramente ligado con las bases de la arquitectura High-Tech. Así la lingüística empleada en los siglos anteriores, fundamentada en una sensibilidad artística, que concibe la producción arquitectónica en tales términos, se sustituyó gracias al movimiento moderno, por una estética basada en la lógica resolutiva y en formas autorreferenciadas a la propia obra. Pero en las últimas décadas del siglo XX, el High-Tech y su expresión de los medios que dan lugar a la obra y la hacen posible, inició una nueva lingüística estética, que como en el movimiento moderno se encuentra autorreferenciada, pero que al basar su expresión en los medios materiales y constructivos, establece la obra como fiel reflejo de un tiempo. Este tipo de concepción ha calado en las bases arquitectónicas contemporáneas, convirtiéndose en parte de la dialéctica empleada, principalmente en aquellas obras que destacan por una excepcionalidad resolutiva digna de ser objeto de alarde, algo que indudablemente se encuentra plenamente ligado a los proyectos de grandes luces. Este tipo de obra hace uso de los avances disponibles, tanto para ampliar sus rangos dimensionales, como para actuar más eficientemente ante una problemática dimensional prefijada. Así mismo el mayor conocimiento resistente ligado a las capacidades de cálculo, hace posibles nuevas conformaciones formales, que en sí, son un alarde de las capacidades resolutivas de un tiempo, al resultar inviables solo unos años atrás. La frontera entre medios y finalidad, se diluye, apareciendo campos comunes, intentando que la resolución proyectual goce de sentido bajo cualquier perspectiva, desde la resolución funcional y espacial, a la estética y expresiva.

Esta comprensión de los límites resistentes y las capacidades de las soluciones de grandes luces para generar un microcosmos ideal para la vida del hombre, se ve claramente reflejado en el proyecto de la Cúpula sobre Manhattan (Figura 178) (1960), de Richard Buckminster Fuller. Este proyecto proponía cubrir un diámetro de dos millas (3.219 metros), generando un “nuevo exterior”, climatizado y protegido de las inclemencias meteorológicas. Las extraordinarias dimensiones, permiten entender la superficie de la edificación como un nuevo firmamento y el espacio, casi como un exterior dentro del que se guarece la propia ciudad. Esta propuesta, desde el punto de vista económico, permitiría reducir los gastos en el mantenimiento de las condiciones

Figura 178. Proyecto “Cúpula sobre Manhattan” (Estados Unidos), obra de Richard Buckminster Fuller (1960).

higrotérmicas adecuadas. Así se concibe este tipo de soluciones como el máximo exponente de adaptación del medio a las exigencias del hombre. En esta obra, más allá de la forma, se percibe la capacidad resolutive de un proceder. Esta obra se quedó a un nivel propositivo, pero, ¿quién puede poner en duda el impacto que hubiera tenido sobre la sociedad una obra como esta? La propuesta logra transgredir todas las percepciones que tiene el hombre de los límites dimensionales y la materialidad de la propia estructura, que pasa a ser un elemento prácticamente etéreo ante el espacio a cubrir.

Herederos de este tipo de pensamiento, son obras como la cubierta del Estadio Olímpico de Múnich (Alemania) (Figura 179), realizado por los arquitectos Günther Behnisch y Frei Otto y los ingenieros Jörg Schlaich y Rudolf Bergermann. Esta obra difiere en la conformación formal y resistente, pero conserva ese espíritu de liviandad, apareciendo la cubrición como ente casi etéreo, que hace alarde de las capacidades resolutivas de un tiempo. Esta cubierta está compuesta por una malla de cables pretensados, con formas antifuniculares, sosteniendo una fina lámina de poliéster revestida de PVC. Esta opción resolutive proporciona una imagen etérea del elemento constructivo, que parece desvanecerse y flotar sobre los graderíos, que se entienden como parte de la arquitectura ligada al terreno. Así se diferencia una arquitectura aérea, de otra ligada

Figura 179. Estadio Olímpico de Múnich (Alemania), obra de los arquitectos Günther Behnisch y Frei Otto y los ingenieros Jörg Schlaich y Rudolf Bergermann (1968-1972).

al terreno³²⁷. En esta obra se percibe toda la resolución resistente en un acto, tanto de sinceridad constructiva, como de exaltación técnica.

Otro ejemplo, más directo, es el Eden Project en Cornwall (Reino Unido) (1996-2001) (Figura 180), obra de Nicholas Grimshaw. Este invernadero recrea ambientes diversos, en unidades independientes que denominaron “biomes”. Este proyecto está claramente ligado a las cúpulas geodésicas desarrolladas por Richard Buckminster Fuller (1895-1983). Sin el aspecto cristalino de la propuesta para Manhattan de Fuller ni las dimensiones de éste, se plantea un proyecto capaz de recrear ambientes naturales y gestionar eficientemente los factores higrotérmicos, para recrear las condiciones de distintas partes del mundo. Este proyecto podría enclavarse en cualquier parte del globo y no perdería su esencia, denotando su universalidad. Esta es una vía para el desarrollo y gestión de la espacialidad del hombre, aunque escasamente realizada. En esta obra la lámina que conforma la cubrición se realiza mediante tetraetileno de flúor (ETFE), que aúna gran resistencia, dureza y ligereza, al tiempo que permite un correcto paso de la luz, es mucho más aislante que el vidrio y es reciclable. Esta obra, más allá de su forma, parte y se expresa mediante un razonamiento científico que llega a materializar la obra como un microcosmos, en este caso enfocado a recrear ambientes diversos, pero que bien podrían aplicarse para las propias

Figura 180. Eden Project en Cornwall (Reino Unido), obra de Nicholas Grimshaw (1996-2001).

³²⁷ Este tipo de análisis, se realiza más en detalle en el capítulo “Taxonomía proyectual ligada a los proyectos de grandes luces”.

condiciones requeridas por el hombre³²⁸.

*“La nueva lógica anónima quiere la superación del delirio moderno, la comprobación multiplicada para acotar la Razón Moderna, la convivencia productiva de paradigmas científicos para comprobar lo tolerable o aceptable de una verdad. Pero de verdades científicas. La convivencia de varios paradigmas científicos en un rigor exigible y accesible a todos ello”*³²⁹. Así las posibilidades de las que disponemos en nuestro tiempo, exigen a su vez una mayor reflexión sobre la finalidad de toda acción. Si antaño la problemática residía en la *“capacidad resolutive”*, hoy superada dicha fase, nos encontramos ante la *“justificación resolutive”*. En un panorama en el que prácticamente cualquier espacio es representable, calculable y materializable, cobra vital relevancia el acto reflexivo que define el marco apropiado de la actuación. Esto es así porque la complejidad relativa a la proyectación, ha imposibilitado la aparición de un método sistemático para la resolución arquitectónica, como sí que ha ocurrido en otras áreas del conocimiento.

Como dice Antonio Miranda: *“Han pasado suficientes hechos desde Aristóteles para que sigamos identificando Poética con Retórica. La Retórica – nuestra Tipología – es una disciplina cuyo objeto son las diferentes formas dirigidas a una función y no a la forma en sí misma. La Tipología, la Construcción y la Semiología son únicamente ciencias parciales de la arquitectura. Únicamente la Poética consigue hacer de las tres una síntesis”*. Entendida la poética como el modo de hacer del arquitecto, combinando: sentidos, razón, intelecto e intuición. En el estudio se sopesan las variables proyectuales hasta dar como resultado la obra materializada. Así el estadio técnico y del conocimiento de un momento concreto, se constituye como único marco en el que tal reflexión resulta consecuente, modificándose dicho contexto con el paso del tiempo. Solo así una obra puede ser calificada de contemporánea. Este razonamiento es aplicable a todas las escalas, pero la cercanía de la solución a los límites dimensionales hace más patente este hecho. Así mismo Miranda intenta definir como *“ciencia”* la crítica arquitectónica, dando en tal definición una visión global de la problemática resolutive: *“Si entendemos las ciencias formales como aquellas cuyo objeto es el discurso sobre objetos formales (noúmenos) creados por el discurso o interiores a él; las ciencias naturales como aquellas cuyo objeto es el discurso sobre objetos reales y materiales (fenómenos) exteriores al discurso; y como ciencias humanas aquellas en que son inseparables el objeto y el sujeto, el discurso y el objeto del discurso (...) se puede enclavar a la arquitectura como una ciencia que es a la vez humana, natural y formal. Paralelamente hemos atribuido a la arquitectura una unidad que se desarrolla en tres grandes ramas: tipología, construcción, iconología, y hay que congratularse por el hallazgo porque vienen a corresponder con los tres grandes parámetros vitruvianos;*

³²⁸ Este tipo de soluciones, en el cine de ciencia ficción, han aparecido aplicadas en la colonización de nuevos mundos, como forma en la que el hombre adecuaba una pequeña porción de estos para contener su existencia. Este hecho da fe del razonamiento funcional y la extensión que dichas ideas podrían llegar a alcanzar.

³²⁹ Reflexión realizada por Antonio Miranda.

*Utilitas, Firmitas y Venustas que a su vez son el correlato de los tres ejes disciplinares de la arquitectura; Social, Técnico y Estético que vienen a encontrar, respectivamente su forma científica en los tres grandes grupos tradicionales de documentos arquitectónicos: Secciones, Plantas y alzados*³³⁰. Esta visión, correlaciona el entendimiento clásico de la arquitectura con la concepción actual. Pese a la vital relevancia de los tres factores, la historia de la arquitectura se ha centrado claramente en la “venustas”, que se relaciona con la “utilitas” y el marco social en que se genera la obra. Así la “firmitas”, aparece de una forma escindida a la hora de su planteamiento histórico. Precisamente este punto es el que pretende aclarar el presente texto, otorgando, desde la visión técnica, un entendimiento de la evolución histórica de los dos últimos siglos y del panorama actual, como marco en el que se puedan ampliar los conocimientos y un nuevo entendimiento de la producción arquitectónica, desde el contexto técnico en que se ha producido. Como ya se ha dicho en repetidas ocasiones, el hombre a lo largo de toda la historia no ha hecho lo que ha querido, sino lo que las circunstancias le han permitido.

Desde este punto de vista de la producción arquitectónica, concebida desde estrategias de diseño relacionadas con la resolución estructural, encontramos a Cecil Balmond, como personaje que ejemplifica este tipo de interés y las potencialidades de estos procesos de pensamiento en la proyección arquitectónica. Este artista, arquitecto y escritor, desde su labor como parte de Ove Arup & Partners desde 1968, centra su labor en estos términos, destacando la importancia de:

- La evolución y el desarrollo de los distintos sistemas estructurales empleados, como base para la reinterpretación de los mismos.
- Los distintos sistemas estructurales pueden actuar de forma coordinada en un mismo proyecto, ya que como resolución de las partes se puede confeccionar el conjunto.
- La coordinación de las labores entre arquitectos e ingenieros para la conformación del proyecto es vital, no siendo actividades paralelas, sino una colaboración continua, que determina el resultado final.

Con estos principios en mente, Cecil Balmond hace una distinción entre tres vías para la generación de la forma estructural:

“El primer camino es partir de elementos tectónicos y utilizarlos en condiciones extremas. La casa en Burdeos es un buen ejemplo, en el que la configuración de la mesa se transformó. (...)”

³³⁰ En esta cita la correlación se encuentra mal expresada, siendo la siguiente correspondencia:

- Clase de ciencia:	Humana	Natural	Formal
- Ciencia arquitectónica:	Tipología	Construcción	Iconología
- Parámetros vitruvianos:	Utilitas	Firmitas	Venustas
- Eje disciplinar:	Social	Técnico	Estético
- Forma científica:	Plantas	Secciones	Alzados

El segundo método es la línea generativa (Figura 181). Parto de una línea y la muevo a través del espacio en tres dimensiones. Este sistema ha generado formas interesantes. Se trata esencialmente de un algoritmo matemático, y existe un rigor en sus reglas de generación. Pero ocasionalmente el movimiento de la propia línea puede ser libre, como en el proyecto del Chavasse Park, en el que colaboré con Philip Johnson y el Studio Baad. (...).

Figura 181. Patrón de líneas generativas desarrollado por Cecil Balmond en el proyecto de Chavasse Park, Liverpool (Reino Unido), obra de Philip Johnson y el Studio Baad y Cecil Balmond (2000).

*El tercer camino es mucho más especulativo, pero potencialmente muy rico. Trabajo con puntos de una malla espacial, y cada punto contiene una determinada información. No se trata de información en el sentido cartesiano, de posición en relación a los ejes $x - y - z$, sino información sobre cómo los puntos se relacionan con los puntos colindantes de acuerdo con una serie de reglas predefinidas. Sólo se necesita un primer movimiento.*³³¹

Partiendo de esta base Cecil Balmond divide los proyectos en cuatro categorías:

- Estructuras alteradas, en base a la utilización de algoritmos matemáticos y geométricos, como medio para la generación de la forma.
- Estructuras contenedoras, desarrollando de forma claramente patente el sistema estructural empleado.
- Estructuras optimizadas, en las que el funcionamiento estructural está claramente enfocado a la consecución de un menor empleo de materia y una economía de medios³³².
- Estructuras algorítmicas, que más allá de la asunción y dimensionado del sistema resistente, emplean desarrollos matemáticos, como medio generador de la forma estructural. Un claro ejemplo de ello es el proyecto de la CCTV, cuya organización de los elementos estructurales en la fachada, responde claramente a las solicitudes a las que se encuentra sometido (Figura 182).

Se puede ver, a lo largo de los años, la evolución de los tipos de proyectos desarrollados por Cecil Balmond (Figura 183)³³³, como un referente de la adaptación de las distintas soluciones a las exigencias y capacidades de los tiempos.

³³¹ RAHIM, Ali y otros, *"The digital and the material. Cecil Balmond in conversation with Michael Weinstock"*, Reino Unido, Architectural Design vol. 72 nº 1, enero de 2002, p. 51.

³³² La economía de medios se enlaza con la optimización resistente, aunque el coste de los elementos estructurales de por sí, no tiene porque ser inferior a otras soluciones.

A través de la concepción estructural que Cecil Balmond hace en los distintos proyectos y su evolución a través de los años, se puede vislumbrar una clara implicación con los principios resistentes ligados a la generación de las formas estructurales. Las obras en

Figura 182. Estructura algorítmica del edificio de la CCTV en Pekín (China), obra de Rem Koolhaas y Ole Scheeren de OMA y el estudio de ingeniería Arup (2002-2012).

Figura 183. Evolución cronológica de las estrategias de diseño estructural utilizadas por Cecil Balmond.

³³³ El desarrollo de este diagrama corresponde a la labor de Alejandro Bernabeu Larena en el desarrollo de su tesis:

BERNABEU LARENA, Alejandro, *“Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond”*, Madrid, Tesis de la Universidad Politécnica de Madrid, 2007, p. 53.

las que ha intervenido, son referente en el panorama actual y por consiguiente una buena muestra de las líneas de actuación ligadas al diseño arquitectónico. Así, durante los últimos años se ve un aumento de los proyectos como estructuras contenedoras y los que derivan su forma de las exigencias tensionales (estructuras algorítmicas). Ambos dan muestra de la necesidad de un mayor impacto visual de la solución y la percepción resistente como medio para tal fin. Así mismo, las capacidades actuales de los medios de cálculo, han hecho posible que desde mediados de la década de 1990 el uso de las estructuras algorítmicas haya aumentado.

Este referente, muestra como el panorama técnico y social modifica el tipo de resoluciones proyectuales adoptadas, ya que toda obra que se pueda considerar contemporánea, es una respuesta medida al marco temporal en el que se desarrolla. Las consideraciones estructurales y como se expresa en el presente punto centradas en el ámbito numérico, más allá de ser un medio que capacita para la resolución de las estructuras, es parte del germen que trasciende en la concepción de la obra. Este hecho resulta obvio al contemplar las obras consideradas hitos de la técnica a lo largo de los dos últimos siglos.

Los proyectos de grandes luces como reto a la interpretación convencional del espacio, usualmente buscan llevar más allá los límites, tanto desde el punto de vista resolutivo como espacial, por lo que son el ámbito en el que se gestan los grandes cambios y en especial los que marcarán la espacialidad del siglo XXI. Este nuevo siglo, está caracterizado por una gran capacidad de acción, que plantea la cuestión, ya no de *“¿se puede hacer?”* sino *“¿se debe hacer?”*. A este respecto el ámbito numérico puede dar una parte de justificación y racionalidad a la solución adoptada, pero esto sería insuficiente sin considerar los conceptos desarrollados en los puntos anteriores, que ligan todo gesto proyectual a una implicación, tanto desde el ámbito funcional como perceptivo.

En el panorama actual, la concepción proyectual y en especial la de aquellos proyectos como los de grandes luces, que implican una mayor complejidad resolutiva desde todos los puntos de vista, aparece claramente diferenciado en dos ámbitos, el científico y el humano. El *“científico”*, está caracterizado por razonamientos nacidos de la pura lógica resolutiva, representados por los ingenieros, estos deducen las soluciones de una coordinación entre la forma funcional y la resistente, dictando los márgenes de su actuación el tipo de lógica numérica expuesta en este punto³³⁴. Por otra parte los arquitectos representan la preocupación por las complejidades asociadas a la actividad del hombre. Así estos plantean aspectos como la percepción de las formas y el impacto que éstas producen en la lectura del usuario, como ámbito *“humano”*. Desde este punto de vista el proyecto nace como respuesta global a la problemática presente en cada

³³⁴ La lógica numérica que dicta la actividad de los ingenieros, actualmente va más en la línea de la determinación del comportamiento resistente interno de los elementos estructurales, más que la determinación de los márgenes de actuación, aunque como se ha expuesto, este es un punto conceptualmente relevante y que más adelante podría poner en contexto la producción arquitectónica, como actividad condicionada por los márgenes materializables.

obra, desde la expresión, a la resolución constructiva, pero con los ojos puestos en el hombre y no en las limitaciones y reglas que controlan los márgenes de actuación. Esta clara distinción entre ambos, es lo que hace tan acuciante el compaginar las actividades de ambos en el proceso resolutorio del proyecto. La complejización de ambos ámbitos es lo que ha llevado a su diferenciación, pero hay que tener presente que son las dos caras de la moneda arquitectónica y que toda obra implicada con la contemporaneidad y que trascienda de los márgenes de la cotidianidad, ha de tener presentes por igual ambas percepciones de la producción arquitectónica. Como dice Pier Luigi Nervi al respecto en 1961: *“Es necesario no olvidar que la riqueza de soluciones estáticas hechas posibles por la precisión de los sistemas de cálculo y por las cualidades de los materiales, puede conducir a esquemas estáticos antinaturales, es decir, a una arquitectura de estructuras que, en lugar de desarrollarse por un pensamiento lógico, resultado de los términos: belleza, armonía y sensibilidad, provienen de leyes impersonales del mundo estático a las cuales se les obliga a hacer acrobacias exhibicionistas.”*³³⁵

La arquitectura es una actividad compleja, que combina múltiples sensibilidades y conocimientos que dan una respuesta a las necesidades funcionales y sociales del hombre y por consiguiente términos como: belleza, armonía y sensibilidad han de estar implícitos en la concepción y diseño de las estructuras, que caracterizan los proyectos de grandes luces y más allá de la ideación, convierten los conceptos en formas materiales, que imponen su presencia en el mundo. Como dice el poema de Paul Valéry:

*“Quien no haya sentido jamás,
¡siquiera en sueños!...
la aventura de una construcción acabada
cuando los demás solo ven su comienzo,...
quien no haya percibido en la blancura del papel
una imagen desasosegada por lo posible,
y por el lamento de todos los signos que no serán escogidos,
ni visto en el aire transparente
la obra que aún está por nacer...
no conoce, por grande que sea su saber,
la riqueza y el estímulo y la amplitud espiritual
que ilumina el hecho consciente de construir”.*

Así en la complejidad de la proyección arquitectónica, se encuentran múltiples campos de reflexión, siendo el énfasis que se pone en cada uno de ellos, el determinante de las líneas generales que definen el desarrollo de la obra. Pero entre todas ellas, el factor resistente y las limitaciones técnicas son una invariante, que siendo o no parte del proceso reflexivo, condicionan la producción arquitectónica, encuadrándola en un momento de la historia, de forma acorde a las soluciones adoptadas. De la consciencia de los límites, surge una percepción del campo de actuación, que da como resultado una mayor adecuación de la elección de materiales y esquema resistente. Este punto de

³³⁵ NERVI, Pier Luigi, *“Relations entre architectes, ingenieurs et constructeurs”*, Francia, L’architecture d’aujourd’hui, Diciembre 1961.

vista de la proyección arquitectónica en la actualidad, suele ser menos condicionante a la hora de la ideación, que el factor perceptivo, que como se ha visto en el capítulo anterior, de forma consciente o intuitiva, orienta a concebir la producción arquitectónica y en especial de los proyectos de grandes luces como una reinterpretación del entorno del hombre y un lenguaje de las formas.

IV. LAS GRANDES LUCES, UNA FORMA DE CONCEBIR LA ARQUITECTURA

Como se ha podido comprobar en la presente tesis, a lo largo de toda la historia el hombre ha visto supeditada su actividad a las limitaciones propias de cada momento, condicionando sus actividades y producción arquitectónica. Este hecho, subordina la lectura de la producción arquitectónica al marco de condiciones configurado, tanto desde el ámbito socioeconómico, como técnico e intelectual. Más allá de consideraciones expresivas, la producción del hombre, espacial y dimensionalmente, depende del marco técnico. A lo largo de los siglos, el hombre ha encontrado en la superación dimensional, tanto un reto para las capacidades de un tiempo, como la materialización de un símbolo del poder, como se plasma en dos de los grandes hitos que marcaron la forma de concebir la arquitectura hasta el siglo XVIII, el Panteón de Agripa y Santa María del Fiore. Dichas obras, son el sumun dimensional de las estructuras compresivas, basadas en materiales naturales, respondiendo a las reglas resistentes por las que se ha regido la producción arquitectónica hasta el siglo XVIII. Solo la incorporación de un nuevo material en el siglo XIX, el hierro, capaz de soportar tracciones aportó las herramientas materiales necesarias para la superación de un estadio técnico basado en estructuras compresivas, que encontró en el factor de forma, la única vía para la ampliación dimensional de los espacios y el aprovechamiento de las capacidades resistentes del material.

El hecho de poder resistir tracciones, modificó en el siglo XIX las reglas que regían la producción arquitectónica, permitiendo la realización de elementos horizontales capaces de cubrir grandes luces, al tiempo que se configuraban estructuras mucho más ligeras y económicas, tanto desde el punto de vista material, como del proceso constructivo. Los perfiles metálicos empleados para la conformación de las cerchas, generalmente trianguladas, llegan desde las fábricas y talleres a la obra, donde se pueden montar a nivel del suelo, para izarse a su posición definitiva mediante grúas. Las estaciones de ferrocarril, se constituyen en el siglo XIX como el referente arquitectónico en el que mejor se plasman las nuevas capacidades de las estructuras. En estas obras se expresan los nuevos medios resolutivos y el entendimiento del espacio y las grandes luces, como respuesta práctica a las problemáticas suscitadas por la sociedad. Así, se desmaterializa el pedestal que alzó este tipo de soluciones como símbolo exclusivo del poder, para introducirse en el repertorio de soluciones adoptables en un amplio rango de problemáticas.

La otra regla que se rompe en el siglo XIX es la estaticidad de las capacidades de los materiales. Hasta este momento, las características de los materiales vienen dictadas por su constitución natural, lo que establecía una diferenciación de las calidades de unas zonas a otras, potenciando el comercio de materias primas en base a sus virtudes innatas. Esto afecta, tanto a las capacidades resistentes, como a las cualidades estéticas de la obra. Pero en el siglo XIX, con el hierro y la evolución que sufre éste a lo largo de los años, se percibe claramente que en estos nuevos materiales, modificados por el hombre, sus capacidades son una variable³³⁶. Esta variabilidad del material, en su proceso evolutivo, depende directamente del conocimiento adquirido y los procesos de elaboración, que conducen a la mejora de las capacidades del material. En último término, este proceso conduce hasta la capacidad de realizar materiales a medida de las exigencias de la problemática planteada. Así las estructuras de hormigón

³³⁶ La variabilidad de las cualidades de los materiales desde tiempos remotos se había hecho patente, pero en este punto, es en el que se evidencia su aplicación en el ámbito arquitectónico.

armado, surgen como adaptación de un sistema pétreo ancestral a la nueva realidad resistente en la que se pueden soportar, tanto compresiones, como tracciones. Este material nacido en el siglo XIX, ve su apogeo durante el siglo XX, como vía constructiva económica, que reducía el consumo de acero frente a las estructuras metálicas. Así el factor económico fue determinante para la introducción de un nuevo material, pero el detonante real que estableció este recurso como el principal material del siglo XX, fueron las dos guerras que marcaron la primera mitad del siglo, periodos durante los cuales la escasez de acero para las construcciones potenció la adopción de otro tipo de soluciones, mostrándose el hormigón armado como la solución más capaz.

Si bien el hormigón armado ya es capaz de soportar esfuerzos tractores, el matrimonio entre el hormigón y el acero cuenta con problemáticas, como la fisuración de las secciones sometidas a tracción, donde las barras de acero soportan las tracciones, mientras el hormigón, incapaz de soportar dicho esfuerzo, se fisura. Así el factor dimensional limitativo de este tipo de elementos, se encuentra definido por la entidad de dichas fisuras, llegando a ser inaceptables en torno de los 15 metros³³⁷. Esta limitación física, obligó a la adopción del factor de forma como medio de superación dimensional, empleando los recursos geométricos heredados del conocimiento clásico de las estructuras compresivas. Las obras arquitectónicas de grandes luces, en este punto disponen de dos herramientas básicas para la ampliación dimensional: la mejora de las capacidades del material y el factor de forma. Por esta razón, a la hora de emplear el factor de forma, al contrario de lo que ocurría en la antigüedad, se hace posible resistir tracciones de forma puntual, apareciendo las estructuras laminares como nuevo tipo estructural.

Las estructuras laminares de hormigón, mediante la conformación de superficies de doble curvatura, soportan en un mismo plano ambos tipos de esfuerzos, conformando estructuras ligeras, capaces de cubrir grandes espacios, con un uso mínimo de material. Así, tomando como base el conocimiento resolutivo adquirido a través de los siglos y las nuevas capacidades resistentes, se modifican los parámetros de la problemática constructiva, lo que lleva a la adopción de nuevas vías de actuación.

Un personaje vital para la actual comprensión de la problemática resistente y la supeditación de las capacidades resistentes de la materia a las exigencias proyectuales, es Eugène Freyssinet, considerado el padre del hormigón pretensado. Hasta este momento toda tensión dentro de las estructuras, estaba producida por el peso propio o a las cargas variables introducidas durante el normal uso de la edificación. En este punto se considera la incorporación de un estado tensional de partida, que resulte favorable para el comportamiento tensional interno de la estructura durante el estado de servicio. Como se ha dicho, las estructuras de hormigón armado, al asumir el acero las tracciones, ven como el hormigón se fisura al intentar resistir un tipo de esfuerzo que no es capaz de soportar. Por ello si la armadura que va a resistir las tracciones se encuentra pretraccionada, somete al hormigón circundante a un esfuerzo de compresión, cuya entidad ha de ser suficiente como para que

³³⁷ El límite dimensional en función de la entidad de las fisuras, no implica que superadas dichas dimensiones, la estructura no pueda soportar los esfuerzos, sino que los daños producidos en el elemento constructivo suponen un grave perjuicio a la durabilidad de la obra.

únicamente se encuentre sometido a este tipo de esfuerzos durante toda la vida útil de la edificación. Esta artimaña resistente, evita la fisuración, ampliando los rangos dimensionales alcanzables con vigas horizontales de hormigón. Este tipo de solución es conceptualmente igual, se encuentren aplicadas las tensiones de forma previa al fraguado del hormigón o con posterioridad, aunque constructivamente difieren en los medios resolutivos. Este tipo de solución, nació como medio de superación de una problemática inherente al hormigón armado, pero su alcance es mucho mayor, pudiendo ser una más de las herramientas empleadas en la resolución estructural, éste sería el caso de las estructuras ligeras, que emplean recursos, como los radios de bicicleta pretensados, para mantener la forma de la cubierta, sean cuales fueren las cargas aplicadas durante la vida útil de la edificación. El pretensado hoy se constituye como uno de los recursos vitales para el control resistente de las tensiones internas de las estructuras y sus deformaciones, estableciéndose como medio capaz de brindar soluciones a un amplio rango de proyectos, de otra forma imposibles de resolver.

La incorporación del hierro al panorama constructivo, ha marcado la forma de concebir la arquitectura, desde los márgenes dimensionales y la economía de medios, a la propia materialización de los proyectos, ampliándose la libertad de diseño de las edificaciones. Durante el siglo XXI la omnipresente influencia del acero, se encuentra ante el nacimiento de nuevos materiales surgidos del laboratorio, cuyas capacidades, hacen augurar que en un futuro próximo puedan ser los que definan el nuevo entendimiento de la resolución estructural, dibujando los nuevos márgenes dimensionales y los medios con los que cuenta el arquitecto para la resolución proyectual.

Como se ha visto, la forma en la que el hombre concibe la arquitectura está intrínsecamente relacionada con las capacidades resolutivas de un tiempo y el intento de superación de las limitaciones que le vienen impuestas, tanto las comentadas: materiales y técnicas, como el conocimiento resistente. Este último factor se encuentra vinculado a los medios de cálculo, algo que igualmente ve un cambio sustancial durante el siglo XIX. En este momento el hombre pasa de basar el dimensionado estructural en un *“conocimiento empírico”*, fruto de la experiencia adquirida a través de éxitos y fracasos, a un *“conocimiento científico”*, que mediante unas herramientas de cálculo realiza un dimensionado numérico de los elementos resistentes, estableciendo unas garantías de su funcionamiento, previo a la materialización de la edificación. Este dimensionado numérico es reflejo de la mayor comprensión del comportamiento resistente de los elementos estructurales, lo cual permite el incremento dimensional de las edificaciones en condiciones de seguridad, algo que hasta ese momento resultaba imposible. Pero de igual manera, este hecho limitaba lo edificable a lo calculable, como queda implícitamente reflejado en las distintas normativas edificatorias que surgen en torno al cambio de siglo, en busca de una regulación de las edificaciones que emplean estructuras metálicas y estructuras de hormigón armado. Este tipo de proceso resolutivo coarta el resultado, ya que los modelos geométricos y resistentes empleados han de ser calculables. Las soluciones que emplean geometrías de mayor complejidad, han de usar simplificaciones que hagan factible su modelización mediante sistemas de ecuaciones asumibles para su cálculo manual, un hecho que se evidencia claramente en las estructuras laminares de hormigón armado. Esta trayectoria se mantendrá inamovible hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando el desarrollo de los medios informáticos ofrece la capacidad de resolver sistemas matriciales de grandes dimensiones, hasta ese momento inabarcables. Este

hecho posibilita la aplicación del método de cálculo matricial, que hasta ese momento no encontraba un soporte que hiciera factible su aplicación práctica en la resolución estructural. Así el hombre pasa de cálculos limitados por sus capacidades resolutorias, empleando el cálculo plástico de las estructuras y simplificaciones resolutorias a una libertad basada en la capacidad para solucionar cualquier problemática planteada, mediante el cálculo elástico, lo que a su vez ofrece una representación más cercana a la realidad resistente de las estructuras.

Los medios informáticos en las últimas décadas han posibilitado la representación y el cálculo de cualquier proyecto imaginable, lo que sumado a las mayores capacidades de los materiales y al control de las tensiones internas de los estos, posibilita la resolución de proyectos hasta hace escasas décadas imposibles. Este panorama refleja la relevancia de la evolución en los condicionantes resolutorios de las edificaciones para la concepción proyectual, enmarcando toda obra concebida como “contemporánea”³³⁸, dentro de su marco temporal, como reflejo de lo posible. Debido a este hecho, siempre que se analice una obra, ha de considerarse el marco en el que se realizó, para poder contextualizar su realización y otorgarle el valor que le corresponde, ya que desde la perspectiva resolutoria actual, ciertas obras pueden quedar veladas ante su valor real en el panorama arquitectónico.

Desde el marco de la comprensión resistente de los proyectos, se plantea una cuestión de gran relevancia. Hoy conocemos los márgenes dimensionales alcanzables con las distintas opciones técnicas, generalmente en el marco de la ingeniería civil, ya que las problemáticas arquitectónicas establecen marcos dimensionales más reducidos, pero, ¿Cual es el límite real al que podría llegarse?. Esta no es una respuesta sencilla y la contestación no es una magnitud fija, ya que este valor es diferente en función de la solución resistente adoptada. Para tratar esta cuestión, se ha estudiado la problemática del “óptimo”, lo que en sí mismo requiere de ciertas simplificaciones, tales como que la estructura solo se soporte a sí misma. En este marco de análisis se puede alcanzar una formulación capaz de reflejar el “alcance”, como reflejo del límite dimensional de la solución adoptada.

$$L_{max} = \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{A\lambda + \frac{B}{\lambda}}$$

De esta formulación se pueden sacar las expresiones particulares para cada tipo de problemática resistente, estableciendo el marco dimensional, que puede ofrecer contexto a la solución empleada y establecer una comparativa entre la idoneidad de dicha elección. Si bien este tipo de pensamiento actualmente se encuentra en un ámbito teórico y reflexivo, en un futuro al igual que se han introducido en nuestra cotidianidad los cálculos matriciales computarizados, podría pasar a ser una herramienta reflexiva a la hora de la proyectación.

La presente tesis se centra en aquellos proyectos pertenecientes al ámbito de las grandes luces, entendido éste como el de los proyectos que retan las capacidades dimensionales de lo realizable. Desde un punto de vista meramente cuantitativo podríamos referirnos a proyectos

³³⁸ Al hablar de obra contemporánea, se hace referencia al marco específico de la realización de la edificación, tomando como obras contemporáneas aquellas que hacen uso de las capacidades específicas del momento y buscan la expresión de ese estadio técnico...

con luces superiores a los 18 metros, aunque desde el punto de vista de la concepción, proyectos de dimensiones más modestas puedan incluirse en esta categoría por el proceso de pensamiento que ha conducido a su materialización. Este marco dimensional está establecido por la luz máxima alcanzable mediante escuadría de madera aserrada. Un referente de lo que por medios naturales es capaz de alcanzarse sin recurrir al ingenio resolutivo del hombre, que ha posibilitado superar estas barreras dimensionales. Así el hombre ha retado, primeramente la geometría y posteriormente mediante la creación de materiales y medios analíticos a los márgenes dimensionales que nos permite la naturaleza. La historia de la construcción y la del hombre van entrelazadas, por lo que la producción arquitectónica, más allá de los medios de expresión estética está imbuida de los medios de capacitación resolutiva que condicional su espacialidad, auténtico germen conceptual de toda arquitectura.

La visión aquí plasmada, es un nuevo punto de vista más allá de los razonamientos resolutivos referentes a la función y la expresión, que permite poner en perspectiva la producción arquitectónica previa, pero así mismo es capaz de mostrar una nueva forma de encarar la arquitectura futura como parte de un marco resolutivo, el de las grandes luces, que ha encontrado diferentes líneas de aplicación dentro del panorama arquitectónico. En el presente texto se ha intentado reflejar el ámbito de las grandes luces en la arquitectura actual, tanto desde el marco de las oportunidades que se brindan desde los nuevos materiales y sistemas productivos, como desde la taxonomía proyectual en la que se pueden enmarcar las obras actualmente realizadas. Precisamente esta taxonomía brinda la posibilidad de vislumbrar las particularidades de cada tipo resolutivo y las implicaciones que lleva asociadas, como medio de elección de las futuras acciones de proyectación, pudiendo encararlas desde el conocimiento empírico. La mayor parte de los ámbitos del hombre han logrado establecerse como ciencias, en las que una serie de reglas son capaces de explicar su funcionamiento y regular el conocimiento, pero en el caso de la arquitectura, el gran número de factores a considerar, la constituyen como una labor tan rica que su regularización resulta imposible. Sin embargo ciertos ámbitos de la arquitectura se han regulado por múltiples procedimientos y normativas que ofrecen una visión de lo realizable y el marco de confort. En dichos términos el estudio taxonómico de los proyectos de grandes luces, ofrece una visión pragmática de este tipo de soluciones desde el punto de vista de la problemática proyectual, más allá de la resolución funcional o resistente del proyecto.

Las posibilidades resolutivas con las que se cuenta en la actualidad, exigen al arquitecto una mayor reflexión sobre la finalidad de toda acción. Si antaño la problemática residía en la *“capacidad resolutiva”*, hoy superada dicha fase, nos encontramos ante la *“justificación resolutiva”*. Un mayor marco de posibilidades ofrece la oportunidad de avanzar en la espacialidad arquitectónica, buscando la mejora de las obras individuales y la concepción urbana de forma global, pero a su vez presenta el riesgo de tomar acciones fuera de toda justificación por el simple hecho de su capacidad de materialización. Por este hecho hoy es exigible una labor reflexiva, tanto sobre el marco proyectual actual, como sobre el proceso evolutivo que nos ha conducido hasta la situación actual y nos permite contextualizarla, encarando el presente, en aras de formar un mejor futuro. Cuestiones como la situación socioeconómica, los materiales y los medios de análisis, dan forma a la arquitectura actual, como condicionantes a la capacidad resolutiva. Este hecho incuestionable es el que hace imprescindible tratar en profundidad dichas cuestiones, si se desea encarar el futuro de la

arquitectura y la ingeniería con propiedad, en lugar de ignorancia, haciendo uso de las herramientas que se dispone consciente de sus connotaciones e implicaciones y no por la mera capacidad del marco actual.

Solo desde la consciencia del conocimiento adquirido a través de los siglos, en los distintos ámbitos que condicionan la labor reflexiva de la proyectación, se puede lograr una comprensión de las leyes que recaen bajo las decisiones adoptadas. El conocimiento no puede ser desaprendido y por eso mismo, modifica irreversiblemente nuestra visión del mundo y nuestra forma de concebirlo y *“proyectarlo”*. Este hecho condiciona nuestra lectura del entorno, por lo que la interpretación de las obras existentes ha de estar ligada a dicho conocimiento del marco técnico que posibilitó y condicionó su realización.

La influencia de las capacidades resolutorias, es fundamental para comprender la producción arquitectónica más allá de las concreciones proyectuales que la dan forma. Este hecho requiere especial mención, tanto para ser conscientes del camino recorrido hasta el panorama actual, como así mismo para encarar el panorama futuro del cual ya se atisban pinceladas de los condicionantes que forjarán la nueva comprensión de los límites y líneas para la actuación de arquitectos e ingenieros.

1. Influencia de los condicionantes resolutivos en los márgenes dimensionales y limitaciones a la materialización arquitectónica

A lo largo de los dos últimos siglos, se han sucedido con mayor celeridad los acontecimientos que han logrado incrementar los márgenes dimensionales, más allá de lo que los medios naturales posibilitan sin la acción del hombre, tanto desde una mayor comprensión de la naturaleza y transformación de los materiales, como desde los medios analíticos que han posibilitado el dimensionado previo de las estructuras. Como ya se ha dicho con anterioridad, el marco resolutivo actual es resultado de un proceso evolutivo en múltiples frentes, que de distintas formas condicionan la producción arquitectónica.

Antes de la aparición de un material susceptible de resistir tracciones, las estructuras se veían limitadas a las formas resistentes sometidas a compresión, lo que obligaba en el caso de los materiales pétreos, a la utilización de formas estructurales que permitieran trabajar exclusivamente con este tipo de esfuerzos. Así durante la mayor parte de la historia del hombre, la generación de espacios de grandes dimensiones ha ido asociado al uso del arco, la bóveda y la cúpula, formas básicas dentro de las cuales han aparecido variaciones, motivadas unas veces desde el razonamiento resistente y otras desde el práctico. Solo la madera permitía la conformación de elementos horizontales sometidos a esfuerzos flectores, pero las limitaciones dimensionales estaban condicionadas por las dimensiones del elemento natural, que permitieran conformar una escuadría suficiente. Así, con vigas de madera el límite ronda los 11 metros, ejemplo de ello son las dimensiones empleadas en el Palacio del Buen Retiro, en cuyas salas principales las vigas de madera permiten cubrir luces de poco más de 10 metros. Este rango dimensional solo se podía alcanzar en obras de gran importancia, dados los costes de ese tipo de escuadrías. Para alcanzar luces superiores se opta por emplear cerchas, una tipología estructural que evoluciona con los siglos, siendo la principal vía para la conformación de cubiertas de grandes luces, como en el caso de las catedrales, aunque bajo ellas se conformen las bóvedas que darán imagen al interior y protección ante los incendios. Precisamente por las similitudes problemáticas entre los perfiles metálicos y las escuadrías de madera, son este tipo de soluciones las que marcan la producción arquitectónica en el nuevo material del siglo XIX. Así un nuevo material y una tipología resolutiva ya conocida logran ampliar los márgenes dimensionales, al tiempo que modifican radicalmente las reglas del juego.

Si bien en el siglo XIX existe la capacidad de resolver grandes luces, como las planteadas en los proyectos de las estaciones de ferrocarril mediante elementos horizontales, se opta por la adopción de formas clásicas como los arcos, que resultan más eficientes, reduciendo los costes productivos de la obra. Precisamente el factor económico es uno de los principales saltos que se producen en este punto de inflexión, resolver proyectos de grandes dimensiones ya no está solo al alcance de los grandes poderes, sino de toda aquella empresa que considere lógico su empleo, como en el caso de las estaciones de ferrocarril, donde este tipo de solución siendo innecesaria desde el punto de vista práctico, actúa como elemento representativo y forma

idónea para acoger las grandes masas de gente que discurren por ellas a diario. Así mismo la Halle des Machines de la Exposición Universal de París de 1889 (Figura 184), empleando soluciones sobradamente ensayadas a lo largo de todo el siglo, amplía los márgenes dimensionales más allá de donde la lógica funcional había permitido llegar hasta ese momento, acogiendo un espacio expositivo, que en sí mismo era una declaración de las capacidades técnicas del país y del momento en que se realiza. Esta obra pone de manifiesto que ya en el siglo XIX los límites dimensionales de la técnica y los materiales, no los encontramos en la arquitectura, sino en la ingeniería civil. En el caso de la arquitectura entran en juego un abanico mucho más amplio de variables a considerar, destacando entre ellas la justificación funcional y el factor económico, limitadores racionales a la actividad productiva del hombre. Así antes de comenzar el siglo XX, aparece la reflexión entre la capacidad resolutoria y la procedencia de la actuación. Si bien este hecho existe durante toda la historia, se modifica el punto de vista, al pasar de un panorama en el cual las soluciones justificables llegan a los límites de lo realizable, a otro donde esta barrera ya se aleja de toda justificación posible. Así los límites dimensionales dejan de estar coartados por la técnica, para estarlo por las funciones a las que están destinados y la economía razonable de medios a emplear. Hoy precisamente se ha llegado a un extremo de esta disyuntiva, en el que ante un asombroso campo de posibilidades, la procedencia y justificación de las acciones, son las que estructuran la coherencia de la solución en el panorama actual.

Los límites dimensionales asociados a cada material no están solo relacionados con sus características físicas, sino con los esquemas resistentes empleables bajo dicho marco resistente. Así hoy los puentes suspendidos son el hito de las grandes luces en la ingeniería civil. Por su parte en el ámbito de la arquitectura con márgenes dimensionales más modestos, encontramos obras como la Cúpula del Milenio o “O₂ Arena” (Figura 185), obra de Richard Rogers y el ingeniero WS Atkins (1996-1999)³³⁹. Esta cúpula de 365 metros de diámetros aplica todos los avances en materiales disponibles, configurando 12 mástiles de acero de 95 metros

Figura 184. Halle des Machines, en la Exposición Universal de París de 1889 (Francia), obra de Dutert y el ingeniero Contamin (1889).

³³⁹ La Cúpula del Milenio o Millennium Dome, se construyó en Londres entre 1996 y 1999, pero posteriormente entre 2005 y 2007 fue remodelado para los Juegos Olímpicos de Londres 2012, pasando de denominarse “O₂ Arena” a “North Greenwich Arena”. La reforma particiona en mayor medida el espacio, por lo que pierde buena parte de las características iniciales que hacen de éste, un espacio sobrecogedor.

de altura, de los que mediante cables pretensados se descuelga la cúpula, como una fina membrana de una tela de fibra de vidrio, con una terminación superficial de PTFE (teflón). Ésta, es una solución de cubrición ligera para una gran superficie, permitiendo cubrir un diámetro de 365 metros solo con la interferencia de los 12 soportes, que adquieren una especial entidad y presencia en el recinto, dejando un área central de 180 metros de diámetro sin soportes. Este tipo de solución, si bien no dista tanto dimensionalmente de los 115 metros de ancho y 420 de largo de la Halle des Machines de 1889, en el poco más de un siglo que las separan, se percibe en las obras el salto técnico acaecido, ya que ambas se han definido como representación del estadio técnico y referente de las grandes luces de su marco temporal. En ambos casos el empleo de estos márgenes dimensionales han sido, tanto un medio expresivo de manifestar las capacidades de un tiempo, como la constitución de un microcosmos apto para la asunción de las actividades expositivas, aunque en el caso de la Cúpula del Milenio se busque la conformación de un espacio más flexible, aunque centrado en las actividades deportivas. Así la diferencia radica, no solo en el factor dimensional, sino de forma más patente en los procesos de proyectación, claramente condicionados por los medios técnicos, así como de cálculo y representación. Otro punto reseñable es el concepto de “confort”, que implica la regulación de la iluminación, humedad y temperatura, para recrear un ambiente ideal para la vida del hombre, siendo parte vital del proceso de diseño.

Figura 185. Millennium Dome, en Londres (Reino Unido), obra de Richard Rogers y el ingeniero WS Atkins (1996-1999). La imagen superior corresponde al espacio interior original y la inferior tras la reforma efectuada para los Juegos Olímpicos de Londres 2012.

Como ya se ha dicho, el gran salto conceptual de los materiales acontecido durante el siglo XIX, es que estos pasaron de ser elementos inertes e invariables, a un factor vital y cambiante. Las características de un material mejoran según nuestro conocimiento de éste se incrementa y así los procesos para manipular sus características. Así hoy se entiende la ciencia de materiales como una parte fundamental, ligada al progreso en todas las facetas de la vida y en especial en la arquitectura e ingeniería, donde se modifican consecuentemente las reglas del juego.

Anteriormente se ha visto cómo el estudio de los puentes que marcan el record de luz en cada una de las tipologías resolutivas, clarifica los avances acontecidos en el ámbito técnico de forma global, pero donde se llevan a cabo los mayores saltos cualitativos es en aquellos puntos en los que se producen avances sustanciales en los materiales. En el caso de los puentes suspendidos, los mayores saltos cualitativos se producen al pasar de los puentes de cadenas, a los de barras y posteriormente a los de cables. Estos son cambios resolutivos, pero solo son posibles gracias a los avances en los materiales y procesos productivos, capacitando a la industria para producir eslabones de mayor calidad y longitud que llamamos barras, a lo largo del siglo XIX. De forma paralela, evoluciona la producción de cables, desde las técnicas tradicionales de producción de cuerdas, a medios específicos, como la trefiladora, que permiten la producción de cables de grandes longitudes y con secciones configuradas en función de patentes, que buscan finalidades distintas, desde una mayor resistencia y compacidad, a una mayor resistencia a la abrasión, como en el caso de los cables de los tranvías o ascensores.

Si anteriormente se realizó una división clarificadora entre los materiales que han definido los dos últimos siglos, marcado el siglo XIX como el del hierro y el siglo XX, como el del hormigón armado, es necesario puntualizar que ambos conceptos están unidos. El hierro y posteriormente el acero, es el material que ha revolucionado el ámbito arquitectónico hasta nuestros días, ya que nos permite la dualidad resistente, de tracciones y compresiones y el hormigón armado, así como el pretensado, no es más, que una aplicación de éste a un material procedente de la tradición, que ya se empleaba en el Imperio Romano e incluso antes³⁴⁰. Pero pese a su conocimiento ancestral, la evolución surgida de los medios de producción del hormigón artificial a lo largo del siglo XIX, hicieron posible a finales de siglo que esta combinación de materiales (hormigón y acero), permitiera la conformación de un material pétreo, que al igual que las perfiles metálicas, era capaz de soportar esfuerzos tractors. El hormigón armado presenta una limitación dimensional, relativa a la fisuración de los elementos incapaces de resistir tracciones, anexos a las barras traccionadas de acero. Esta limitación, primeramente se intentó salvar gracias al empleo del factor de forma, como tradicionalmente se había concebido, pero el hecho de que este material pudiera soportar compresiones y tracciones, permitió la aparición de un nuevo modelo estructural, las láminas, que pese a sus similitudes con las bóvedas y cúpulas, desde el punto de vista resistente, son

³⁴⁰ Recordemos que según el estudio de Guy Demortier, *"PIXE, PIGE and NMR study of themasonry of thepyramid of Cheops at Giza"*, (realizado en Bélgica en 2004, en el Laboratoire d'Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix), los grandes bloques de piedra de la Gran Pirámide de Giza, son de origen artificial. Así ese sería uno de los primeros ejemplos de hormigón empleado en grandes edificaciones.

una categoría claramente diferenciada, solo entendible gracias a los nuevos materiales nacidos en el siglo XIX.

En un marco socioeconómico en el que los materiales resultaban costosos y la mano de obra era económica, en la primera mitad del siglo XX las cubiertas laminares de doble curvatura, vieron su florecer, con ejemplos tan llamativos como los de la obra de Félix Candela Outeriño. Este ejemplo pone de manifiesto la relevancia del contexto para la comprensión de la obra, dentro de un marco, en el cual adquiere pleno sentido. Hoy este tipo de estructuras son consideradas alardes formales que conllevan un sobrecosto frente a otras opciones, pasando en cuestión de décadas de ser una solución económica para cubrir grandes luces, a un alarde definido por el gesto.

El factor de forma, entendido como el empleo de la forma para la adecuación resistente, es una vía de optimización estructural que ha caracterizado toda la historia del hombre y por su validez atemporal, tanto en la actualidad, como en el futuro será un tipo de resolución técnica ventajosa, independientemente del material o resolución concreta. Soluciones como el arco, la bóveda, la cúpula y las cubiertas de doble curvatura, entre otras, son atemporales por su justificación resistente, que las hace especialmente eficientes a la hora de resistir los esfuerzos presentes en los medios de cubrición... Se ha visto el ejemplo de la Cúpula del Milenio, que si bien no es un tipo resolutivo muy extendido en la actualidad, ejemplifica de forma clara la potencialidad espacial de emplear esquemas claramente procedentes de la ingeniería civil, aplicados de forma introspectiva al ámbito resolutivo de la arquitectura. Como ya se ha manifestado, en la arquitectura en el marco actual, la limitación dimensional real, no va ya ligada a la técnica, sino a los requerimientos funcionales, que dictan los márgenes dimensionales apropiados para la materialización de la propuesta. Así mismo el alejamiento de los límites técnicamente alcanzables con los distintos materiales y las técnicas disponibles de los márgenes en los que trabaja la arquitectura, permite la aparición de un mayor abanico resolutivo, lo que incrementa las posibles vías de desarrollo.

Desde el punto de vista estructural, el empleo del factor de forma va en la línea, tanto de la economía de medios, como del incremento dimensional, pero su empleo solo es posible como elemento de cubierta, ya que la planitud de las superficies que habita el hombre es un requerimiento trascendental para el desarrollo de su actividad. Esta relevancia la expresa claramente Rudolf Arnheim: *“El hombre experimenta el espacio en el que vive como asimétrico. Entre las infinitas direcciones del espacio tridimensional en las que puede moverse en teoría, una dirección se distingue por la fuerza de gravedad: la vertical. La vertical actúa como eje y sistema de referencia para todas las demás direcciones. (...) En nuestro sistema espacial, la dirección vertical define el plano horizontal como el único para el cual la vertical sirve como eje de simetría. Es el plano en el que podemos movernos libremente...”*³⁴¹. Esta misma idea, la manifiesta Christian Norberg-Schulz quien escribió que *“las direcciones horizontales representan el mundo concreto de acción del hombre. En cierto sentido, todas las direcciones horizontales son iguales y forman un plano de extensión infinita. El modelo más simple de espacio existencial del hombre, es, por tanto, un plano horizontal atravesado por un*

³⁴¹ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977, p. 30, 32

*eje vertical*³⁴². Esta verdad universal condiciona la búsqueda del hombre de configurar planos horizontales. Así los elementos resistentes horizontales adquieren una dimensión distinta, ya sea en la conformación de las cubiertas o en la superposición de niveles habitables.

Si antes del siglo XIX los elementos horizontales estaban limitados por las escuadrías de madera y los márgenes realizables mediante cerchas, con la aparición del hierro, las perfilerías metálicas aumentaron los márgenes realizables, marcando el auténtico cambio dimensional las cerchas, cuyas dimensiones se incrementaron considerablemente. Actualmente este entendimiento resolutivo permite la conformación de obras como el Centro Georges Pompidou de París (Figura 186), obra de Renzo Piano y Richard Rogers (1977). En esta obra los medios técnicos empleados en la conformación espacial permanecen a la vista, adquiriendo un valor estético, como expresión del factor resolutivo en el entendimiento espacial, algo propio de la arquitectura High-Tech, sin la que hoy resultaría incomprensible nuestra apreciación arquitectónica actual.

En hierro y posteriormente en acero, las cerchas han establecido la vía resolutiva de las grandes luces, tanto empleando factor de forma, como constituyendo elementos horizontales. En el caso del hormigón armado la limitación relativa a la fisuración coarta inexorablemente las luces de los elementos horizontales a unos 15 metros, línea sobre la cual las fisuraciones debidas al normal funcionamiento resistente, resultan inadmisibles, dejando como única vía de

Figura 186. Centro Nacional de Arte y Cultura Georges Pompidou de París (Francia), obra de Renzo Piano y Richard Rogers (1977).

³⁴² *Ibíd*em, p. 32

actuación las estructuras que emplean el factor de forma. La aparición del hormigón pretensado modificó nuevamente las reglas del juego arquitectónico, modificando las sollicitaciones internas de la estructura, para acomodarlas a la resistencia propia de cada material constituyente. Así se aplica una tensión previa a las barras de acero, para precomprimir el hormigón evitando las tracciones que producen su fisuración. Este recurso hace posible la conformación de modelos resistentes que hasta este punto eran inviables, cuando menos a ciertos rangos dimensionales. Este recurso es aplicable a diversas soluciones formales, pero donde resulta más patente su aparición es en los elementos estructurales horizontales de hormigón pre o postensado, que superan ampliamente la anterior barrera de los 15 metros, pudiendo alcanzar 50 metros y en el caso de vigas cajón pretensadas a los 200 metros. Estos marcos dimensionales abren nuevas barreras, marcando las vigas cajón pretensadas, límites resolutivos solo alcanzables en las problemáticas planteadas en el caso de la ingeniería civil.

Figura 187. Biblioteca en Viipuri (Finlandia), en un territorio, que actualmente pertenece a Rusia, obra de Alvar Aalto (1927-1935).

La capacidad resolutoria lleva ligada una mayor libertad para la materialización fiel de la idea proyectual. Este es el caso de obras tan icónicas de la arquitectura moderna como la Biblioteca en Viipuri (Finlandia)³⁴³ (Figura 187), obra de Alvar Aalto (1927-1935)³⁴⁴. En esta obra el arquitecto busca crear un microcosmos en el que se materializa un nuevo firmamento, repleto de soles, modificando el plano del suelo como si de una topografía artificial se tratara, para organizar funcionalmente los espacios. Así lo expresa el propio Alvar Aalto *“...Cuando diseñé la biblioteca de la ciudad, en Viipuri, durante largos períodos de tiempo perseguí la solución con la ayuda de dibujos primitivos de algún tipo de paisaje montañoso fantástico, con acantilados iluminados por soles en diferentes posiciones, a partir de los cuales llegué, gradualmente, al concepto para el edificio de la biblioteca. El núcleo arquitectónico de la biblioteca consiste en zonas de lectura y préstamo a diferentes niveles y mesetas, mientras que el centro y zona de control forma el punto más alto, por encima de los diferentes niveles. Los bocetos infantiles sólo tienen una conexión directa con la concepción arquitectónica, pero unidos entre sí, en sección y en planta, crean una especie de unidad entre las estructuras horizontales y verticales...”*. Una relevancia de la iluminación del espacio que nuevamente recalca cuando dice *“la luz es un fenómeno del cual el hombre tiene constantemente deseo. Como en otros sectores, se ha alcanzado una encomiable perfección cuando se trata de enfrentarse racionalmente a los problemas puramente técnicos, a los que presenta el aparataje, sus partes móviles, sus modos de producción, etc., pero la tarea principal, la de iluminar al servicio del hombre, adaptar la claridad a la higiene de sus ojos, asegurar al hombre la mejor calidad de luz, ha sido en buena medida descuidada”*³⁴⁵. Así gracias a una serie de vigas metálicas se conforma la techumbre plana de la cubierta, apoyadas estas sobre la serie de muros de hormigón armado que definen espacialmente el proyecto. En este caso la resolución técnica queda oculta para la conformación de la escenografía arquitectónica, como materialización de la idea del arquitecto.

En las palabras de Alvar Aalto cuando dice, *“(...) unidos entre sí, en sección y en planta, crean una especie de unidad entre las estructuras horizontales y verticales...”*, se hace patente otro punto de relevancia para la actual concepción de los proyectos de grandes luces y en especial aquellos con una complejidad formal reseñable. Los medios de representación, son en sí mismo parte indisoluble del proceso reflexivo y productivo de las edificaciones y por ende influyen en la formalización de la obra. Hasta recientes fechas, plantas, secciones y alzados han sido de cuantas herramientas gráficas se contaba, además de las maquetas. Este hecho ha llevado a organizar la visión de la arquitectura en torno a estos tres términos:

³⁴³ Esta biblioteca fue construida originalmente en Viipuri (Finlandia), un territorio, que actualmente pertenece a Rusia, cambiando el nombre de la ciudad por Vyborg.

³⁴⁴ Esta obra fue diseñada entre 1927 y 1933 y construida de 1933 a 1935.

³⁴⁵ AALTO, Alvar y SCHILDT, Göran, *“Alvar Aalto. De l’oeuvre aux écrits”*, Francia, Centro Georges Pompidou, 1988.

Forma científica	Plantas	Secciones	Alzados
Parámetros vitruvianos	Utilitas	Firmitas	Venustas
Ciencia arquitectónica	Tipología	Construcción	Iconología
Clase de ciencia	Humana	Natural	Formal
Eje disciplinar	Social	Técnico	Estético

Así desde un punto de vista conceptual se pueden relacionar los medios de representación: plantas, secciones y alzados con los parámetros vitruvianos: utilitas, firmitas y venustas. Cada uno de estos planos adquiere unas connotaciones específicas que influyen en la concepción de la obra y la relevancia de cada uno de estos documentos en el proyecto. Estos medios de representación ejercen una limitación formal derivada del número de documentos necesarios para su definición precisa. Con la llegada de los medios informáticos, desde este punto de vista, nuevamente cambiaron las reglas del juego, permitiendo la representación tridimensional de la obra y la producción de un gran número de planos, con mayor rapidez que por los procedimientos manuales. El mayor cambio conceptual producido por la incorporación de los medios digitales, son los sistemas de representación BIM. Este medio de representación, permite mediante un único modelo tridimensional de la obra, sacar toda la documentación que se precisa para su construcción, plantas, secciones, alzados y mediciones, así como el resto de documentos necesarios. Esta unificación modifica la forma de representar la idea arquitectónica en el estudio, al tiempo que permite una mayor libertad formal y una mayor precisión de todo el repertorio documental, al evitar las incongruencias que pueden producirse con las sucesivas modificaciones que se dan a lo largo del proceso creativo.

De forma acorde con la evolución de los procesos de representación, los medios analíticos han sido el eje en torno al que se han organizado los cambios arquitectónicos, sin reflejo material de su presencia, han influido sustancialmente en la resolución proyectual y en el factor dimensional. Hasta el siglo XIX el dimensionado se basaba en un *“conocimiento empírico”*, estableciendo los límites y soluciones aptas, las experiencias previas adquiridas de errores y aciertos a lo largo de los siglos, un conocimiento que los maestros de obras transmitían de generación en generación, como un tesoro, el tesoro del conocimiento. Pero los avances en los medios de cálculo desde Galileo, permitieron en este siglo alcanzar un nivel que hiciera factible el dimensionado de las estructuras, determinando la suficiencia resistente de los medios estructurales, de forma previa a la construcción. Este hecho supone basar el dimensionado en un *“conocimiento científico”*. Esta capacidad de dimensionar de forma precisa las estructuras, fue una espada de doble filo, puesto que por una parte permitió la materialización de grandes estructuras, pero por otra parte, todos aquellos tipos resolutivos inabarcables por los medios de cálculo disponibles resultaban irrealizables, pese a su validez material. Este es el caso del ingeniero Robert Maillart, que realizó varios puentes a comienzos del siglo XX, que en ese momento no se ajustaban a los márgenes normativos³⁴⁶, pero su construcción fue posible

³⁴⁶ Estos puentes son el Puente de Zouz (1901) y el Puente de Tavanasa (1904-1906).

gracias al apoyo de un personaje como Wilhelm Ritter, que acalló las críticas de las autoridades suizas entorno a sus cálculos. Así mismo las cubiertas laminares de hormigón armado realizadas por Félix Candela, se veían formalmente limitadas a las superficies de doble curvatura representables mediante ecuaciones de segundo grado lo más sencillas posibles, para su resolución manual. Las limitaciones de los medios de cálculo imponen las reglas bajo las que se produce la arquitectura como acotación a la acción humana. La aparición de los medios digitales en la segunda mitad del siglo XX, permitió aplicar el método de cálculo matricial, que ya existía desde hacía décadas, pero resultaba inaplicable a la problemática arquitectónica empleando los medios manuales. Gracias a los ordenadores, los medios de cálculo paulatinamente se han perfeccionado, resolviendo las estructuras mediante cálculo matricial, resolviendo sistemas con matrices de enormes dimensiones, inalcanzables por medios manuales en un plazo de tiempo reducido. *“Los métodos matriciales de análisis son de una gran simplicidad y se podría decir que no han aportado grandes ideas conceptuales al análisis de estructuras. Son una evolución de las ideas de Maxwell y Mohr de finales del siglo XIX”*³⁴⁷. Así hoy, gracias a estos métodos de cálculo, toda resolución formal y técnica, resulta calculable, lo que ha abierto hasta el infinito la variabilidad formal de las obras. Se pueden realizar cubiertas laminares de formas sumamente complejas, sin que implique mayores dificultades que las relativas a los medios constructivos, pudiendo hoy realizarse los encofrados mediante máquinas de modelado en taller, que trasladan las formas digitales a la realidad, lo que nuevamente elimina una limitación.

En los dos últimos siglos el hombre ha eliminado la barrera de los materiales, la del cálculo, la representación y la técnica, al punto de mostrarse ante nosotros un panorama, en el que la inmensa cantidad de posibilidades, traslada los límites resolutivos del marco técnico al funcional. Los medios digitales, durante los últimos tiempos, han venido a eliminar las limitaciones intrínsecamente relacionadas con las capacidades del hombre, dejando como una de las principales labores, la reflexiva, que permite hacer de la producción arquitectónica un acto complejo y vital, que tiene en cuenta tantos factores que la convierte en un acto único e irrepetible, que responde a la existencia del hombre. Actualmente la problemática presente, ya no es la *“capacidad resolutiva”*, ya que superada dicha fase, nos encontramos ante la *“justificación resolutiva”*. Este hecho traslada la atención en el análisis de las arquitecturas de grandes luces contemporáneas, de los apartados técnicos a las decisiones proyectuales, que son la clave para el entendimiento de los distintos tipos de soluciones empleadas, una atención a la procedencia y efectividad de las decisiones adoptadas, que requiere de una visión de conjunto como la expresada en el análisis taxonómico de la arquitectura contemporánea de grandes luces.

Otro hecho relevante acontecido en estos dos últimos siglos, es la separación entre arquitectos e ingenieros, desde el tronco común que era la labor del arquitecto hasta ese momento. *“El progreso en el arte de construir que se produjo durante la Revolución Industrial, debido a la aparición de nuevos materiales y al origen del conocimiento teórico del comportamiento*

³⁴⁷ PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006, p. 6.

*resistente de las estructuras, llevó a la disociación de las dos profesiones*³⁴⁸. Así la incorporación de los nuevos materiales artificiales y los medios numéricos de cálculo, forzaron a la separación de la profesión en dos ramas, una centrada en atender a la finalidad y expresión de la edificación, como respuesta social y otra al dimensionado y expresión técnica, aunque hasta recientes fechas, como se ha visto, la resolución técnica quedaba oculta bajo el velo de los paramentos, que dan la expresión espacial y volumétrica sin desvelar el secreto de su conformación. Estas dos vertientes de la profesión, con los años han encontrado los marcos de actuación en los que hallan mayor libertad de intervención, ya que los ingenieros suelen dar respuesta técnica a modelos cerrados definidos por los arquitectos, en respuesta a otros parámetros. Si esta problemática ciertamente responde a un amplio número de proyectos, aquellas obras de especial interés o con características espaciales que las encuadran dentro de los márgenes del presente estudio, muestran la relevancia de la coordinación entre arquitectos e ingenieros, como dos caras de la misma moneda, que deben actuar de forma coordinada, sin imponerse la una a la otra. Este hecho no es algo nuevo, ya que a lo largo de todo el siglo XX, vemos como los grandes arquitectos siempre han ido acompañados de grandes ingenieros, saliendo de dicha suma las obras que consideramos hoy referentes. Por su parte, en el panorama actual esta realidad se hace patente, surgiendo grandes estudios de ingeniería que resultan referentes, como el caso de ARUP, NB35, Schlaich Bergermann und partner, entre otros. Estos aparecen asociados a la realización de multitud de los proyectos que consideramos de referencia en la arquitectura contemporánea. El hecho de que la arquitectura de grandes luces en su conjunto, sea el referente proyectual de este periodo, hace aún más nítida la relevancia de esta relación. *“La sociedad actual está muy subordinada al ingeniero. El ha moldeado nuestro ambiente de opinión y también ha sido moldeado por ella. El ingeniero debe prestar sus servicios, no por egoísmo o ambición personal, sino para cooperar con los demás en salvar la civilización. Debe estar preparado para asumir el liderazgo en estos días de grandes problemas políticos, económicos y sociales. Debe aprender que los científicos, por un lado, y los artistas y humanistas, por otro, son sus aliados, sus compañeros de trabajo en dar forma al mundo del porvenir*³⁴⁹. En estas palabras de David B. Steinman, queda reflejado el concepto que se ha reiterado a lo largo del presente estudio, la interdisciplinariedad de la arquitectura y la relevancia de la coordinación de todos los agentes encargados de su realización, como una unidad, para lograr que la obra adquiera un valor dentro de su marco social.

Durante estos dos últimos siglos se han incrementado los márgenes dimensionales, ampliando nuestro conocimiento resistente y analítico, entre otros factores, lo que ha abierto un mayor número de posibilidades resolutorias, pero al unísono, ha complejizado la actividad proyectual al punto de dividir dicho proceso, no solo entre arquitectos e ingenieros, sino que en muchos proyectos de gran envergadura, la labor proyectual recae sobre un equipo multidisciplinar, capaz de dar respuesta más precisa a las múltiples variables a las que han de darse respuesta.

³⁴⁸ FERNÁNDEZ TROYANO, Leonardo, *“Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación”*, España, Revista de Obras Públicas, Nº 3.460 (Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil), Noviembre de 2005.

³⁴⁹ BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979, p. 390.

Hoy la actividad del arquitecto no es una labor solitaria, más allá de las obras de pequeña envergadura. ¿Quién podría imaginarse hoy la Maison à Bordeaux, de Rem Koolhaas sin la presencia de ARUP y Cecil Balmond?. Las labores de arquitectos e ingenieros son una suma natural y necesaria, que ofrece resultados indiscutiblemente mejores que los que cada uno de estos profesionales hubiera obtenido en solitario. Si el papel de los ingenieros en las últimas décadas se ha hecho más patente en la producción arquitectónica, de forma transversal, en las obras de ingeniería y principalmente en los puentes, aparece hoy la mano del arquitecto. Así las obras de ingeniería civil, que responden a una problemática meramente práctica y que durante más de un siglo había permanecido exclusivamente en manos de los ingenieros, integra hoy a los arquitectos en las labores de proyectación. El punto de vista del arquitecto puede aportar en estas obras la lectura social, que logra que una intervención como la de un puente en una ciudad, sea leída en términos representativos y no meramente la labor funcional a la que está destinado. Las labores de ambos profesionales, hoy en día, se encuentran intrínsecamente y patentemente enlazadas, un hecho que sin duda influye en las labores proyectuales, que apuestan por expertos en los distintos campos del conocimiento para la adopción de una solución certera y sensible, que logre, tanto el éxito de la intervención, como un progreso conceptual, denotando un inconformismo ante los límites resolutivos establecidos.

A lo largo de toda la historia, se ha logrado un incremento dimensional de las edificaciones, que solo durante los dos últimos siglos, ha podido sobrepasar los márgenes alcanzables con las materias naturales, lo que sumado al incremento del conocimiento resistente y las técnicas capaces de sacar partido a dichos avances, han modificado radicalmente el panorama arquitectónico, desdibujando y redibujando el marco que define los márgenes proyectuales de actuación. Solo a través de dicho recorrido histórico, uno es capaz de entender el panorama actual, viéndolo en perspectiva y como parte de un proceso evolutivo que está lejos de culminarse. Este punto de vista en base a los acontecimientos pasados, nos permite atisbar un futuro plausible, leyendo los indicios que hoy se presentan. Con un conocimiento resistente como el actual, no parece que la evolución próxima de dicho ámbito resulte clave para el entendimiento de la arquitectura de grandes luces que está por llegar en el siglo XXI. Por su parte los materiales continúan en incesante cambio, mejorando sus características los existentes, lo que ha llevado durante un siglo al incremento dimensional de las edificaciones, un hecho que aparentemente continuará a medio plazo. Así mismo han aparecido materiales nuevos, como la fibra de carbono, las aramiditas y el grafeno entre otros, que revolucionarán múltiples ámbitos de la sociedad y la arquitectura no será una excepción. Obras como los ascensores orbitales, pertenecientes al campo de la ciencia ficción, se encuentran proyectados, a la espera de un material que haga viable su realización y sin lugar a dudas los nanotubos de grafeno se plantean como una vía plausible. Actualmente estos materiales han encontrado aplicaciones puntuales y secundarias en el ámbito arquitectónico, en buena medida por sus costes productivos y su constante evolución, lo que vaticina un largo proceso en su introducción como materiales a la altura del acero o el hormigón pretensado.

El otro gran eje del cambio conceptual del nuevo siglo son las técnicas constructivas. Actualmente las técnicas empleadas aprovechan las características de los materiales comúnmente utilizados, pero durante los últimos años gracias a la revolución digital, se plantean la arquitectura impresa como una forma conceptualmente distinta de todo lo

anterior. Hoy comienzan su actividad empresas que ven una vía de futuro en la impresión parcial o total de la vivienda. Para ello, se conforman grandes impresoras 3D, que mediante un cabezal que dispone un cordón de hormigón en masa, conforma la sección de la edificación, capa a capa. Por su parte el armado se incorpora de forma manual durante el proceso. Así mismo existen impresoras que configuran estructuras de acero mediante la adición del metal fundido, aunque este ámbito se encuentra en una etapa más temprana. Todos estos intentos apuntan a una digitalización del proceso constructivo.

Con la revolución digital de las últimas décadas, se ha digitalizado el cálculo, la representación y en un futuro próximo la construcción. La experimentación actual y los descubrimientos procedentes de los laboratorios, nos presentan pinceladas de un futuro que está próximo y que igual que ha ocurrido repetidas veces en los últimos dos siglos, recurrirá a las formas actualmente empleadas, hasta que logre una expresión propia y diferenciada de cuanto conocemos. Esta modificación de los procesos constructivos, implica más un cambio en el concebir y el hacer, que en los márgenes dimensionales, que a la espera de la implantación efectiva de los nuevos materiales, encuentran su mayor eficiencia en las técnicas actualmente empleadas.

2. Influencia de las capacidades resolutivas en la proyección arquitectónica

En cada momento de la historia, la producción arquitectónica ha estado condicionada por las capacidades técnicas disponibles, lo que como se ha visto, engloba desde las cualidades intrínsecas de los materiales, a las técnicas empleadas en la resolución proyectual y el nivel de conocimiento que permite entender el comportamiento resistente de las estructuras. Los factores socio-económicos, también son de vital importancia para dibujar el panorama dentro del que se plasma la producción arquitectónica. Así toda obra, solo es correctamente leída teniendo en cuenta dicho marco de actuación, pudiendo hoy encontrarnos obras que hace escasas décadas se escapaban del ámbito de lo realizable. Como ya se ha señalado, el conocimiento no puede ser desaprendido, lo que permite entender el panorama de capacidades resolutivas como un constante incremento de la libertad de actuación. Pero así mismo hay algunas arquitecturas justificadas por un marco concreto que hoy no resultan repetibles, como expresa claramente Antonio José Mas-Guindal Lafarga cuando habla de las catedrales góticas: *“Hoy no se puede hacer el gótico de entonces. Ni las condiciones laborales son repetibles, ni existe hoy la sabiduría de los magíster operis de entonces”*³⁵⁰. Así toda obra está justificada por el marco en el que se realiza y con ello puede llegar a plantearse la imposibilidad de su realización en un marco condicional distinto.

Un claro ejemplo de la influencia de las capacidades resolutivas en la proyectación, son los espacios deportivos, en los cuales resulta inaceptable la presencia de soportes dentro del terreno de juego, al tiempo

Figura 188. Estadio de béisbol Tokyo Dome, Tokio (Japón), obra de Nikken Sekkei (1985-1988).

³⁵⁰ MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las Estructuras Antiguas o cuando las estructuras no se calculaban”*, España, Munilla-Lería, 2011, p. 111.

que se hace sumamente deseable la desaparición de los medios de sustentación de la cubierta en los graderíos, evitando así interferencias visuales. Este hecho marca de partida unos márgenes dimensionales a cumplir, con una variación mínima en función del tamaño de las gradas y la interferencia o no en éstas. Este panorama justifica que hasta tiempos recientes los espacios deportivos se encontraran exentos de cubrición o limitándose ésta a las zonas de los graderíos. Así unas exigencias dimensionales fuera de los márgenes aceptables para un cierto tipo edificatorio, condicionan las pautas resolutivas. Antes de poder optar por la cubrición total, se elaboran las cubiertas de los graderíos de los estadios deportivos, como medio de guarecer a los asistentes de las inclemencias meteorológicas, al tiempo que se aprovecha en el terreno de juego las ventajas de un exterior. Esto ocurre en ejemplos como los estadios de béisbol, que hasta recientes fechas se encuentran sin cubrición o solo con la cubrición de los graderíos, pero que en casos más recientes como el Tokyo Dome de 1988 (Figura 188), se opta por la cubrición total. Un alarde que en este caso no solo es dimensional, sino resolutivo, empleando una solución neumática, recurriendo a una sobrepresión en el espacio interior que permite mantener la forma de la cubierta, junto con un conjunto de cables pretensados, que resisten las tensiones de la sobrepresión interior. Así mismo este tipo de espacio y el control total de las condiciones del interior, lo han hecho apto para la realización de otras actividades, como conciertos, espectáculos varios y otro tipo de deportes que se ajusten dimensionalmente al terreno de juego configurado. Este es un ejemplo en el que la edificación, no solo se ha resuelto gracias a las capacitaciones dimensionales relativas al momento de su realización, cubriendo un área de 122 x 100 metros, sino que sumado a ello, se ha optado por un sistema constructivo atípico y más empleado en estos rangos dimensionales. Esta obra representa las mejores virtudes de la arquitectura neumática, conformando un firmamento artificial, que no solo parece levitar sobre el campo de juego, sino que literalmente se apoya sobre los 1,24 millones de metros cúbicos de aire contenido en la edificación, con una sobrepresión solo de un 0,3% con respecto al exterior. Para ello es necesario el funcionamiento continuo de unos ventiladores que permiten mantener elevada la membrana de la cubierta, empleando puertas giratorias en todos los accesos, para limitar las pérdidas de aire y optimizar todo el funcionamiento de la estructura neumática.

El Tokyo Dome, en los términos en los que está conformada la obra, sería impensable unas décadas antes, ya que el auge de los plásticos se produce entre 1920 y 1930, impulsando su desarrollo y aplicación la industria armamentística durante la Segunda Guerra Mundial, algo que tras este periodo bélico, brindó al ámbito arquitectónico un nuevo campo de investigación. Estos materiales, desde la década de 1960, fueron objeto de buena parte de la experimentación arquitectónica, que veía en ellos una vía evolutiva para la arquitectura futura y la industrialización de las formas arquitectónicas. Esta trayectoria forjó las bases para que a finales de los años 80 fuera materializable una obra como el Tokyo Dome, obra de Nikken Sekkel, empleando ETFE³⁵¹ (copolímero de etileno-tetrafluoroetileno) de la empresa Asahi Glass. Este material lo introdujo en el mercado DuPont en la década de 1970, cuando comercializó un polímero de fluoro-carbono, para su utilización como material aislante en la industria aeronáutica, pero no sería hasta 1982, que por primera vez se empleara el ETFE en el

³⁵¹ Los nombres comerciales más destacados del ETFE son: "Tefzel" de Dupont, "Fluon" de Asahi Glass Company y "Neoflon ETFE" de Daikin.

ámbito arquitectónico, en el pabellón de un zoológico en Arnheim (Holanda), obra de Stefan Lehnert, fundador de Vector Foiltec (Bremen). Obras como ésta, permitirían que 30 años más tarde, gracias a la experiencia acumulada, la misma Asahi Glass, se encargara de la realización de la cubierta de ETFE del Estadio Allianz-Arena (2002-2005) (Figura 189), en Alemania, obra de Herzog & de Meuron. En este estadio se juega así mismo con la iluminación de los 2.874 paneles romboidales de ETFE, definidos por los marcos metálicos, que permiten hinchar cada una de estas unidades a una presión de 0,035 hPa, así mediante un juego de color de la piel, se conjuga la pertenencia del estadio a dos equipos distintos. Así una obra actual como el estadio Allianz-Arena se puede enlazar con las obras anteriores que la han precedido generando las bases técnicas y la experiencia para su materialización. Aunque en ambos casos la utilización del ETFE está enfocada a distintos fines, se ve la conexión técnica, que permite enlazar obras aparentemente inconexas a través del conocimiento y los medios resolutivos implicados en su conformación.

El Tokyo Dome es un referente de las capacidades resolutivas de la arquitectura neumática y la potencialidad visual de los espacios generados, cuyo límite dimensional bien podría ser hoy considerablemente superior, teniendo en cuenta que las tensiones resistidas por la cubierta las soportan los cables pretensados que estructuran los módulos hinchados de ETFE. Así las capacidades resolutivas, muestran vías potencialmente atractivas para la conformación de proyectos de grandes dimensiones, con la experiencia acumulada a través de la producción arquitectónica previa. En el citado caso del Allianz-Arena dicho aprovechamiento de la potencialidad resolutiva, desde el punto de vista del Tokyo Dome, se ha centrado en la imagen generada por la resolución de la cubierta, centrando dicho cuidado expresivo al exterior, empleando elementos textiles al interior, para conservar dicha imagen ocultando las cerchas

Figura 189. Allianz Arena, Múnich (Alemania), obra de Herzog & de Meuron (2002-2005).

metálicas que resuelven la cubierta. Así la solución técnica y proyectual difiere, pero se percibe la causalidad de la producción arquitectónica, como respuesta de arquitectos e ingenieros ante problemáticas concretas en un marco condicional particular.

De una forma aun más evidente, se percibe la Influencia de las capacidades resolutorias en la proyección arquitectónica en el caso de las cubiertas laminares de hormigón. Como ya se ha comentado, el uso del hormigón armado se vio impulsado por la carencia de hierro de los periodos de guerra y en consecuencia el hormigón armado con su limitado uso de este recurso, se estableció como una vía económica para la producción arquitectónica. Este hecho, ha condicionado la producción arquitectónica de la primera mitad del siglo XX y con ello el desarrollo del movimiento moderno. Pero con este material no se podían realizar elementos

Figura 190. Restaurante Los Manantiales, Xochimilco (México), obra de Joaquín Álvarez Ordóñez y Félix Candela (1958).

horizontales con luces superiores a los 15 metros, por lo que para rebasar esta barrera dimensional, era necesario recurrir al factor de forma. Inicialmente se emplearon las formas conocidas del pasado: arcos, bóvedas y cúpulas, sistemas compresivos, pero rápidamente se sustituyeron estos esquemas resistentes, por otros más acordes a las nuevas capacidades del material. Así nacieron las estructuras laminares, que aprovechaban la indeformabilidad de las superficies de doble curvatura y la capacidad del material para asumir superficialmente, tanto compresiones, como tracciones, pero las formas realizables se limitaban al parámetro de lo calculable y con ello a las formas representables mediante sistemas de ecuaciones lo suficientemente simples como para asumir su cálculo manual.

Eduardo Torroja realiza un gran número de cubiertas de este tipo, en respuesta a problemáticas como la cubrición de grandes espacios en edificaciones industriales. Se emplean formas pragmáticas dictadas por justificaciones resistentes, cuyo atractivo recae en la propia belleza de la forma resistente. Posteriormente Félix Candela llevó la construcción de láminas

Figura 191. Crematorio de Kakamigahara, en Kakamigahara, Gifu (Japón), obra de Toyo Ito & Associates y el ingeniero Mutsuro Sasak (2004-2006).

de hormigón armado al sumun del virtuosismo, centrando la mayor parte de su labor en un país como México, que en esos años gozaba de una mano de obra económica, lo que posibilitó la amplia producción de este tipo de arquitectura económica. Precisamente la gran cantidad de mano de obra necesaria y el aumento de los costes de ésta, firmó su práctica desaparición en las últimas décadas del siglo XX.

Obras como el restaurante los Manantiales de Xochimilco (1958) (Figura 190), cubre una luz de 42 metros, similar a la cubierta en el Panteón de Agripa, pero con una fina lámina de hormigón. Desde el punto de vista del cálculo resistente, resultaba asumible su resolución por medios manuales, pero la mano de obra necesaria para la construcción del gran encofrado de madera que permitía el moldeo de la estructura, solo resulta factible en un margen muy concreto de la historia. Así cuando hoy se considera este tipo de resolución, no se piensa como antaño en un medio económico de construcción, sino en un alarde, con claras repercusiones dentro del presupuesto de la obra. Ejemplo de ello es el Tanatorio Municipal Meiso no Mori (2004-2006) (Figura 191), Kakamigahara-Shi, Gifu (Japón), obra de Toyo Ito, que percibe la belleza formal de la solución resistente y conforma una cubierta empleando una lámina de hormigón de doble curvatura, que se apoya sobre unos soportes cuya transición con la cubierta, impide el establecimiento de una distinción precisa entre ellos. La superficie de doble curvatura empleada en esta obra, difiere de la utilizada en la producción de Félix Candela, cuyo repertorio formal estaba claramente condicionado por los límites de lo calculable. Hoy los medios digitales posibilitan una libertad resolutive casi absoluta, rompiendo las barreras formales establecidas en periodos anteriores, que habían sido definidas por las propias limitaciones del hombre, para la resolución de los cálculos necesarios. Esta obra claramente se nutre de la amplia experiencia previa con cubiertas laminares de hormigón, al tiempo que aprovecha las capacidades resolutivas propias de su momento. En esta obra, concebida dentro de los amplios márgenes resolutivos de la actualidad, hay que reseñar que emplea, igual que en las obras de Félix Candela, un encofrado de madera, hoy sumamente costoso, tanto por el gasto material, como de la mano de obra necesaria para su confección. Los medios de producción informatizada actuales, bien podrían haber permitido hacer encofrados de poliestireno expandido, que de forma económica hubieran permitido un resultado similar y más en la presente obra, que no deja expuesta la textura propia del encofrado, única diferencia de resultado reseñable. Precisamente este tipo de industrialización de los encofrados, sería una de las vías que podría hacer factible el regreso de este tipo estructural, hoy en vías de extinción.

En la Estación de Autobuses del Casar de Cáceres (1998-2004) (Figura 192), obra de Justo García Rubio y Jaime Cervera Bravo, frente al purismo del Tanatorio Municipal Meiso no Mori, se opta por mostrar la tosquedad del material, una estética más próxima a la característica de estas obras, con las huellas del encofrado bien visibles, como parte de su esencia y su tacto. En esta obra, el tipo de formas empleadas hacen referencia a sus orígenes, pero con una libertad, que lleva a entender toda la obra como un pliegue de una lámina continua. Este gesto se produce en su mayor parte por la concepción de los puntos de apoyo, cuya forma niega la evidencia del contacto con el terreno y lateralmente escenifica una continuidad, que permite que el gesto domine sobre la realidad constructiva. Según se ha dicho, este tipo de resolución en la actualidad resulta costoso y por tanto se concibe la obra como un ente expresivo, que en casos como éste, se constituye a forma de hito y llamada de atención sobre la belleza

resistente. Así las estructuras laminares, hacen evidente que la producción arquitectónica no solo está condicionada por las capacidades técnicas de un tiempo, sino así mismo, por el panorama socio-económico. Precisamente este factor puede expandir y contraer los límites resolutivos efectivos, frente a las barreras dictadas por material, técnica y cálculo, ya que el conocimiento no puede ser desaprendido y es una trayectoria siempre ascendente.

Un mismo tipo estructural, en función del periodo en el que se realice, es concebido de manera distinta, así hay obras que en otros tiempos fueron posibles y hoy solo forzosamente representadas, mientras que la formalización arquitectónica actual en muchos casos, en otras épocas pertenecía al campo de la imaginación. El reconocimiento de esta realidad permite actuar con perspectiva, otorgando el valor que cada obra tiene en su debido contexto, fuera del cual su lectura, en mayor o menor cuantía, siempre está desvirtuada.

La economía de la construcción es en el panorama constructivo actual, incluso más relevante que en los periodos anteriores de la historia, ya que frente a la variedad resolutiva disponible, entre el amplio abanico de posibilidades constructivas, las más económicas gozan de una mayor implantación. Se produce una competencia económica dentro del marco técnico de la construcción, vital en la actual concepción del proceso constructivo. Así la elección basada en la competencia económica de las distintas soluciones determina, en buena medida, la conformación final de la obra.

Figura 192. Estación de Autobuses del Casar de Cáceres (España), obra de Justo García Rubio, Jaime Cervera Bravo y Joaquín S. Macedo Morales (1998-2004).

La prefabricación, es una de las tendencias más claras en la construcción, desde el empleo de elementos de mayores proporciones, que limitan la mano de obra, hasta resoluciones globales, capaces de reducir los plazos de construcción, a tiempos que hasta recientes fechas resultarían imposibles, como en el caso de un rascacielos prefabricado realizado en Changsha (China), obra del arquitecto Xian Min Zhang, en 2015 (Figura 193), realizado en solo 19 días. Este tipo de alternativa a la convencionalidad constructiva, hoy es innegable y plantea nuevas vías a considerar en toda obra a acometer. En el caso de las arquitecturas de grandes luces, por su carácter extremo resultan más relevantes las variaciones económicas y con ello más susceptibles de este tipo de factor decisivo para su realización.

A lo largo de los años, las personas que se han arriesgado a ir más allá de lo establecido, superando las limitaciones a la producción del hombre, son los grandes benefactores a los que actualmente hay que dar gracias, como piedras angulares sobre las que se afianza el camino hacia la contemporaneidad tal y como la conocemos. Hay personajes tan representativos como Eugène Freyssinet, el padre del pretensado, John Augustus Roebling a quien debemos grandes avances en el ámbito de los cables y tantos otros, cuyos logros nos permiten dibujar la imagen actual de la arquitectura y la ingeniería. Pero así como hay esas grandes figuras reconocibles, personajes como Emilio Pérez Piñero³⁵² (1935-1972), quedan prácticamente

Figura 193. Rascacielos prefabricado en Changsha (China), obra del arquitecto Xian Min Zhang, 2015.

relegados al olvido, aunque cuando su obra es contemplada con ojos comprensivos vemos cuanto se les debe.

En este caso se le conoce entre otras obras por la cúpula del Museo Dalí en 1972, que es claramente una cúpula geodésica análoga a las desarrolladas por Richard Buckminster Fuller, quien ostenta su patente desde 1954. Así mismo y más interesante, anteriormente en 1962, diseña una cúpula rebajada plegable, que perfeccionaría con los años para hacer una cubierta de grandes dimensiones plegable y transportable, con un desarrollo geométrico basado en las

³⁵² A Emilio Pérez Piñero debemos la realización de la ermita de la estación de Calasparra (1962- 1963), una obra inconclusa, que es la única obra arquitectónica en suelo español en la que intervino Eugène Freyssinet. Esta obra de pequeñas dimensiones, se conforma como la suma de planos curvos sobre los que se apoyan unas cubiertas laminares similares a las realizadas por Félix Candela. Por desgracia la obra quedó inconclusa y sin cubrición alguna, por lo que permanece como un esqueleto perdido entre los montes murcianos. Como único recuerdo de lo que pudo ser, se conserva en la Fundación Pérez Piñero la documentación de este proyecto y la maqueta de yeso realizada para la construcción.

cúpulas geodésicas. Este invento se aplicó en 1965 cuando el Ministerio de Información y Turismo le encargó un teatro transportable para el desarrollo de festivales por toda España (Figura 194), haciendo alarde del lema de la época *"Spain is different"*. Este recinto plegable tenía capacidad para 1800 personas, distribuidas en dos cúpulas unidas de 31 metros de diámetro, que plegadas eran fácilmente transportables en una furgoneta. Esta mención es un mero recuerdo para a cuantos inventores olvidados debemos agradecer por su esfuerzo. Tras ellos queda su obra y su aporte al conocimiento global, actuando sobre los factores que dibujan nuestra realidad y nos permiten leerla de una forma diferente. Su labor como parte de la consciencia global, forma parte de los cimientos sobre los que se asienta el futuro en ciernes.

Figura 194. Cúpula reticular desplegable, para la conformación de un teatro transportable (España), obra de Pérez Piñero (1965).

3. Conclusiones

Toda tesis es más que la búsqueda de un fin concreto, es el reflejo de un camino hacia el conocimiento y la intriga que suscitan las razones detrás de un hecho o una obra. Ese interés por la búsqueda de las claves que nos conducen hasta el presente y nos guían hacia el futuro, es un sendero de autodescubrimiento, que marca el rumbo por sendas que previamente no podríamos haber imaginado, modificando nuestra percepción de los hechos. Esta tesis, partiendo de un interés personal, busca entender mejor el papel en la actualidad de las arquitecturas de grandes luces, encarando dicha labor desde la influencia técnica (materiales, técnicas y medios de cálculo), desarrollando el tema desde un punto de vista no abordado anteriormente. Así este estudio, ofrece una visión alternativa de la problemática ligada a los proyectos de grandes luces, desde sus orígenes hasta su desarrollo en el panorama actual.

Marco conceptual

Previo a la exposición de las conclusiones, es necesario recapitular algunos de los conceptos relevantes señalados a lo largo del estudio, ya que reflejan una forma de pensar y encarar, tanto la lectura histórica de los acontecimientos, como el panorama actual. A través del recorrido realizado, los siguientes conceptos han demostrado ser de vital importancia a la hora de encarar la influencia técnica en la concepción arquitectónica y en especial en los proyectos de grandes luces:

- Las claves **del panorama arquitectónico actual, radican en el proceso histórico** que ha conducido hasta la conformación del presente marco constructivo, como parte de un recorrido incesante que nos guía hasta la arquitectura *“propia”* del siglo XXI.
- **Las obras que emplean grandes luces** y en mayor medida aquellas que buscan una superación dimensional, **constituyen el ámbito arquitectónico que mejor refleja las capacidades técnicas y dimensionales, relativas al marco temporal, socioeconómico y geográfico**, en el que se ha realizado el proyecto. Así mismo, hay que tener en consideración, que desde mediados del siglo XIX los límites dimensionales determinados por el marco capacitivo, se encuentran en el ámbito de la ingeniería civil, empleándose en arquitectura menores dimensiones, surgidas de la respuesta racional a la problemática funcional y expresiva.
- El análisis histórico de los límites dimensionales, demuestra cómo **el hombre hasta el siglo XVIII buscó la “optimización formal”**, como vía para la realización de estructuras compresivas de grandes dimensiones, dada la incapacidad de las fábricas de piedra y ladrillo, de resistir esfuerzos tractors. Hasta ese momento, sólo la madera podía soportar ese tipo de esfuerzos, estableciendo las escuadrías disponibles, los límites dimensionales de las vigas de dicho material. Así, las cerchas resolutivamente buscaban

ampliar los rangos dimensionales en la formación de cubiertas. Sólo **la incorporación en el siglo XIX al panorama resolutivo de un material como el hierro, capaz de resistir tracciones, modificó todo el ámbito arquitectónico**, rompiendo las barreras dimensionales y resolutivas, que durante siglos parecieron inmutables.

- **La aparición de los materiales tenaces, es la principal causa de la revolución arquitectónica de los dos últimos siglos**, desde el punto de vista dimensional y de complejidad resolutiva. Así mismo, se ha pasado del empleo de materiales basados en un proceso de *“selección”* de elementos naturales, a un *“diseño empírico”* de los materiales, que durante el siglo XX, ha dado lugar al *“diseño basado en la ciencia e ingeniería de materiales”*.
- De forma simultánea a la revolución producida en el ámbito de los materiales, se producen **los avances en los medios de cálculo, que permiten el dimensionado previo de las estructuras. Anteriormente el dimensionado de las construcciones se basaba en las experiencias previas, que dibujaban los márgenes de lo realizable. Se pasa de un “conocimiento empírico”, a un “conocimiento científico”**.
- El hormigón armado, es un material limitado a la hora de conformar estructuras enmarcadas dentro del ámbito de las grandes luces, sin emplear el recurso del factor de forma³⁵³. Este hecho es lo que justifica, que con este tipo de material el ámbito de estudio se centre primordialmente en las cubiertas laminares, que armadas en ambas direcciones, aprovechan las características del material y las virtudes geométricas de las superficies de doble curvatura.
- **La incorporación del hormigón pretensado**, tal y como lo desarrolla Eugène Freyssinet, revoluciona el uso de las estructuras de hormigón, ya que **permite el control de las tensiones internas del material y las deformaciones**, limitando los esfuerzos tractores sobre el hormigón en la fase de servicio. De esta forma, se **hace posible la realización de elementos horizontales de grandes luces**, lo que permite, entre otras cosas, emplear las grandes luces a distintos niveles y no exclusivamente como elemento de cubierta. Hasta ese momento, los únicos elementos horizontales capaces de cubrir grandes luces, eran las perfilerías de acero o las cerchas resueltas en este mismo material.
- **El pretensado** es aplicable a otros materiales, imponiendo una configuración tensional, que pasa a formar parte del acto proyectual, ejerciendo un control sobre el comportamiento resistente, limitando tensiones y deformaciones. Este recurso, resulta de vital importancia en tipologías proyectuales como las cubiertas ligeras o estructuras en las que las deformaciones admisibles son sumamente reducidas, como en el citado caso del Caixa Fórum de Madrid y otras innumerables situaciones. Esta técnica más allá

³⁵³ Al referirnos a *“factor de forma”*, se hace referencia a cuando la arquitectura adapta su diseño para mejorar su comportamiento resistente. El mejor ejemplo de ello serían los arcos, bóvedas y cúpulas, que desde el punto de vista resistente, adaptan su diseño para contener en su interior, el antifunicular de las cargas, limitando la aparición de tracciones que el material era incapaz de resistir. Si bien este concepto no existía hasta fechas recientes, dicha adaptación se producía en base a la experiencia acumulada en la producción arquitectónica previa.

de sus orígenes en el siglo XX, **se ha constituido como uno de los recursos básicos del siglo XXI.**

- Los conceptos teóricos para el **cálculo matricial de las estructuras**, surgieron mucho **antes de que se dispusiera de los medios para su aplicación práctica**, lo cual solo ha sido factible gracias a la aparición de los medios informáticos, que han posibilitado que la producción del hombre trascienda de las limitaciones intrínsecas a éste. Hoy se logran resolver sistemas matriciales de grandes proporciones, que permiten conocer el estado tensional de la estructura, así como sus deformaciones. Este hecho tiene una traslación directa en la forma de concebir la estructura, ya que **sólo se construye aquello que resulta calculable**. En el campo de las estructuras laminares, este hecho posibilita el uso de formas más complejas, ya que las empleadas clásicamente, debían resultar definibles mediante sistemas de ecuaciones resolubles con medios de cálculo manual.
- De forma análoga a lo acontecido con el cálculo informático, posteriormente los medios de representación digital han cambiado la forma de proyectar y aunque permanecen inalterables las plantas, alzados y secciones, como documentación arquitectónica básica, la representación tridimensional de los proyectos, hace así mismo posible la realización de una *“maqueta digital”*, que permite ensayar el proyecto de una forma distinta. En este ámbito, los medios de representación BIM (Building Information Modelling), permiten que a través de la modelización volumétrica del proyecto, se pueda unificar toda la documentación, empleando éste, como único elemento de referencia para la edición de toda la documentación de la obra, sacando de forma automática y sistematizada: plantas, alzados, secciones, mediciones y todo un compendio documental congruente. Estos medios de representación han cambiado la forma de trabajar en los estudios, lo que en cierta medida puede tener un reflejo en las obras así producidas, aunque actualmente no se perciba ninguna particularidad. Este sistema aun no está generalizado, pero ante su carácter práctico indudablemente se extenderá su empleo en el siglo XXI.
- La revolución digital ha permitido hacer modelos virtuales tridimensionales de la obra y de forma consecuente han aparecido impresoras 3D, con las que realizar maquetas de forma rápida y fiel. En estos últimos años, la línea más interesante en este aspecto, son los intentos realizados que buscan **imprimir la obra arquitectónica directamente, por lo que ya se podría hablar de “arquitectura impresa”**. Las impresoras 3D de grandes dimensiones empleadas, aun están en desarrollo, pero los modelos realizados auguran un gran futuro para este tipo de arquitectura, que se realiza en plazos nimios. Este tipo de obras actualmente se orientan hacia el hormigón armado y hormigón en masa, pero ya se están desarrollando robot, que imprimen secciones de acero. Este tipo de recurso aun se encuentra en fases muy tempranas, pero dado su carácter industrial, la reducción de la mano de obra necesaria y de los residuos producidos durante la construcción, así como la celeridad de la ejecución, será sin lugar a dudas un recurso vital en la arquitectura del siglo XXI, aunque aún queden décadas para poder considerar su implantación generalizada, como recurso constructivo.

- **La prefabricación** es un tipo de resolución arquitectónica que tiene un amplio recorrido y durante las últimas décadas ha demostrado ser capaz de responder, tanto a las problemáticas de la ingeniería civil, como a la arquitectura, con casos tan llamativos como la construcción en un corto lapso de tiempo de grandes torres. Este tipo de solución, **caracterizada por la eficiencia y la precisión, tiene un claro papel en la arquitectura del siglo XXI, como una de las principales líneas de actuación**, por su clara concordancia con el tipo de preocupaciones presentes en el marco actual, como la economía y la sostenibilidad.
- El incremento de la complejidad de las labores asociadas a la construcción, ha llevado a hacer de ésta, una labor interdisciplinar, en la que siendo el arquitecto el director, aparecen técnicos especializados en las diferentes áreas, para la correcta resolución de la obra. Este hecho está principalmente representado por la escisión de la profesión en arquitectos e ingenieros, desde el tronco común de la arquitectura según la definía Vitrubio, como el *“arte de construir”*.
- Arquitectos e ingenieros, como dos caras de la misma moneda, durante el proceso de ideación de la obra han de actuar de forma coordinada, ya que como demuestra la historia, **gran parte de las obras que hoy reconocemos como ejemplos relevantes dentro del panorama internacional, han contado activamente con la presencia de un gran ingeniero o ingeniería**, gracias a la cual se ha podido materializar la idea del arquitecto con mayor fidelidad y rotundidad. Esta relación se hace patente con mayor intensidad en las obras que emplean soluciones de grandes luces, ya que la problemática resolutoria que llevan asociadas este tipo de obras, es mayor y por consiguiente existe la necesidad de la presencia de un profesional especializado que se encargue de la resolución estructural, lo que en ningún caso debe ir desligado del diseño formal de la estructura. Así, durante las últimas décadas, se ve claramente como estudios de ingeniería como ARUP, NB35, Schlaich Bergermann und partner... están presentes en la realización de aquellas obras de relevancia dentro del panorama internacional. Muchas de estas obras enmarcadas dentro del ámbito de las grandes luces, reflejan en su imagen la resolución técnica, como parte vital de la expresión proyectual. Tanto el arquitecto, como el ingeniero, son igualmente artífices de la obra, no pudiendo, bajo ninguna circunstancia, considerar al ingeniero un recurso auxiliar del proceso de diseño.
- La estrecha relación de arquitectos e ingenieros en el panorama actual es bidireccional, no solo los ingenieros presentan un papel activo en la fase de diseño de los proyectos arquitectónicos, sino que los arquitectos intervienen en la realización de proyectos como los puentes, tradicionalmente labor de los ingenieros. En ambos casos la suma de estas visiones diferentes del *“arte de construir”*, logran obras de mayor calidad e impacto, al atender de forma más precisa los pormenores resolutorios, que van desde la conformación de la obra, a su lectura e impacto social. Así hoy la barrera que diferencia ingeniería y arquitectura ha demostrado ser inexistente, ya que ambas responden a la necesidad de adaptación del entorno para la vida del hombre, solo pudiendo existir matizaciones en la respuesta funcional.

- La relevancia en el panorama actual de las grandes luces, no solo se percibe en la obra realizada, sino así mismo en los PFC de las Escuelas de Arquitectura, ya que un amplio porcentaje de los trabajos presentados emplean este recurso proyectual.
- Dentro del ámbito docente, los aspectos relativos a la concepción del proyecto y la resolución estructural, se encuentran inconexos, un hecho que sería recomendable subsanar en futuros programas docentes, con alguna materia intermedia, que mostrara la relación entre ambas facetas de la arquitectura. Este proceder, redundaría en un cambio en el proceso de pensamiento a la hora de acometer los proyectos desde las primeras fases reflexivas, desde el conocimiento de los márgenes de la capacitación técnica y de las distintas opciones resolutivas y líneas en las que se puede actuar.
- **El marco socioeconómico**, poniendo especial énfasis en el “económico”, **es uno de los principales factores que ha influido en la producción arquitectónica a lo largo de la historia**. Durante los dos últimos siglos, los condicionantes económicos han resultado decisivos para los recursos constructivos empleados y la definición de los márgenes de lo realizable, dentro del marco arquitectónico. Claro ejemplo de este hecho, son las estructuras de hormigón armado, que han marcado la producción arquitectónica europea del siglo XX, esto no hubiera sido así de no haber sucedido las dos Guerras Mundiales en la primera mitad del siglo, como demuestra el hecho de que la producción arquitectónica norteamericana contuara con la arquitectura en acero, al no ver devastados sus territorios por los conflictos.

Durante estos lapsos de tiempo, el hierro se destinaba a la producción armamentística, por lo que se generó una carestía de este recurso en el ámbito constructivo, lo cual obligó a buscar otras opciones, potenciando la implantación de las estructuras de hormigón armado. Las estructuras de hormigón armado, en este punto ya tenían un cierto recorrido, pero su implantación era muy limitada y probablemente se hubiera mantenido en este papel secundario frente a las estructuras metálicas, si las circunstancias no hubieran impulsado su implantación como medio de construcción “económico”. Por su parte, la práctica desaparición de las estructuras laminares se debe a causas similares, en este caso por el aumento del coste de la mano de obra, pasando de una solución económica, a un gravoso alarde formal.

- Durante los últimos años, la producción arquitectónica se ha visto marcada por una crisis económica global, que ha impulsado una mayor implicación con la construcción sostenible, el ahorro energético y la economía de medios. Así, todo alarde debe presentar una justificación que argumente dicha decisión, sea de índole funcional o representativa.
- **Las arquitecturas clasificadas como de grandes luces, presentan singularidades** más allá de la resolución estructural y las dimensiones, **implicando un enfoque proyectual destinado en cierto grado a la representatividad**, por lo que más allá de la necesidad tácita en la respuesta funcional, exigen especial mención las connotaciones implícitas a la solución empleada y el efecto ejercido sobre el usuario, lo que entraña una finalidad

precisa. Por ello en función del efecto deseado, se pueden optar por distintos tipos de configuraciones, cada una de ellas con unos resultados claramente demarcados³⁵⁴.

Marco condicionante de la producción arquitectónica

En base al estudio histórico realizado (Tomo II: Anexos), se pueden plasmar en un único gráfico, tanto los avances en materiales y técnicas, como en los medios de cálculo, interrelacionando conceptos. Así mismo, se puede establecer una relación con las luces máximas alcanzadas por el hombre, aunque como ya se ha reiterado, estas pertenezcan al campo de los puentes, ya que los márgenes justificadamente empleados en arquitectura, se ven coartados por otras argumentaciones distintas a la capacidad resolutive.

La lectura de los condicionantes a los que está supeditada la producción arquitectónica, puede ofrecer una foto fija del panorama en el que se realizan las obras (Figura 195). Con esta herramienta, a la hora de interpretar una obra se puede contextualizar ésta, entendiendo su realización como respuesta a un panorama concreto y unas capacidades productivas, que se modifican radicalmente dependiendo del marco en el que se produce. La confección de este cuadro, es en sí misma uno de los objetivos de la tesis, ofreciendo una visión de conjunto no planteada con anterioridad. Si bien todos los datos plasmados son bien conocidos, el hecho de encontrarlos todos en un mismo documento, hace posible una lectura global de cada momento de los últimos siglos, atendiendo a algunos de los principales factores que inciden sobre la labor proyectual. Esto ofrece una referencia, aunque como ya se ha comentado, otras grandes variables son el marco temporal, socioeconómico y geográfico, del que depende el ámbito arquitectónico concreto en el que se realizan los proyectos.

³⁵⁴ Este tipo de cuestiones son las que se encuentran explicadas en los capítulos relativos a la taxonomía proyectual, como modo de entender las implicaciones ligadas a los distintos tipos resolutivos.

Figura 195. Marco condicionante de la producción arquitectónica.

Taxonomía proyectual de grandes luces en la actualidad

Partiendo de la perspectiva que nos otorga la historia, se ha realizado un estudio taxonómico de la producción arquitectónica actual, basado mayormente en obras con menos de una década. Esta escasa vida, no permite realizar un acercamiento en los términos clásicos, tal y como se hace a obras de mayor antigüedad, ya que no se cuenta con el distanciamiento de su marco temporal que permite poner la obra en perspectiva. Por ello, se ha procedido a seleccionar un grupo de proyectos representativos del marco arquitectónico actual, determinando las pautas taxonómicas, así como las obras especialmente significativas de cada tipo, en las que se exponen sus particularidades. Un análisis de la contemporaneidad, implica una variabilidad y una viva interpretación de los acontecimientos, que en muchos casos modifican aspectos de nuestra percepción constantemente, como en el caso de los avances en el campo de los materiales, la arquitectura impresa, la prefabricación...

La producción arquitectónica definida en el marco de las grandes luces, realizada durante los últimos años, podemos dividirla primeramente en dos grandes ámbitos, claramente demarcados:

- El primero lo constituyen las obras que se centran en los aspectos volumétricos y por tanto en la interacción con el entorno y su lectura desde éste.
- El segundo lo engloban aquellas obras cuya primordial preocupación es la espacialidad interior, configurando espacios, que en distinto grado, trabajan el concepto de *"firmamento artificial"*, como máxima ostentación arquitectónica de conformar un ambiente ideal para el hombre.

Esta clara distinción entre las prioridades proyectuales, establece el origen para el análisis de los tipos, aunque en la mayor parte de las obras aparezcan combinados varios de ellos para la resolución global de la obra.

La división taxonómica ligada a los proyectos de grandes luces, es la siguiente:

Volumen exterior. La arquitectura como configuración de volúmenes bajo la luz

Por su parte al hablar del volumen exterior, en palabras de Le Corbusier, se hace referencia a que *“La arquitectura es el juego sabio, correcto y magnífico de los volúmenes bajo la luz”*. Un punto de vista claramente relacionado con los efectos escenográficos y la búsqueda de una imagen representativa o capaz de suscitar una reacción en los potenciales usuarios de la edificación. **El volumen arquitectónico se expresa a través de la conformación de su masa y su sustentación**, como medio de establecer un diálogo con el entorno y el transeúnte. **Es precisamente en esa relación entre la “percepción de la masa” y la “percepción de la sustentación”, en la que se produce la gradación que define los tipos**, con enfoques claramente diferenciados, tanto desde el punto de vista de la finalidad, como de los medios resolutivos asociados. Así atendiendo a la conformación de un volumen principal, éste puede tener unos medios de sustentación que intenten perder presencia en el caso del *“volumen suspendido”*, o bien pueden emplazarse de forma plenamente patente en los extremos, como en el caso del *“volumen puente”*, por último pueden situarse los medios de sustentación solo en un único lado, como en el caso del *“volumen en voladizo”*. En estos tres casos, partiendo de una base geométrica, se estructuran formas resolutivas claramente particularizadas, que hablan de términos como: desequilibrio, levitación, acogimiento, espacios compresivos, espacios aéreos... una terminología propia del ámbito proyectual, que busca suscitar una respuesta precisa en el usuario.

Volumen suspendido: en este caso, nos encontramos ante edificaciones en las que **los medios de sustentación permanecen perceptivamente en un segundo plano**, para escenificar la levitación del volumen edificatorio, sea éste una cubierta o un volumen programático. Por una parte, están aquellas cubiertas que su aparente levitación es concordante con la resolución técnica empleada, siendo el marco de actuación de las cubiertas ligeras, expresión de la optimización técnica, que permite emplear una cantidad mínima de materia para la cubrición de grandes espacios. En este caso, la ligereza de la solución, puede aparecer por requerimientos proyectuales, como su apoyo en edificaciones existentes, limitando el impacto de la intervención sobre la edificación previa. Este tipo de resolución emplea recursos como las superficies de doble curvatura, el pretensado y como material resistente el acero, conformando la superficie de la cubierta, tanto vidrio, como telas y materiales como el ETFE. En este aspecto la optimización resistente adquiere expresión por sí misma, sin velos superficiales que escondan su naturaleza. En otros casos, el volumen suspendido acoge parte o la totalidad del programa de la edificación, de forma que en lugar de trabajar con planos, se pasa a concebir un volumen, cuya masividad perceptiva es uno de los principales factores, siendo aun más relevante la distancia entre éste y el terreno, ya que de ello y la configuración de los medios de sustentación, dependerá el efecto logrado. **Contra más próximo se encuentre el volumen al terreno, más se refuerza la percepción de masividad del volumen, reduciéndose este efecto mientras más se distancie del terreno, hasta en un caso extremo concebirse como un volumen aéreo.** Por su parte, **la percepción de la masa de la edificación puede ir ligada a los materiales empleados**, estableciendo una gradación que va desde la masividad de los materiales pétreos, hasta la apreciación de liviandad que ofrecen otros materiales, como los textiles, los vidrios o planchas de déployé, entre otros. De esta forma se puede escenificar, desde una gran

mole que permanece suspendida en el aire, generando un efecto de contradicción visual, hasta otras soluciones en las que el volumen parece flotar, como si esa fuera su naturaleza. **Estos recursos tienen un claro enfoque representativo y en raras ocasiones responden a una necesidad funcional** impuesta de partida. Así mismo, se puede hacer una clara distinción entre los proyectos, en función de si existe o no, una concordancia perceptiva (ligereza o masividad), con el tipo de solución resistente empleada, ya que de existir una concordancia, es más factible que se produzca una expresión técnica y una sinceridad constructiva, frente al otro grupo más escenográfico.

Este tipo de resolución proyectual es propia del siglo XX y por consiguiente no se pueden encontrar referencias clásicas ni tipos previos. Este tipo de recurso, se ha convertido en una forma de expresión extendida entre un buen número de proyectos representativos de los últimos años, como el caso del Caixa Forum de Madrid, que da fiel reflejo de las virtudes de este tipo de resolución, confeccionando un foco de atención dentro de una de las principales vías de la capital, como un contrapunto frente a la arquitectura del entorno.

Volumen puente: en este caso, **existen referencias previas, que prestan una simbología heredada de la tradición**, que tiñe la lectura de la obra en función de los referentes, que de forma abstracta se enlazan con la edificación. Así, **con un mismo tipo resolutivo, se puede confeccionar el símbolo de “puerta” o bien el “nexo”** que representan los puentes en una traslación visual más directa. El primer referente está claramente enfocado a la representación del acogimiento y el paso, una abstracción del concepto previo de las puertas de acceso a las ciudades o los arcos del triunfo, como referentes visuales en la trama urbana. Ejemplo de ello es el caso del Arco de la Défense en París, en el que se conforma el símbolo de la puerta. Por su parte, aquellos proyectos más cercanos a las problemáticas de los puentes, intentan salvar un obstáculo, sea natural o simplemente que se desea liberar dicho paso bajo la edificación, como en el caso del Ayuntamiento de Benidorm. La cercanía de la problemática resolutiva de este tipo de proyectos a la de los puentes, hacen que la traslación constructiva pueda ser más directa, aunque en la mayor parte de los casos se centra en el empleo de cerchas de grandes proporciones o vigas pretensadas de hormigón, ya que las dimensiones definidas por la necesidad programática, raramente exigen medidas resolutivas más extremas. En este tipo de proyectos, la sustentación se produce de forma extrema, siendo de gran relevancia la entidad de los mismos, a los que se enlaza el volumen elevado. Así con una clara presencia, que impide su clasificación dentro de la categoría anterior, bien puede entenderse dependiendo de la proporción, que el volumen puente tiene mayor entidad o por el contrario forma parte de un conjunto mayor, adquiriendo un carácter accesorio y representativo dentro del conjunto.

En la producción arquitectónica, **existe una asociación formal que permite manipular la interpretación que se hace de la obra, para que ésta adquiera un simbolismo** entendible por la consciencia colectiva de la sociedad. En esta categoría proyectual, este hecho se hace plenamente patente, algo que no ocurre en las otras dos categorías, dada la inexistencia de referentes históricos, más allá de las últimas décadas en las que materiales, técnica y cálculo lo han hecho posible.

Volumen en voladizo: en este caso el patente desequilibrio de la forma, suscita la atención del usuario ante el reto a la cotidianidad constructiva, como desafío visual a dos de los tres principios que rigen toda estructura: equilibrio, estabilidad y rigidez. Se **escenifica un desequilibrio e inestabilidad y se centra buena parte de la atención en la rigidez de la unión entre el volumen en voladizo y el de sustentación.** Precisamente dependiendo de la entidad del volumen asociado al voladizo, se modifica la interpretación de éste, pudiendo leerse como un voladizo “aislado” o “asociado”, formando parte o no de un conjunto de mayor entidad. Como parte de un conjunto ejerce la función de foco de atención, otorgando una mayor relevancia a dicho punto de la edificación, como ocurre en el caso de la Sede Central de Endesa en Madrid. Cuando se encuentra como gesto total de la edificación, se incrementa el impacto visual del gesto, al hacerse más patente el desequilibrio. En este caso se conforma un hito dentro de la trama urbana. Por lo que se refiere a la resolución estructural, pese a que formalmente no existen modelos similares en el caso de las obras de ingeniería civil, resolutivamente se acomete dicha formalización con un lenguaje, en algunos casos claramente referenciado en los ámbitos de la ingeniería civil, como en el citado ejemplo de Endesa, aunque la solución más extendida es la resolución mediante cerchas trianguladas.

La concepción exterior de las obras, tiene un claro enfoque perceptivo y en tales términos se encuentra orientada a la representación o a la transmisión de un mensaje, lo que se expresa mediante el lenguaje de las formas. Este tipo de expresión es similar a la confección de una melodía, pero con la complejidad inherente al cambio generacional de la interpretación que se hace de los distintos gestos. **Las soluciones de grandes luces, son el tipo resolutivo conceptualmente más intrínsecamente ligado con la contemporaneidad y por eso mismo, el simbolismo adquirido en su breve recorrido histórico, presenta gran interés en su lectura por el usuario.** Movimientos como el High-Tech son vitales para entender la lectura que hoy se hace de las obras de grandes luces, se empleen o no, referentes o conceptos de este movimiento.

Volumen interior. Generación de entornos controlados

Por su parte, **las grandes luces enfocadas a la conformación de grandes espacios, son una línea resolutiva ligada con la tradición histórica,** en la que encontramos referentes como el Panteón de Agripa, Santa María del Fiore o las grandes catedrales góticas, que demuestran un interés en la superación dimensional. Así mismo, este tipo de espacios se asociaron por su grandiosidad y la escenografía, al poder o a la grandeza de una deidad. El siglo XIX rompió ese encorsetamiento resolutivo, pudiendo conformarse espacios de grandes luces en edificios industriales o en nuevas edificaciones como las estaciones de ferrocarril, que carentes de precedentes, buscaron su forma y representatividad en las grandes luces y las cerchas de hierro, recurriendo generalmente al empleo del factor de forma, lo que enlaza estas obras con la tradición, aunque sea más por la eficiencia resistente, que con una intencionalidad referencial.

Con el objetivo de cubrir grandes espacios, se ha optado a lo largo de la historia por dos líneas de actuación. Primeramente, las mallas de soportes han sido una opción más económica, ligada a las dimensiones alcanzables por medios convencionales. Actualmente las dimensiones alcanzables con los materiales y técnicas que consideramos convencionales, alcanzan rangos en el ámbito de las grandes luces. Así edificios industriales, comerciales... se encuentran en un marco dimensional medio, facilitando las actividades realizadas en su interior, sin recurrir a medidas más costosas. Esta cotidianidad resolutive, permite una mayor libertad de actuación, pudiendo optarse por una representatividad resolutive, cuyos márgenes de actuación están claramente ligados a los patrones geométricos básicos de las mallas, pudiendo diferenciar entre: mallas unidireccionales, bidireccionales y multieje. En segundo lugar, de forma más acorde con la imagen de las grandes luces, se puede optar por la conformación de un espacio unitario de grandes dimensiones. En este caso y dada la entidad de los espacios, superadas las limitaciones dimensionales anteriores al siglo XIX, se conforma un microcosmos que recrea las condiciones idóneas para la vida del hombre y el desarrollo de sus actividades. Desde este punto de vista, se puede establecer una diferenciación entre los distintos grados en los que este espacio se relaciona y ancla con el entorno y como caso extremo, se desliga de él, al punto de poder existir en cualquier lugar, sin que conceptualmente se presente una influencia directa en la conformación del espacio interior.

Mallas de soportes: este tipo da respuesta a la cubrición de grandes extensiones, en las que la presencia de soportes es compatible con la función a la que se destina, estableciendo una repetición modular. En estos términos se pueden distinguir las edificaciones dependiendo del tipo de ordenación de los soportes, los cuales adquieren buena parte del interés expresivo del espacio, siendo objeto de una amplia reflexión en el proyecto. **Las ordenaciones irregulares permiten interpretar el espacio como una totalidad indivisible**, en la que no se pueden establecer alineaciones de soportes que marquen un patrón organizativo. Este tipo de ordenación permite una adaptabilidad de la malla a las exigencias funcionales, aunque establecen una respuesta particularizada a la problemática concreta. Por su parte, **las mallas regulares de soportes, constituyen respuestas aplicables a un mayor rango proyectual, distinguiéndose entre los tipos de crecimiento: unidireccional, bidireccional y multieje.**

Cada uno de los tipos de crecimiento, cuenta con particularidades proyectuales que ayudan a seleccionar cada uno de ellos en función de la expresión espacial deseada. En el caso de las mallas unidireccionales, la sección tipo que se repite, puede gozar de una mayor libertad resolutive, lo que permite alardes formales como los de la Terminal 4 del Aeropuerto de Madrid Barajas Adolfo Suárez, que se asemeja a un ave elevando el vuelo. Este tipo de crecimiento está orientado a la extensión en una dirección, por lo que cuando se requiere en dos direcciones se repite el modelo, conformando bandas claramente diferenciadas. Cuando se trata de mallas bidireccionales, la igual relevancia de ambas direcciones limita las soluciones formales empleables, pero así mismo centra aún más el interés expresivo en los soportes. Así este tipo de crecimiento, permite la extensión en todas las direcciones de forma ilimitada, conformando el perímetro las exigencias funcionales del proyecto. En este tipo de proyectos se pueden emplear esquemas arbóreos, siendo el principal ámbito tipológico en el que se puede encontrar este tipo de solución. Al hablar de esquemas multieje, se hace referencia a cuando la

organización de la malla de soportes no es concordante con la de la cubierta, estableciendo otro sistema ordenado de referencia, lo que limita aún más la geometría resolutive empleable. Al independizarse los sistemas ordenados de referencia de los soportes y la cubierta, se produce una desvinculación visual de estos, frente a los dos modelos de crecimiento anteriores, en los que la lectura de los soportes y la cubierta resultaban indisociables.

Este tipo de proyectos resultan relativamente económicos y se emplean principalmente para la cubrición de grandes extensiones. **En estos espacios, los soportes y su diseño, son de vital importancia para la lectura del espacio**, adquiriendo especial interés en proyectos como los aeropuertos, en los que en algunos casos llegan a actuar como espacios servidores de la sala principal. En este tipo de proyectos aparecen, tanto estructuras de hormigón, como de acero, pero las perfilerías metálicas permiten mayores alardes geométricos y una mayor ligereza, lo que generalmente hace que la resolución proyectual se decante por las estructuras metálicas.

Este tipo de resolución es la más extensamente empleada en los proyectos de aeropuertos y espacios comerciales, entre otros tipos que requieren cubrir grandes extensiones con una interferencia limitada de los medios de sustentación. En el caso de **las mallas de soportes, se suelen emplear rangos de luces intermedios, lo que por un lado otorga la libertad para elegir entre cualquiera de las opciones materiales disponibles sin excepción**. Así mismo se puede optar por elementos horizontales, lo que permite emplear este esquema resolutive en varios niveles, apareciendo en el caso de las cubiertas el empleo del factor de forma, más como un alarde visual, que como un recurso estructuralmente necesario.

Espacio unitario: ya sea por exigencias funcionales o representativas, hay proyectos en los que la presencia de medios de sustentación intermedios resulta inaceptable. Claro ejemplo de ello, es el caso de los espacios deportivos, en los que **los requerimientos funcionales son los que determinan el marco dimensional libre de medios de sustentación. Por otra parte, se encuentran proyectos como los de las estaciones de ferrocarril, en los que sin una necesidad funcional que exija el uso de grandes luces, la adopción de éstas se sustenta en la necesidad de representatividad** de la urbe, actuando la edificación como puerta simbólica a ésta. Precisamente en esta tipología el hecho diferenciador es la relación entre el espacio conformado y el entorno, ya que dicha relación marca las pautas de la concepción proyectual. Así de mayor a menor interacción, **se pueden distinguir entre los siguientes tipos: cobijo, firmamento y microcosmos. En el primer caso, la interacción con el exterior es evidente, materializando meramente una protección frente a las inclemencias meteorológicas**. Esta interacción se puede producir, tanto con el firmamento, como perimetralmente. En este caso la referencia espacial dominante es la cubierta, dada la entidad de la misma, no existiendo una manifiesta intención de aislamiento. Este es el caso generalizado de un sinnúmero de cubiertas de estadios deportivos y en particular los de fútbol. En el caso de **los espacios definidos como firmamento, existe una notoria independencia del exterior, que permite entender la cubierta como un “firmamento artificial”, regulando todos los factores que permiten confeccionar un entorno ideal para efectuar las**

actividades deseadas. Pero en esta tipología, aún se mantienen ciertos nexos visuales, que permiten contextualizar el espacio, haciéndolo partícipe del exterior, pese a su independencia de éste. **El entorno se concibe desde el interior como un referente simbólico del lugar, sin mayor relación que los nexos visuales que permiten entender la obra como parte del entorno y fruto de las necesidades de éste.** Un ejemplo cercano sería el Palacio de los Deportes de Cartagena. En este tipo de proyectos el establecimiento de nexos visuales, por definición, es un acto de amplia reflexión, ya que permite establecer límites más allá de la propia edificación. Este hecho en obras como la comentada, puede llevar al establecimiento de una cierta escenografía exterior, que permita manipular los referentes según las necesidades derivadas de la proyección del espacio interior. Por lo que respecta a **la última categoría, la creación de un microcosmos autónomo se hace patente, prescindiendo de los nexos visuales, definiendo el interior como único referente,** adquiriendo en muchos casos simbologías procedentes de los exteriores. La cubierta se concibe como un firmamento de forma similar a la tipología anterior, pero carente de referencias visuales, **la obra no se implica con el lugar** y podría encontrarse en cualquier parte del globo, que por lo que respecta a la interpretación interior sería irrelevante. Se ha puesto como ejemplo el Eden Project, una obra que recrea ambientes de distintas partes del globo, como si de exteriores se trataran. Esta literalidad en la referencia no es común, pero manifiesta de forma patente los principios relativos a esta tipología resolutive.

En todos estos casos, la magnitud de la cubierta modifica la lectura que se hace de la misma, pasando a acometer en distinto grado el concepto de “firmamento”, matizado por las visiones de un exterior que ponen en perspectiva el objeto arquitectónico. El hombre, desde tiempos remotos, ha manipulado el entorno para conformar su ambiente ideal y en la realización del tipo de microcosmos referido en esta categoría, llega al sumun conceptual de este proceso, recreando un “exterior artificial”, con las condiciones ideales para el desarrollo de las actividades del hombre. Este tipo de control permite la aplicación de esta resolución espacial a múltiples funciones, que pueden ejercerse en una misma sala, confeccionándose espacios multifuncionales. La limitación de este tipo resolutive, es la justificación económica que determina la utilización de grandes luces, en la mayor parte de los casos definida por el uso más restrictivo del espacio, lo que suele producirse por los usos deportivos.

Conclusiones

Teniendo en cuenta todos los factores comentados en los apartados anteriores, como visión global del estudio, se puede concluir con una reflexión sobre algunos factores que se han evidenciado reiteradamente a lo largo de éste.

Desde el punto de vista resistente, en los proyectos que emplean esquemas de grandes luces, destacan dos recursos sobre los demás. Primeramente las cerchas trianguladas de acero, que gracias a su flexibilidad formal y dimensional son capaces de dar respuesta a gran número de problemáticas, estando presente en casi todas las tipologías analizadas. El otro recurso básico es el pre y postensado, que empleado dentro del hormigón o con otros materiales, ofrece un control resistente del comportamiento estructural, lo cual es aplicable en innumerables casos, por lo que también aparece en un buen número de las tipologías analizadas, aunque su casi nula aplicación en las soluciones de cerchas, hace su uso en este aspecto menos extendido. Así **triangulación y pretensado, conjuntamente son la base sobre la que se cimentan los proyectos de grandes luces en la actualidad. El factor de forma hoy ha sido relegado a un papel secundario, aunque siempre presente en las formas eficientes empleadas en las cubiertas ligeras**, ya que dicho tipo resolutivo va intrínsecamente ligado al concepto de eficiencia y economía de medios, con un carácter atemporal.

En el panorama actual, definidos los límites resolutivos de la técnica en un ámbito superior al aplicable en la arquitectura, los rangos dimensionales los define la justificación funcional. Según se incrementan las dimensiones de las luces a cubrir, se reduce el abanico de soluciones aplicables, por lo que en esos límites es donde se intensifica la imposición de la solución resistente sobre el resto de consideraciones. **En rangos de luces medias, se dispone de un gran abanico de soluciones para la resolución proyectual, existiendo una percepción simbólica de las estructuras, que en muchos casos prima sobre las consideraciones estrictamente resistentes.** Las grandes luces en la arquitectura, como reto que son a la gravedad y a las limitaciones resolutivas, durante un amplio recorrido de la historia han sido símbolo de poder y de la divinidad. Este tipo de concepción de **las obras de grandes luces como elemento representativo, es un invariante a lo largo de los siglos, aunque durante los dos últimos, se ha extendido por toda la producción arquitectónica**, hasta llegar a nuestros días como un recurso expresivo más, que permite una lectura enfática de la obra sobre la cotidianidad constructiva, que no recurre a dichos alardes dimensionales.

Este tipo de interpretación de las grandes luces, como se ha comentado, puede acontecer, tanto en el interior, como en el exterior de la obra, pero como objeto visual en la mayor parte de los casos, esta representación se produce en el exterior. Si en el pasado, la religión y el poder político fueron los que monopolizaron este tipo de expresión³⁵⁵, en la actualidad, es comúnmente empleado por las empresas. Éstas, ven en el juego volumétrico la nueva

³⁵⁵ El gran esfuerzo necesario para la conformación de este tipo de espacios, antes del siglo XIX solo estaba al alcance del poder político y religioso. Gracias a que ambos vieron en la conformación espacial un símbolo de poder y de la gracia divina, podemos gozar de obras como el Panteón de Agripa o las grandes catedrales góticas, entre otras muchas obras, de las que actualmente somos herederos culturalmente.

expresión lingüística a través de la obra arquitectónica, que les permite representar su poder y transmitir conceptos, como el respeto por el medio ambiente. Estos conceptos se expresan mediante gestos secundarios, que podrían pasar desapercibidos sin el empleo de la forma expresiva de las grandes luces, como medio enfático para atraer el interés del observador. Así mismo los entes públicos, ya sea para representar el poder de un órgano político o un uso cultural, han adoptado este lenguaje como medio para destacar en la trama urbana y fomentar el funcionamiento de la edificación.

El empleo de las grandes luces en la arquitectura, indudablemente lleva enlazado un simbolismo y un énfasis perceptivo del que los proyectos hacen uso más allá de la propia resolución física, para la planificación de una respuesta por parte del usuario. El enfoque de dicho esfuerzo depende de la finalidad de la obra, ya que las grandes sedes de las empresas suelen buscar primordialmente la conformación de una imagen capaz de representarlas, mientras que las obras de carácter público y cultural, suelen centrar su atención en la percepción de los potenciales usuarios.

Si en otras épocas, la representatividad materializada en la arquitectura, estaba más enfocada en la calidad de los materiales y los paramentos, en el marco actual este acto se interpreta mediante la resolución volumétrica y técnica de la edificación. Las herramientas expresivas de **las grandes luces, permiten mediante voladizos, grandes vanos y un uso hasta cierto punto escenográfico de la técnica, suscitar el interés del usuario.** De esta forma, hoy empresas, museos y otros entes, emplean este recurso formal para generar un impacto visual, que primeramente atraiga las miradas y luego sea capaz de expresar un mensaje, representando al ente externo que motiva su creación o su mismo contenido. Este punto de vista tiene una cierta relación con algunos de los conceptos expuestos por Venturi & Scott-Brown's *"Learning from Las Vegas"*. La edificación busca representatividad y reflejar un mensaje mediante el lenguaje propio de la arquitectura, en este caso sin recurrir a las literalidades de las que habla Venturi. En las últimas décadas, las revistas están plagadas de ejemplos de obras que expresan su relevancia sobre el común de las edificaciones mediante un reto espacial, resoluble a través de un alarde técnico, que si bien puede permanecer oculto para generar un mayor efecto de sorpresa, otras muchas, forma parte de la estética de la edificación en un acto de sinceridad, que encuentra claras referencias en la arquitectura High-Tech.

Una visión global de las particularidades que implica el uso de las grandes luces en la arquitectura actual, otorga una visión más nítida del panorama arquitectónico que se presenta ante nosotros en el siglo XXI. **La concepción arquitectónica está teñida de las experiencias de los técnicos encargados de su elaboración, tanto arquitectos, como ingenieros.** La lectura de dichas peculiaridades y las herencias del proceso evolutivo que nos ha conducido hasta el panorama actual, son sin duda la vía para el establecimiento de las bases conceptuales de la arquitectura que está por venir. Si bien una lectura del panorama actual en su globalidad nunca puede ser absoluta, hace posible la confección de marcos representativos, que resulten referentes de utilidad para el establecimiento de patrones que permitan, mediante el conocimiento empírico, conocer los resultados de las decisiones proyectuales y con ello ser capaces de elegir mejor, con la perspectiva de la experiencia ajena. Este tipo de conocimiento es similar al adquirido durante la arquitectura gótica, que a través de las experiencias anteriores permitían conocer los límites materializables. **Si bien en el ámbito estructural los**

medios de cálculo han hecho posible sustituir el *“conocimiento empírico”*, por el *“conocimiento científico”*, las complejidades de la labor proyectual impiden su tratamiento sistemático como una ciencia, recurriendo por consiguiente a un *“conocimiento empírico de las decisiones proyectuales”*. Esta es la única vía factible para facilitar la toma de decisiones, mostrando, como se ha hecho a lo largo del presente texto, las implicaciones de las diferentes soluciones, de una forma general e ilustrativa.

Las obras de grandes luces en el panorama actual, son una de las principales vías resolutivas, tanto en proyectos cuya escala así lo requiere, aconseja o permite, como en proyectos de vivienda (Figura 196), que fuera de la lógica directa, deciden adoptar este tipo de soluciones, tanto como forma de expresión, así como medio propositivo de otras formas de idear la urbe. Este tipo de soluciones experimentales, otorgan una nueva perspectiva de la ciudad, pudiendo ensayar sistemas alternativos de crecimiento. La implantación generalizada de este tipo de soluciones, aun permanece en el ámbito de la imaginación, pero su mero planteamiento, permite vislumbrar las consecuencias de tales actuaciones. Así **es labor y responsabilidad de arquitectos e ingenieros en convivencia, superar el conformismo con los márgenes alcanzados, ir más allá y arriesgarse a la experimentación, puesto que como dice David B. Steinman “El primitivismo existe siempre que el hombre no utiliza lo mejor de su conocimiento y recursos, retrocediendo hacia su instinto o hacia la tradición heredada”³⁵⁶**. Aciertos y errores son valiosos por igual, ya que de ambos se logra la experiencia para forjar un futuro mejor. Con el presente texto se desea haber reflejado algunas de las cuestiones de

Figura 196. Interlace (Singapur), obra de OMA (2013).

³⁵⁶ BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979, p. 54.

mayor relevancia de la línea de actuación proyectual más intrínsecamente contemporánea, pensando en que éste no sea un trabajo cerrado, sino el precursor de estudios más pormenorizados de las múltiples cuestiones citadas, que bien merecerían estudios propios desde la perspectiva planteada en la presente tesis.

Así se puede concluir enfatizando las principales conclusiones de la tesis:

1. **La evolución de las soluciones es imprescindible para contextualizar la producción del hombre, conscientes de las limitaciones de un tiempo y un lugar, ya que el hombre solo ha podido actuar con libertad dentro de los márgenes que la técnica le ha permitido.** Así un incremento en las libertades resolutivas, implica consecuentemente una revolución arquitectónica como la acontecida en los dos últimos siglos. Esto lleva a plantear una pregunta en el panorama actual, con un considerable desarrollo en: materiales, medios de cálculo y representación, ¿de qué ámbito provendrán las futuras revoluciones en el panorama arquitectónico? En base a los datos estudiados se puede inferir que los materiales continuarán siendo el foco del que dependen los límites dimensionales, aunque esto acontezca en un plazo hoy lejano. De forma más próxima la integración de los medios digitales como medio constructivo, mediante la impresión 3D, puede ser un hecho más cercano y que conjuntamente con el incremento del uso de la prefabricación, dibujen el panorama en el que se desenvuelva la producción arquitectónica de las próximas décadas, aun sin modificar los límites dimensionales.
2. **Las grandes luces, hoy superadas las limitaciones técnicas, se encuentran establecidas por los condicionantes expresivos, funcionales y económicos, más que por los márgenes dimensionales alcanzables, que en su mayoría se registran de forma exclusiva en el ámbito de la ingeniería civil.** Desde el siglo XIX, paulatinamente, en el ámbito arquitectónico se ha pasado de las *“limitaciones técnicas”*, a las *“limitaciones funcionales”*, como respuesta ajustada a las exigencias proyectuales, sin despropósitos dimensionales, solo justificables en los planteamientos de los puentes cuya única preocupación es salvar un accidente natural, siendo dichas dimensiones una imposición de la obra.
3. **Los avances en los materiales han sido el principal factor del cambio durante los dos últimos siglos, pero en el panorama actual no ha aparecido ningún material capaz de rivalizar con el hormigón y el acero. En el marco de las últimas décadas, los cambios proceden de los avances en las técnicas, que aprovechan las aptitudes de los materiales, así como en la capacidad para la implementación del método matricial para el cálculo sistematizado de las estructuras y los medios digitales de representación.** Así la arquitectura contemporánea ha visto en las últimas décadas, una liberalización de los procesos de ideación proyectual, que ha otorgado una nueva perspectiva al aprovechamiento de los materiales existentes, haciendo de las soluciones de grandes luces, no solo una opción constructiva, sino parte trascendental del panorama arquitectónico y el lenguaje de la arquitectura contemporánea.
4. **Las grandes luces como recurso lingüístico en la producción arquitectónica actual, suponen un énfasis expresivo, definiendo su efecto y alcance, tanto la *“percepción de la masa”*, como la *“percepción de la sustentación”*.** En definitiva la configuración de un reto espacial, tanto desde el punto de vista constructivo, como desde la lectura

que el usuario hace de la obra, logra modificar sus impresiones y pautas de actuación. Este hecho, junto a la consideración de este recurso espacial dentro de los márgenes de la cotidianidad resolutive, posicionan las “grandes luces”, como un ámbito arquitectónico cuyo estudio resulta vital en el panorama actual, así como las implicaciones de cada presentación de este recurso, como parte de la gramática arquitectónica de un tiempo.

5. **Hoy la distinción tipológica de las obras de grandes luces, es vital para el entendimiento de los condicionantes asociados a las decisiones proyectuales, ya que se atienden a finalidades dispares, que requieren en muchos casos medios específicos para su materialización.** Exteriormente la formalización de la obra se centra mayormente en la configuración simbólica y la percepción e impacto que logra sobre las personas. Por su parte, las concepciones interiores, aun con ese tipo de consideraciones en mente, se ven condicionadas en mayor medida por la respuesta funcional y la idea de conformar un “nuevo exterior”, en respuesta a las problemáticas proyectuales y los conceptos espaciales que se desean transmitir, como una visión particular de un mundo idealizado. Ambos ámbitos extremos de la expresión arquitectónica, gozan en muchos casos de una clara intencionalidad propositiva, que hace de la obra algo trascendental y un atisbo de lo que podría ser.
6. **La relevancia del ámbito técnico y el hermanamiento entre arquitectos e ingenieros, en aquellas obras que aspiran a superar los cánones de la cotidianidad, es vital en el panorama actual.** Esto se ejemplifica en la relación que mantenían Louis Isadore Kahn y el ingeniero August Eduard Komendant y las palabras de Kahn al decir: “*La ingeniería no es una cosa y el diseño otra. Ambas deben ser una sola cosa... Un edificio debe mostrar cómo ha sido hecho*”³⁵⁷. “*Si se ensalza la ingeniería, se empieza a destacar también los demás aspectos de la arquitectura*”³⁵⁸. La arquitectura y más fervientemente en el caso de las obras de grandes luces, necesita del ámbito técnico en su concepción y materialización. Solo el trabajo conjunto entre ambos profesionales puede dar lugar a una producción arquitectónica de mayor nivel, como han demostrado las estaciones de ferrocarril, que desde que son un producto de ambos, han visto una liberalización de la forma y una mayor significación espacial. Así mismo, todas aquellas obras que hoy materializan el reto gravitatorio, son producto de esta dualidad y todo arquitecto va de la mano de una ingeniería, al igual que obras como los puentes, hasta hace poco exclusivas de los ingenieros, hoy cuentan con la presencia de los arquitectos, ya que el resultado conjunto gana con la suma de ambas visiones de la problemática resolutive.

³⁵⁷ Palabras de Louis Isadore Kahn citadas en:

ST. JOHN WILSON, Colin, “*Building Ideas*”, Reino Unido, The Architect’s Journal, vol. 195 nº 9, marzo de 1995, p. 21.

³⁵⁸ KAHN, Louis Isadore, “*From a Conversation with William Jordy*”, publicado en:

WURMAN, Richard Saul, “*What will be has always been: The Words of Louis I. Kahn*”, Nueva York (Estados Unidos), Access Press and Rizzoli, 1986, p. 238.

La visión de Louis Isadore Kahn y el ingeniero August Eduard Komendant, solo reafirma los resultados de mi tesis y la relevancia de una visión del panorama arquitectónico actual desde el ámbito técnico, para en suma percibir el panorama actual en otros términos y como parte de un incesante proceso evolutivo, que incide sobre nuestra visión del mundo y nuestra forma de percibirlo y *“proyectarlo”*.

Las arquitecturas de grandes luces, más allá del reto resolutivo, son un desafío a las limitaciones del hombre y a su propia percepción. Un gesto de inestabilidad o de ingravidez es capaz de hacer palpar el corazón de emoción, pero que esta experiencia sea única y tenga una finalidad, es un tema de reflexión de tal interés, que trasciende los límites de la presente tesis y es una preocupación ligada inexorablemente con la actividad *“contemporánea”* del arquitecto.

V. BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía citada

TOMO I

I. INTRODUCCIÓN

AAVV (editores, ESPINOZA, Luis Enrique, CABALLERO, Valentín), *“Sociedad y medio ambiente”*, España, Ediciones Universidad de Salamanca, ponencias del congreso “Sociedad y medio ambiente” del 16 al 19 noviembre de 2005.

ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

BULLINGTON, P. y GOLDSMITH, Myron, *“Technique and Aesthetics in the Design of Tall Buildings”*, Estados Unidos, Institute for the Study of the High-Rise Habitat, 1986.

CARDELLACH, Félix, *“Filosofía de las estructuras”*, Barcelona (España), Editores Técnicos Asociados S.A., 1970.

DEMORTIER, Guy, *“PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza”*, Bélgica, Laboratoire d'Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, 2004.

ELICES CALAFAT, Manuel *“De las cuerdas de cáñamo a los hilos de araña. La Ciencia e ingeniería de los materiales”* (artículo), Real Academia de Ciencias, 2008.

HOUDIN, Jean-Pierre, *“Khufu: The Secrets Behind the Building of the Great Pyramid”*, Egipto, Farid Atiya Press, 2006.

LE CORBUSIER, *“Vers une architecture”*, París (Francia), Crès, 1923, (edición en castellano, *“Hacia una arquitectura”*, Barcelona (España), Apóstrofe, 1977).

II. ÁMBITOS HISTÓRICOS CLAVE SOBRE LOS QUE SE FUNDAMENTA EL PANORAMA ACTUAL DE LAS GRANDES LUCES

AA.VV., *“Bétons: matière d'architecture”*, Francia, Régirex-France (realizado por iniciativa del Syndicat National des Fabricants de Ciments et des Chaux), 1991.

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

BURÓN MAESTRO, Manuel y FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ HERNÁNDEZ., David, *“Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de Experiencia”*, Informes de la Construcción, vol. 48, nº 448, marzo/abril de 1997.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Tres teoremas fundamentales de la teoría del diseño de estructuras”*, Informes de la Construcción, Vol. 40, nº 399, enero/febrero de 1989.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Concebir y analizar estructuras”*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011.

FABER, Colin, *“Las estructuras de Candela”* (título original: *“Candela: The Shell Builder”*), México, Compañía Editorial Continental, S. A., 1963 (primera edición en castellano en 1970).

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban”*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011.

PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006.

RUI-WAMBA, Javier y FERNÁNDEZ ALBA, Antonio, *“Eugène Freyssinet un ingeniero revolucionario”*, España, Fundación Esteyco, 2003.

THORNHILL, Ted, *“How to build a skyscraper in NINETEEN DAYS: Time-lapse how Chinese firm builds 57-storey block at a rate of thee floors a day”*, Reino Unido, dailymail.co.uk, 11 de marzo de 2015.

III. LAS GRANDES LUCES COMO PARTE DE LA CONTEMPORANEIDAD PROYECTUAL

GONZALO MARTÍN, Román, *“Objeto no identificado”*, Valencia (España), d[x]i magazine nº38, febrero de 2012.

HUERTA, Santiago, *“Arcos, bóvedas y cúpulas: Geometría y el equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”*, Madrid (España), Instituto Juan de Herrera (distribuida por Reverté), 2004.

TOMÁS FRANCO, José, *“Video: Arquitectura Impresa / Digital Grotesque”*, México, ArchDaily, <http://www.archdaily.mx/mx/02-332275/video-arquitectura-impresa-digital-grotesque>, 04 de junio de 2014.

TSILIAKOS, Marios, *“Plasti (k) by Marc Fornes & The Very Many”*, Nueva York (EEUU), Archi Search.gr, 6 de febrero de 2012.

VARIS, Tapio, *“Finlandia: estrategia y destrezas comunicativas para la sociedad del conocimiento”*, España, Telos nº 72, julio-septiembre 2007.

1. Los requerimientos proyectuales. Las grandes luces como respuesta a exigencias previas y generadas

MOSSOVICH, Marcela, *“El funcionalismo bajo el ojo de tres diseñadores. Van de Velde - Le Corbusier - Mies Van de Roche”*, Buenos Aires (Argentina), Creación y Producción en Diseño y Comunicación Nº21, p.27-29.

LOOTSMA, Bart, *“Hacia una arquitectura reflexiva”*, España, El Croquis nº 86, 1997, p. 34-42.

2. Ámbitos del conocimiento que inciden sobre la concepción proyectual

AAVV [MultiFab], *“MultiFab: A Machine Vision Assisted Platform for Multi-material 3D Printing”*, Estados Unidos, MIT - CFG (The Computational Fabrication Group), 2015.

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

CASSINELLO, Pepa, BÖGLE, Annotte, CACHOLA SCHMAL, Peter, SCHLAICH BERGERMANN UND PARTNER, *“Estructuras ligeras”*, Madrid (España), Mairera Libros, 2011.

CHUECA GOITIA, Fernando, *“Historia de la Arquitectura Occidental Renacimiento”*, Madrid, CIE Dossat 2000, 2003.

DEMORTIER, Guy, *“PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza”*, Bélgica, Laboratoire d'Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, 2004.

DEMORTIER, Guy, *“Revising the construction of the egyptian pyramids”*, Europhysics News, Vol.40, nº 1, p. 27-31, 2009.

GALILEI, Galileo, *“Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze”*, Italia, 1638, (edición electrónica en italiano, *“Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze”*, Italia, e-text.it, 1998), (título en castellano, *“Discurso y demostración matemática, en torno a dos nuevas ciencias”*).

GARCÍA, Daniel, *“Arquitectura digital”*, Bogotá (Colombia), Revista AXXIS, 2014.

GARCÍA DEL MONTE, José María, *“De las posibilidades arquitectónicas del pretensado, Técnica y proyecto en la obra de Paulo Mendes da Rocha”*, España, Tesis doctoral, ETSAM, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

GARVIE, R. C., HANNINK, R. H., PASCOE, R. T., *“Ceramic Steel?”*, Australia, Nature nº258, 25 de diciembre de 1975, p. 703-704.

GRAHAM, Fiona, *“¿Es la impresión de casas el futuro de la construcción?”*, Reino Unido, BBC, 16 de septiembre de 2014.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luis, *“Intersecciones”*, España, Editorial Rueda, 2004.

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las Estructuras Antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban”*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011.

MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, *“Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI”*, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007.

NEGROPONTE, Nicholas, *“Ser Digital”*, Barcelona (España), Ediciones B, 1995.

NORBERG- SCHULZ, Christian, *“Intenciones en arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1979).

PÁEZ BALACA, Alfredo, *“El hormigón pretensado en la arquitectura”*, España, Informes de la Construcción, nº457-4, 11 de octubre de 1988.

PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006.

RODRÍGUEZ HENAO, Andrea, *“La arquitectura como influencia social, política y económica en el desarrollo de una civilización tanto en el poder como en la destrucción ambiental”*, Colombia, SCHEMA (ISSN: 2256-3717), 2014.

ROMERO MARTÍNEZ, Alonso, *“Evolución de los métodos de cálculo en las estructuras diseñadas con pórticos de concreto armado para edificios en el área norte de Latinoamérica”*, Revista de la Facultad de Ingeniería CUV v.20 n.2, 2005.

RUI-WAMBA, Javier, FERNÁNDEZ ALBA, Antonio, *“Eugène Freyssinet un ingeniero revolucionario”*, España, Fundación Esteyco, 2003.

RUI-WAMBA MARTIJA, Javier, *“El pretensado como instrumento de diálogo entre la ingeniería y la arquitectura”*, España, Hormigón y Acero, 22 de agosto de 2007.

SOLÁ-MORALES RUBIO, Ignasi, OLIVERAS SAMITIER, Jordi, GRAELLS, Antoni y GRAELLS, Ramon, *“Introducción a la Arquitectura. Conceptos fundamentales”*, Barcelona (España), Edicions UPC, 2009.

Y. ONODA, George y L. HENCH, Larry, *“Ceramic processing before firing”*, Estados Unidos, University of Florida, Wiley, 1978.

YEPES PIQUERAS, Víctor, *“La prefabricación revoluciona los procedimientos constructivos”*, Valencia (España), Universidad Politécnica de Valencia, 27 noviembre 2013.

ZEVI, Bruno, *“Saber ver la arquitectura”*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, (Publicado originalmente como *“Saper vedere l'architettura”* en 1948).

3. Taxonomía proyectual ligada a los proyectos de grandes luces

ANAYA DIAZ, Jesús, *“La búsqueda de un modelo industrial. El acceso de una nueva concepción técnica a la arquitectura española de la primera mitad del siglo XX”* (Tesis doctoral), Madrid, E.T.S. Arquitectura (UPM), 2004.

ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

AROLA, Raimon, *“Alquimia y religión: los símbolos herméticos del siglo XVII”*, Madrid (España), Siruela, 2008.

CARDELLACH, Félix, *“Filosofía de las estructuras”*, Barcelona (España), Editores Técnicos Asociados S.A., 1970.

HEIDEGGER, Martin, *“Sein und Zeit”*, Alemania, 1927, (edición en castellano, *“El ser y el tiempo”*, México, FCE, 1951).

KOOLHAAS, Rem, *“Koolhaas Houselife”*, Italia, Bêka Fims, 2008.

LE CORBUSIER, *“Vers une architecture”*, París (Francia), Crès, 1923, (edición en castellano, *“Hacia una arquitectura”*, Barcelona (España), Apóstrofe, 1977).

MACADAR, Andrea, *“Entrevista: Paulo Mendes da Rocha”*, São Paulo (Brasil), Vitruvius 026.02 año 07 (Editorial Romano Guerra), abril de 2006.

MOLINÉ ESCALONA, Miguel, *“Las claves de la Arquitectura”*, España, Ed. Planeta, 1994.

PÉREZ NAYA, Antonia, *“Metáforas ocultas en los espacios de la muerte actuales”*, España, Boletín Académico. Revista de investigación y arquitectura contemporánea Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de La Coruña, 2013.

TZU, Sun, *“El arte de la guerra”*, España, EDAF 2004, (el texto original chino, data del siglo IV a.C.).

4. Conformación visual. Lectura enfática de la obra

AAVV, *“High-Tech para High-Tech. La arquitectura de las empresas del futuro”*, Barcelona (España), LOFT Publications, 2001.

ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

BARHAM, Reyner, DALEGRET, François, *“A home is not a house”*, Estados Unidos, Art in America vol. 2, 1965, p. 70-79.

CASAS, Narciso, *"ESENCIAL, Narciso Casas - Muestra sus obras y secretos en las artes plásticas"*, España, Bubok, 2011.

LOOS, Adolf, *"Ornamento y delito y otros escritos"*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1972.

TORROJA MIRET, Eduardo, *"Razón y Ser de los Tipos Estructurales"*, Madrid, Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento, 1957.

VENTURI, Robert, *"Complejidad y contradicción en la arquitectura"*, España, Gustavo Gili, 1972 (editado originalmente como *"Complexity and Contradiction in Architecture"* en Nueva York en 1966).

5. Límites dimensionales. Procedimiento para la determinación del marco dimensional

AAVV, *"Geometría y proporción en las estructuras: ensayos en honor de Ricardo Aroca"*, Madrid (España), Outer ediciones, 2010.

BERNABEU LARENA, Alejandro, *"Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond"*, Madrid, Tesis de la Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

BUENO MARTÍNEZ, Gustavo, *"¿Qué es la ciencia?: La respuesta de la teoría del cierre categorial"*, Oviedo (España), Opúsculos Pentalfa, 1995.

CERVERA BRAVO, Jaime, *"Concebir y analizar estructuras"*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011.

ENGEL, Heino, *"Sistemas de estructuras"* (título original *"Tragsysteme. Heino Engel"* (1975)), Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001.

GALILEI, Galileo, *"Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze"*, Italia, 1638, (edición electrónica en italiano, *"Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze"*, Italia, e-text.it, 1998), (título en castellano, *"Discurso y demostración matemática, en torno a dos nuevas ciencias"*).

NERVI, Pier Luigi, *"Relations entre architectes, ingenieurs et constructeurs"*, Francia, L'architecture d'aujourd'hui, Diciembre 1961.

PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *"Cálculo matricial de estructuras"*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006.

RAHIM, Ali y otros, *"The digital and the material. Cecil Balmond in conversation with Michael Weinstock"*, Reino Unido, Architectural Design vol. 72 nº 1, enero de 2002.

IV. LAS GRANDES LUCES, UNA FORMA DE CONCEBIR LA ARQUITECTURA

1. Influencia de los condicionantes resolutivos en los márgenes dimensionales y limitaciones a la materialización arquitectónica

AALTO, Alvar y SCHILDT, Göran, *“Alvar Aalto. De l’oeuvre aux écrits”*, Francia, Centro Georges Pompidou, 1988.

ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

DEMORTIER, Guy, *“PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza”*, Bélgica, Laboratoire d’Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, 2004.

PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006.

FERNÁNDEZ TROYANO, Leonardo, *“Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación”*, España, Revista de Obras Públicas, Nº 3.460 (Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil), Noviembre de 2005.

2. Influencia de las capacidades resolutivas en la proyección arquitectónica

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las Estructuras Antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban”*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011.

3. Conclusiones

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *"Puentes y sus constructores"*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

ST. JOHN WILSON, Colin, *"Building Ideas"*, Reino Unido, The Architect's Journal, vol. 195 nº 9, marzo de 1995.

WURMAN, Richard Saul, *"What will be has always been: The Words of Louis I. Kahn"*, Nueva York (Estados Unidos), Access Press and Rizzoli, 1986.

I. AVANCES TÉCNICOS. MATERIAL Y SISTEMA RESISTENTE, COMO DEFINIDORES DEL MARCO DIMENSIONAL Y FORMAL DE ACTUACIÓN

AAVV, [AYANA-CARCEDO, Francisco Javier (Director de la obra) y 52 autores más], *“Historia de la tecnología en España”*, Barcelona (España), Valatenea S.L., 2001

1. Hierro y el acero. El material como origen del cambio conceptual del siglo XIX

AAVV, *“Guía del viajero por los Ferro-Carriles de Madrid a Alicante y Valencia y viceversa”*, España, 1858.

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

BULLINGTON, P. y GOLDSMITH, Myron, *“Technique and Aesthetics in the Design of Tall Buildings”*, Estados Unidos, Institute for the Study of the High-Rise Habitat, 1986.

CHINCHILLA LÓPEZ, Alexis José, MEJÍA BAUTISTA, Francisco Antonio y RAMÍREZ CABALLERO, Víctor Manuel, *“Análisis y diseño estructural de subestructuras para puentes de claros cortos según normas AASHTO”*, (trabajo de graduación para Ingeniero Civil), Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Oriente, San Miguel (El Salvador,) 2008.

COGNARD, Philippe, *“Bonding composites. Part 2: The various chemical types of Adhesives for composites, epoxy adhesives”*, 2006, Adhesives & Sealants, www.specialchem4adhesives.com.

PAZ ABUÍN, Senén, *“Adhesivos estructurales: un panorama de presente y futuro”*, Interempresas.net, 2011.

PEVNER, Nikolaus, *“Pioneros del diseño moderno”*, Buenos Aires, Ediciones Infinito, 1958 (Primera edición, 1936).

PORT, M.H. *“Six Hundred New Churches: The Church Building Commission 1818–1856”*, Estados Unidos, Yale University Press, 2nd Ed, 2006.

SAMBRICIO, Carlos, *“Eienne-Louis Boullée: ensayo sobre el arte”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1985.

SWENSON, Alfred y CHANG, Pao-Chi, *“Building construction: High-rise construction since 1945”*, Encyclopædia Britannica, 2008.

TARTARINI, Jorge Daniel, *“Arquitectura ferroviaria”*, Buenos Aires (Argentina), Colihue, 2005.

VERANCIO, Fausto, *“Machinæ Novæ”*, Venetiis Privilegiis, 1617.

2. Hormigón armado y pretensado. Economía resolutive como medio de adaptación en el siglo XX

AAVV, *“Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación”*, España, Omnia Science, 2014.

AA.VV., *“Bétons: matière d’architecture”*, Francia, Régirex-France (realizado por iniciativa del Syndicat National des Fabricants de Ciments et des Chaux), 1991.

AAVV, *“Grosvenor Atterbury”*, Nueva York (Estados Unidos), Psi Upsilon, Mayo, 1917.

AGUILÓ ALONSO, Miguel, *“Prefabricación: Teoría y práctica”*, Barcelona (España), Editores Técnicos Asociados, 1974.

ANDRÉS MARTÍN, Francisco Ramón, FADÓN SALAZAR, Fernando, *“Análisis Gráfico de Obras Emblemáticas de Félix Candela”*, Cantabria (España), texto realizado para el XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Cantabria, 2002. ARGAN, G.C., *“El arte moderno 1770-1970”*, Valencia, Fernando Torres ed. 2ª ed., 1976.

AOEPI, expediente nº 12.301, de 9 de julio de 1891.

BELLSOLÁ, Ricardo, *“Memoria relativa a los arcos de hormigón hidráulico construidos en la carretera de primer orden de Soria a Logroño por D. Ricardo Bellsolá”*, España, Revista de Obras Públicas, t. XV, 1867, nº 1, pág. 13-17; nº 2, pág. 25-26 y nº 3, pág. 37-43.

BILLINGTON, David, *“La torre y el puente”*, Estados Unidos, Princeton University Press, 1983.

BONCORPS, C, *“Estabilidad de las construcciones de hormigón armado”*, España, 1900, Revista de Obras Públicas, Vol. XLVII, nº 1269, p. 30-32; nº 1270, p. 37; nº 1272, p. 54-56; nº 1273, p. 60-63; nº 1274, p. 69-71; nº 1276, p. 86-90; nº 1278, p. 105-107; nº 1280, p. 119-123; nº 1281, p. 125-126; nº 1282, p. 137-140; nº 1284, p. 151-155; nº 1285, p. 159-163; nº 1288, p. 182-186; nº 1289, p. 189-194; nº 1309, p. 355-361; nº 1310, p. 364-368; nº 1311, p. 379-382.

BURÓN MAESTRO, Manuel y FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ HERNÁNDEZ., David, *“Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de Experiencia”*, Informes de la Construcción, vol. 48, nº 448, marzo/abril de 1997.

CASARES BESCANSÁ, Fermín, *“Cálculo de vigas de hormigón armado”*, España, Revista de Obras Públicas, Vol. LVIII, nº 1825, p. 437-443; nº 1826, p. 449-454; nº 1827, p. 461-464, 1910.

DEL PALACIO, Alberto, *“Le ciment Armé système Unciti”*, Madrid (España), Ricardo Rojas, 1904.

DISCHINGER, Franz, *“Die strenge Theorie der Kreiszyinderschale in ihrer Anwendung auf die Zeis-Dywudag-Schalen”*, Alemania, Beton Und Eisen, Vol. 34, nº 15, 1935, p. 257-264; p. 283-294; p. 392.

ESCRIG PÉREZ, Christian, *“Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón”*, España, Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras de ingeniería de la UPC, 2010.

FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, J.A. *“Eugène Freyssinet”*, Barcelona (España), 2C Ediciones, 1978.

FINSTERWALDER, Ulrich, *“Die Theorie der Zylindrischen schalengewölbe System Zeiss-Dywidag und Ihre Anwendung Auf Die Grossmarkthalle in Budapest”*, Zurich, Memoires I.A.B.S.E., Vol. 1, 1932.

FLÜGGE, W., *“Statik und Dynamik der Schalen”*, Berlin, J. Springer, 1934.

HORKHEIMER, Max y AFORNO, Theodor W., *“Dialéctica de la Ilustración”* (1969), Madrid (España), Trotta, 2004.

LÖSER, Benno, *“Hormigón armado. Métodos de cálculo y dimensionado con tablas y ejemplos numéricos”*, Barcelona (España), El Ateneo, 1987. (Traducido de la edición alemana).

LUIS LIMA, Edgardo, HERNÁNDEZ BALAT, Victorio, FRANCISCO BISSIO, Juan, *“Hormigón armado: notas sobre su evolución y la de su teoría”*, Seminario sobre fundamentos de la resistencia de materiales, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Plata, Buenos Aires (Argentina), 2002.

MACÍ LLUSÁ, Antonio, *“La construcción de uno o varios armazones, formados por un tejido de mallas más o menos espesas, de alambres de hierro o acero de todas formas, dimensiones y secciones combinadas con una o varias capas de ladrillos o rasillas, ordinarios, especiales o de cemento, situados bien interiormente a los armazones o exteriormente o entre ellos, bien combinando dos o todas estas disposiciones, enluciendo o no la obra por dentro y por fuera con mortero hidráulico o de cemento o una capa de hormigón”*, Barcelona (España), Ministerio de Industria, Turismo y Comercio Oficina Española de Patentes y Marcas (O.E.P.M.). Archivo Histórico. Patente nº 15.562, 1894.

MAKOWSKI, Z. S., *“History of Development of Various Types of Barrel Vaults and Review of Recent Achievements all over the World. Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults”*, London, Elsevier Applied Science Publishers, 1985.

MARVÁ Y MAYER, José, *“Mecánica aplicada a las construcciones”*, Madrid, 3ª Ed. Julián Palacios, 1909 (primera impresión en 1894), p. 1557-1558.

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *“Mecánica de las Estructuras Antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban”*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011.

MENDOZA, Gregorio B., *“Prefabricados de concreto: el futuro apenas empieza”*, México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC), abril de 2008.

MONFORT, Arturo, *“Puente de hormigón armado sobre el río Júcar. Aplicación de la teoría de Mörsch”*, Revista de Obras Públicas, Vol. LXV, nº 2166, p. 149-154, 1917.

PÁEZ BALACA, Alfredo, *“Cincuenta años de hormigón armado en España”*, España, Revista de Obras Públicas, (Vol. CIV, nº 2892), 1956.

PEÑA BOEUF, Alfonso, *“Mecánica elástica”*, Madrid, 1ª Ed. Voluntad, 1925.

ROSELL, Jaume, CÁRCAMO, Joaquín, *“Los orígenes del hormigón armado y su introducción en Bizkaia. La fábrica Ceres de Bilbao”*, España, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Bizkaia, 1995.

RUI-WAMBA, Javier, FERNÁNDEZ ALBA, Antonio, *“Eugène Freyssinet un ingeniero revolucionario”*, España, Fundación Esteyco, 2003.

SEIM, Werner, *“Bewehrung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken”*, Estados Unidos, John Wiley & Sons, 2012.

STRIKE, James, *“De la construcción a los proyectos: la influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000”*, Barcelona (España), Editorial Reverté, 2004.

THORNHILL, Ted, *“How to build a skyscraper in NINETEEN DAYS: Time-lapse how Chinese firm builds 57-storey block at a rate of thee floors a day”*, Reino Unido, dailymail.co.uk, 11 de marzo de 2015.

TIMOSHENKO, Stephen, *“History of Strength of Materials”*, Estados Unidos, D. Van Nostrand Company, Inc, 1940 (Primera edición de 1930).

TORROJA MIRET, Eduardo, *“Discurso leído en el acto de su recepción por 38 el Excmo. Sr. D. Eduardo Torroja Miret”*, Madrid, Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales, 1944.

TORROJA MIRET, Eduardo, *“Razón y Ser de los Tipos Estructurales”*, Madrid, Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento, 1957.

TORROJA MIRET, Eduardo, *“Las estructuras de Eduardo Torroja”*, Madrid, Editado por el Ministerio de Fomento, 1958 (Reedición de 1999).

VACCHELLI, G, *“Las construcciones de hormigón y de cemento armado”*, Madrid (España), Romo y Fussel, 1903.

ZAFRA, Juan Manuel, *“Construcciones de hormigón armado”*, Madrid (España), Imprenta V. Tordesillas, 1911.

ZAFRA, Juan Manuel, *“Tratado de hormigón armado”*, Madrid, Voluntad, (2ª ed.) 1923.

— Otras fuentes documentales consultadas

Expediente 8 nº 12 del A.E.T., de agosto de 1928.

Expediente nº 158 del A.E.T. La fecha del encargo es de 1932, pero el proyecto se terminó en diciembre de 1933. Los planos definitivos de la estructura de la cubierta son de junio de 1934, y los de la estructura del lucernario de mayo de 1935.

El proyecto del Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento ocupa seis expedientes del A.E.T., el primero es el nº 771 de 1951, y en el que se define la cubierta de la nave de ensayos

es el 780 de marzo de 1952. Este proyecto fue realizado por los arquitectos G. Echegarai y M. Barbero en 1951.

Patentes de Eugène Freyssinet en España, <http://patentados.com/empresa/freyssinet-eugene/>

Memoria del proyecto del Mercado de Algeciras del arquitecto Manuel Sánchez Arcas (nº 158.302), p. 7. Documento ETM-093-001. Gran Mercado de Algeciras [Exp. 158] (ETM-0093/Caja 024/01-P2/C2), perteneciente al Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, compuesto de veintinueve documentos, textos y planos, que reflejan esta obra realizada por la constructora Ricardo Barredo S. A.

Memoria del proyecto de la fábrica de ENASA (nº 665.307), p. 1-2. Documento ETM-335-001. Concurso de nave para la fábrica de ENASA [Exp. 665] (ETM-335-001/Caja 105/02), perteneciente al Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, compuesto de cuarenta y cuatro documentos: veintitrés textuales y veintiún planos.

II. AVANCES EN LOS MEDIOS DE CÁLCULO. CONOCIMIENTO RESISTENTE COMO APRIORISMO DIMENSIONAL Y LIMITADOR FORMAL

ALONSO DURÁ, Adolfo, *“Introducción a las estructuras de edificación”*, Valencia (España), Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2005.

ÁLVAREZ MÁNTARAS, Daniel, LUQUE RODRÍGUEZ, Pablo, *“Ferrocarriles: ingeniería e infraestructuras de los transportes”*, España, Universidad de Oviedo, 2007.

ARCHER, J. S., *“Consistent Matrix Formulations for Structural Analysis Using Finite Elements Techniques”*, Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 3, nº 10, p. 1910-1918, 1965.

ARGYRIS, J. H., *“Energy Theorems and Structural Analysis”*, Aircraft Engineering, (Octubre, Noviembre y Diciembre de 1954) y (Febrero, Marzo, Abril y Mayo de 1955).

ARGYRIS, J. H., *“Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis”*, Nueva York, Progress in Aeronautical Science, Vol. 4, Pergamon Press, 1964.

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Cálculo de estructuras y resistencia de materiales: origen y desarrollo histórico de los conceptos utilizados”*, España, Tesis doctoral de la UPM, noviembre de 1982.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Tres teoremas fundamentales de la teoría del diseño de estructuras”*, Informes de la Construcción, Vol. 40, nº 399, p. 57-66, enero/febrero de 1989.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Concebir y analizar estructuras”*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011.

CREMONA, Luigi, *"Graphical statics. Two treatises on the graphical calculus and reciprocal figures in graphical statics"*, Oxford, Clarendon press, 1890 (traducción realizada por Thomas Hudson Beare).

CROSS, Hardy, *"Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed End Moments"* publicado Estados Unidos, ASCE, 1930.

GALILEI, Galileo, *"Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze"*, Italia, 1638, (edición electrónica en italiano, *"Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze"*, Italia, e-text.it, 1998), (título en castellano, *"Discurso y demostración matemática, en torno a dos nuevas ciencias"*).

GALLAGHER, R. H., PADLOG, J. y BIJLAARD, P. P., *"Stress Analysis of Complex Shapes"*, Journal of the American Rocket Society, Vol. 32, p. 700-707, Mayo de 1962.

GRAFTON, P. E. y STROME, D. R., *"Analysis of Axisymmetric Shells by the Direct Stiffness Method"*, Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 1, nº 10, p. 2342-2347, 1963.

HUIKIES, R. y CHAO, E. Y. S., *"A Survey of Finite Element Analysis in Orthopedic Biomechanics: The First Decade"*, Journal of Biomechanics, Vol. 16, nº 6, p. 385-409, 1983.

JARAMILLO JIMÉNEZ, José Oscar, *"Análisis Clásico de estructuras"*, Bogotá (Colombia), Universidad Nacional de Colombia, 2004.

JIMÉNEZ PÉREZ MITRE, Alfredo, *"Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALFOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos"*, Puebla (México), Tesis profesional en la Universidad de las Américas Puebla, 2004.

LYNESS, J. F., OWEN, D. R. J. y ZIENKIEWICZ, O. C., *"Three-Dimensional Magnetic Field Determination Using a Scalar Potential. A Finite Elements Solution"*, Transactions on Magnetism, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 1649-1656, 1977.

MARTÍN, H. C., *"Plane Elasticity Problems and the Direct Stiffness Method"*, The Trend in Engineering, Vol. 13, p. 5-19, Enero de 1961.

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *"Mecánica de las Estructuras Antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban"*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011.

MELOSH, R. J. *"A Stiffness Matrix for the Analysis of Thin Plates in Bending"*, Journal of the Aerospace Sciences, Vol. 28, nº 1, p. 34-42, Enero de 1961.

MELOSH, R. J., *"Structural Analysis of Solids"*, Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, p. 205-223, Agosto de 1963.

NEWTON, Isaac, *"Analysis per aequationes número terminorum infinitos"*, Reino Unido, 1669.

NIETO GARCÍA, Apuntes de *"Mecánica de medios continuos y teoría de las estructuras"* de OCW Universidad de Sevilla.

PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *“Cálculo matricial de estructuras”*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006.

PÉREZ WHITE, Tomás, MATEOS GÓMEZ, Juan Manuel y GÓMEZ SÁNCHEZ, Pedro Antonio, *“Resistencia de materiales”*, Salamanca (España), Universidad de Salamanca, 1992.

QUINTAS RIPOLL, Valentín, *“Sobre el teorema de Maxwell y la optimización de arcos de cubierta”*, Informes de la Construcción, 9 de Septiembre de 1988.

STEELE, Jeffrey, *“Applied Finite Element Method”*, Marcel Dekker, Inc. Segunda Edición, 1989.

TURNER, M. J. CLOUGH, R. W., MARTIN, H. C. y TOPP, L. J., *“Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures”*, Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 23, Nº 9, Septiembre de 1956.

VITRUVIO, Marco, *“Los diez libros de la arquitectura”*, (facsimil de la edición de 1787, VITRUVIO, Marco, *“Los diez libros de la arquitectura”*, Barcelona (España), Alta Fulla, 1993).

ZIENKIEWICZ, O. C., WATSON, M. y KING, I. P., *“A Numerical Method of Visco-Elastic Stress Analysis”*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 10, p. 807-827, 1968.

Bibliografía básica

AAVV, *“Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación”*, España, Omnia Science, 2014.

AAVV, *“Bétons: matière d’architecture”*, Francia, Régirex-France (realizado por iniciativa del Syndicat National des Fabricants de Ciments et des Chaux), 1991.

AAVV, [CARRERAS, Albert y TAFUNELL Xavier (coordinadores) y 29 especialistas], *“Estadísticas históricas de España: Siglos XIX y XX”* (Vol. 1-3), Fundación BBVA, 2005,

AAVV, *“Geometría y proporción en las estructuras: ensayos en honor de Ricardo Aroca”*, Madrid (España), Outer ediciones, 2010.

AAVV, *“Grosvenor Atterbury”*, Nueva York (Estados Unidos), Psi Upsilon, Mayo, 1917.

AAVV, *“Guía del viajero por los Ferro-Carriles de Madrid a Alicante y Valencia y viceversa”*, España, 1858.

AAVV, *“High-Tech para High-Tech. La arquitectura de las empresas del futuro”*, Barcelona (España), LOFT Publications, 2001.

AAVV, [AYANA-CARCEDO, Francisco Javier (Director de la obra) y 52 autores más], *“Historia de la tecnología en España”*, Barcelona (España), Valatenea S.L., 2001

AAVV [MultiFab], *“MultiFab: A Machine Vision Assisted Platform for Multi-material 3D Printing”*, Estados Unidos, MIT - CFG (The Computational Fabrication Group), 2015.

AAVV (editores, ESPINOZA, Luis Enrique, CABALLERO, Valentín), *“Sociedad y medio ambiente”*, España, Ediciones Universidad de Salamanca, ponencias del congreso “Sociedad y medio ambiente” del 16 al 19 noviembre de 2005.

AALTO, Alvar y SCHILDT, Göran, *“Alvar Aalto. De l’oeuvre aux écrits”*, Francia, Centro Georges Pompidou, 1988.

AGUILÓ, Miguel, MANTEROLA, Javier, ONZAIN, Mario y RUI-WAMBA, Javier, *“Javier Manterola Armisen: pensamiento y obra”*, España, Fundación Esteyco, 2004.

AGUILÓ ALONSO, Miguel, *“Prefabricación: Teoría y práctica”*, Barcelona (España), Editores Técnicos Asociados, 1974.

ALBELLÁ MARTÍN, José María, *“Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones”*, Madrid (España), Colección Biblioteca de Ciencias, CSIC, 2003.

ALONSO DURÁ, Adolfo, *“Introducción a las estructuras de edificación”*, Valencia (España), Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2005.

ÁLVAREZ MÁNTARAS, Daniel, LUQUE RODRÍGUEZ, Pablo, *“Ferrocarriles: ingeniería e infraestructuras de los transportes”*, España, Universidad de Oviedo, 2007.

ANAYA DIAZ, Jesús, *“La búsqueda de un modelo industrial. El acceso de una nueva concepción técnica a la arquitectura española de la primera mitad del siglo XX”* (Tesis doctoral), Madrid, E.T.S. Arquitectura (UPM), 2004.

ANDRÉS MARTÍN, Francisco Ramón, FADÓN SALAZAR, Fernando, *“Análisis Gráfico de Obras Emblemáticas de Félix Candela”*, Cantabria (España), texto realizado para el XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Cantabria, 2002. ARGAN, G.C., *“El arte moderno 1770-1970”*, Valencia, Fernando Torres ed. 2ª ed., 1976.

AOEPI, expediente nº 12.301, de 9 de julio de 1891.

ARCHER, J. S., *“Consistent Matrix Formulations for Structural Analysis Using Finite Elements Techniques”*, Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 3, nº 10, p. 1910-1918, 1965.

ARGAN, Giulio Carlo, *“Pier Luigi Nervi”*, Buenos Aires (Argentina), Ediciones Infinito, 1955.

ARGÜELLES ÁLVAREZ, Ramón, *“La Estructura Metálica Hoy”*, 1ª edición, Madrid, Editado por Interciencia, 1970.

ARGÜELLES ÁLVAREZ, Ramón, *“Estructuras de Acero, uniones y sistemas estructurales”*, 1ª edición, Madrid, Ediciones Bellisco, ediciones técnicas y científicas, 2001.

ARGYRIS, J. H., *“Energy Theorems and Structural Analysis”*, Aircraft Engineering, (Octubre, Noviembre y Diciembre de 1954) y (Febrero, Marzo, Abril y Mayo de 1955).

ARGYRIS, J. H., *“Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis”*, Nueva York, Progress in Aeronautical Science, Vol. 4, Pergamon Press, 1964.

ARNHEIM, Rudolf, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001), (NOTA: impreso originalmente por The Regents of the University of California en 1977).

AROLA, Raimon, *“Alquimia y religión: los símbolos herméticos del siglo XVII”*, Madrid (España), Siruela, 2008.

BARHAM, Reyner, DALEGRET, François, *“A home is not a house”*, Estados Unidos, Art in America vol. 2, 1965, p. 70-79.

BARNARD STEINMAN, David, RUTH WATSON, Sara, (Traducción de AGUILÓ ALONSO, Miguel), *“Puentes y sus constructores”*, Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Ediciones Turner, 1979.

BELLSOLÁ, Ricardo, *“Memoria relativa a los arcos de hormigón hidráulico contruidos en la carretera de primer orden de Soria a Logroño por D. Ricardo Bellsolá”*, España, Revista de Obras Públicas, t. XV, 1867, nº 1, pág. 13-17; nº 2, pág. 25-26 y nº 3, pág. 37-43.

BENÉVOLO, Leonardo, *“Historia de la arquitectura moderna”*, Barcelona, Gustavo Gili, 1977.

BENJUMEA ROYERO, José Miguel, CHIO CHO, Gustavo, MALDONADO RONDÓN, Esperanza, *“Comportamiento Estructural y Criterios de Diseño de los Puentes Extradados: Visión General y Estado del Arte”*, Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 25, No 3, 2010, p. 383-398.

BENJUMEA ROYERO, José Miguel, CHIO CHO, Gustavo, MALDONADO RONDÓN, Esperanza, *“Puentes extradados: evolución y tendencias actuales”*, Tecnura vol. 16 nº 33 (julio/septiembre de 2012), Bogotá, 2012

BERNABEU LARENA, Alejandro, *“Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond”*, Madrid, Tesis de la Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

BILLINGTON, David, *“La torre y el puente”*, Estados Unidos, Princeton University Press, 1983.

BONCORPS, C, *“Estabilidad de las construcciones de hormigón armado”*, España, 1900, Revista de Obras Públicas, Vol. XLVII, nº 1269, p. 30-32; nº 1270, p. 37; nº 1272, p. 54-56; nº 1273, p. 60-63; nº 1274, p. 69-71; nº 1276, p. 86-90; nº 1278, p. 105-107; nº 1280, p. 119-123; nº 1281, p. 125-126; nº 1282, p. 137-140; nº 1284, p. 151-155; nº 1285, p. 159-163; nº 1288, p. 182-186; nº 1289, p. 189-194; nº 1309, p. 355-361; nº 1310, p. 364-368; nº 1311, p. 379-382.

BUENO MARTÍNEZ, Gustavo, *“¿Qué es la ciencia?: La respuesta de la teoría del cierre categorial”*, Oviedo (España), Opúsculos Pentalfa, 1995.

BULLINGTON, P. y GOLDSMITH, Myron, *“Technique and Aesthetics in the Design of Tall Buildings”*, Estados Unidos, Institute for the Study of the High-Rise Habitat, 1986.

BURÓN MAESTRO, Manuel y FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ HERNÁNDEZ., David, *“Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de Experiencia”*, Informes de la Construcción, vol. 48, nº 448, marzo/abril de 1997.

CABRERA MARTÍNEZ, Jorge, *“Estudio Aplicado de los costes de la prevención de Riesgos Laborales en la construcción de Puentes de Hormigón”*, Barcelona (España), Tesis doctoral realizada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2005.

CARDELLACH, Félix, *“Filosofía de las estructuras”*, Barcelona (España), Editores Técnicos Asociados S.A., 1970.

CASARES BESCANS, Fermín, *“Cálculo de vigas de hormigón armado”*, España, Revista de Obras Públicas, Vol. LVIII, nº 1825, p. 437-443; nº 1826, p. 449-454; nº 1827, p. 461-464, 1910.

CASAS, Narciso, *“ESENCIAL, Narciso Casas - Muestra sus obras y secretos en las artes plásticas”*, España, Bubok, 2011.

CASSINELLO, Pepa, BÖGLE, Annette, CACHOLA SCHMAL, Peter, SCHLAICH BERGERMANN UND PARTNER, *“Estructuras ligeras”*, Madrid (España), Mairera Libros, 2011.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Cálculo de estructuras y resistencia de materiales: origen y desarrollo histórico de los conceptos utilizados”*, España, Tesis doctoral de la UPM, noviembre de 1982.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Tres teoremas fundamentales de la teoría del diseño de estructuras”*, Informes de la Construcción, Vol. 40, nº 399, p. 57-66, enero/febrero de 1989.

CERVERA BRAVO, Jaime, *“Concebir y analizar estructuras”*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, (v3.0) 2011.

CHINCHILLA LÓPEZ, Alexis José, MEJÍA BAUTISTA, Francisco Antonio y RAMÍREZ CABALLERO, Víctor Manuel, *“Análisis y diseño estructural de subestructuras para puentes de claros cortos según normas AASHTO”*, (trabajo de graduación para Ingeniero Civil), Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Oriente, San Miguel (El Salvador,) 2008.

CHUECA GOITIA, Fernando, *“Historia de la Arquitectura Occidental Renacimiento”*, Madrid, CIE Dossat 2000, 2003.

COGNARD, Philippe, *“Bonding composites. Part 2: The various chemical types of Adhesives for composites, epoxy adhesives”*, 2006, Adhesives & Sealants, www.specialchem4adhesives.com.

COIGNET, François, *“Bétons agglomérés appliqués à l’art de construire”*, París, Librairie Scientifique, Industrielle et Agricole E. Lacroix, Quai Malaquais, 15, 1861.

COMISIÓN EUROPEA, *“Informe de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Informe de situación sobre la energía renovable”*, Bruselas, 2013.

CREMONA, Luigi, *“Graphical statics. Two treatises on the graphical calculus and reciprocal figures in graphical statics”*, Oxford, Clarendon press, 1890 (traducción realizada por Thomas Hudson Beare).

CROSS, Hardy, *“Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed End Moments”* publicado Estados Unidos, ASCE, 1930.

DE FUSCO, R., *“Historia de la arquitectura contemporánea”*, Madrid, H. Blume, 1981.

DE HEREDIA, Rafael, *“Construcciones Metálicas”*, Madrid, Editado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 1969.

DEL PALACIO, Alberto, *“Le ciment Armé système Unciti”*, Madrid (España), Ricardo Rojas, 1904.

DEMORTIER, Guy, *“PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza”*, Bélgica, Laboratoire d’Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, 2004.

DEMORTIER, Guy, *“Revising the construction of the egyptian pyramids”*, Europhysics News, Vol.40, nº 1, p. 27-31, 2009.

DISCHINGER, Franz, *“Die strenge Theorie der Kreiszyinderschale in ihrer Anwendung auf die Zeis-Dywudag-Schalen”*, Alemania, Beton Und Eisen, Vol. 34, nº 15, 1935, p. 257-264; p. 283-294; p. 392.

ELICES CALAFAT, Manuel *“De las cuerdas de cáñamo a los hilos de araña. La Ciencia e ingeniería de los materiales”* (artículo), Real Academia de Ciencias, 2008.

ENGEL, Heino, *“Sistemas de estructuras”* (título original *“Tragsysteme. Heino Engel”*), Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001, p. 23.

ESCRIG PÉREZ, Christian, *“Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón”*, España, Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras de ingeniería de la UPC, 2010.

FABER, Colin, *“Las estructuras de Candela”* (título original: *“Candela: The Shell Builder”* (1975)), México, Compañía Editorial Continental, S. A., 1963 (primera edición en castellano en 1970).

FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, J.A. *“Eugène Freyssinet”*, Barcelona (España), 2C Ediciones, 1978.

FERNÁNDEZ SANZ, Fernando, *“Los Grandes Puentes de Hierro del Ferrocarril”*, (Artículo), España.

FERNÁNDEZ TROYANO, Leonardo, *“Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación”*, España, Revista de Obras Públicas, Nº 3.460 (Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil), Noviembre de 2005.

FINSTERWALDER, Ulrich, *“Die Theorie der Zylindrischen schalengewölbe System Zeiss-Dywidag und Ihre Anwendung Auf Die Grossmarkthalle in Budapest”*, Zurich, Memoires I.A.B.S.E., Vol. 1, 1932.

FLÜGGE, W., *“Statik und Dynamik der Schalen”*, Berlin, J. Springer, 1934.

FRAMPTON, Kenneth, *“Historia crítica de la arquitectura moderna”*, Gustavo Gili, Barcelona, 1993, (versión castellana de Jorge Sainz, 1998) (Primera edición en inglés, realizada por Thames and Hudson Ltd., Londres, en 1980).

FREYSSINET, Eugène, *“Un amour sans limite”*, París (Francia), Ed. du Linteau, 1993.

GALILEI, Galileo, *“Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze”*, Italia, 1638, (edición electrónica en italiano, *“Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze”*, Italia, e-text.it, 1998), (título en castellano, *“Discurso y demostración matemática, en torno a dos nuevas ciencias”*).

GALLAGHER, R. H., PADLOG, J. y BIJLAARD, P. P., *“Stress Analysis of Complex Shapes”*, Journal of the American Rocket Society, Vol. 32, p. 700-707, Mayo de 1962.

GARCÍA, Daniel, *“Arquitectura digital”*, Bogotá (Colombia), Revista AXXIS, 2014.

GARCÍA DEL MONTE, José María, *“De las posibilidades arquitectónicas del pretensado, Técnica y proyecto en la obra de Paulo Mendes da Rocha”*, España, Tesis doctoral, ETSAM, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

GARCIVAL, Gonzalo, *“Tesoros de España nº5: Estaciones de ferrocarril”*, España, Espasa Calpe, 2000.

GARVIE, R. C., HANNINK, R. H., PASCOE, R. T., *"Ceramic Steel?"*, Australia, Nature nº258, 25 de diciembre de 1975, p. 703-704.

GAY, Aquiles, SAMAR, Lidia, *"El diseño Industrial en la historia"*, España, Edición Técnica, 2004.

GIEDION, Sigfried, *"Espacio, tiempo y arquitectura. Origen y desarrollo de una nueva tradición"*, Barcelona, Editorial Reverté, 2009 (Edición en castellano de Jorge Sainz Avia) (Texto original de 1941).

GIEDION, Sigfried, *"La mecanización toma el mando"*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1969 (Texto original *"Mechanization Takes Command"*, 1948).

GOLDSMITH, Myron, *"The Tall Building: The Effects of Scale"*, Chicago (Estados Unidos), Degree of Master of Science in Architecture in the Graduate School of Illinois Institute of Technology, 1953.

GÓMEZ MUÑOZ, Diego, *"Estudio comparativo entre distintas metodologías de industrialización de la construcción de viviendas"*. Barcelona (España), Tesina de especialización, Departamento de Ingeniería de la Construcción (UPC), Junio 2008.

GONZALO MARTÍN, Román, *"Objeto no identificado"*, Valencia (España), d[x]i magazine nº38, febrero de 2012.

GRAFTON, P. E. y STROME, D. R., *"Analysis of Axisymmetric Shells by the Direct Stiffness Method"*, Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 1, nº 10, p. 2342-2347, 1963.

HEIDEGGER, Martin, *"Sein und Zeit"*, Alemania, 1927, (edición en castellano, *"El ser y el tiempo"*, México, FCE, 1951).

HORKHEIMER, Max y AFORNO, Theodor W., *"Dialéctica de la Ilustración"* (1969), Madrid (España), Trotta, 2004.

HOUDIN, Jean-Pierre, *"Khufu: The Secrets Behind the Building of the Great Pyramid"*, Egipto, Farid Atiya Press, 2006.

HUERTA, Santiago, *"Arcos, bóvedas y cúpulas: Geometría y el equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica"*, Madrid (España), Instituto Juan de Herrera (distribuida por Reverté), 2004.

HUIKIES, R. y CHAO, E. Y. S., *"A Survey of Finite Element Analysis in Orthopedic Biomechanics: The First Decade"*, Journal of Biomechanics, Vol. 16, nº 6, p. 385-409, 1983.

JARAMILLO JIMÉNEZ, José Oscar, *"Análisis Clásico de estructuras"*, Bogotá (Colombia), Universidad Nacional de Colombia, 2004.

JEANNERET-GRIS, Charles-Édouard, *"Cuando las catedrales eran blancas"* (título original en francés: *Quand les cathédrales étaient blanches*), Paris (Francia), 1937.

JIMÉNEZ PÉREZ MITRE, Alfredo, *“Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil “Tubolare SAND CAR” de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALFOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos”*, Puebla (México), Tesis profesional en la Universidad de las Américas Puebla, 2004.

KANT, Immanuel, *“Crítica de la razón pura”*, Alemania, 1781. (título original: *Kritik der reinen Vernunft*).

KIRCHERI, Athanasii, *“China Monumentis, Sacris quá Profanis”*, Italia, Apud Jacobum á Meurs, in fofoa vulgo de Keyfersgracht, 1667

KOMENDANT, August Eduard, *“18 años con el arquitecto Louis I. Kahn”*, A. Coruña (España), Colegio oficial de Arquitectos de Galicia, 2000.

KOOLHAAS, Rem, *“Koolhaas Houselife”*, Italia, Bêka Fims, 2008.

LE CORBUSIER, *“Vers une architecture”*, París (Francia), Crès, 1923, (edición en castellano, *“Hacia una arquitectura”*, Barcelona (España), Apóstrofe, 1977).

LE CORBUSIER, *“Mensaje a los estudiantes de Arquitectura”*, Buenos Aires (Argentina), Ediciones Infinito, 2002.

LOOS, Adolf, *“Ornamento y delito y otros escritos”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1972.

LOOTSMA, Bart, *“Hacia una arquitectura reflexiva”*, España, El Croquis nº 86, 1997, p. 34-42.

LÖSER, Benno, *“Hormigón armado. Métodos de cálculo y dimensionado con tablas y ejemplos numéricos”*, Barcelona (España), El Ateneo, 1987. (Traducido de la edición alemana).

LUCIE-SMITH, Edward, *“Arte visuales del siglo XX”*, Colonia (Alemania), Konemman, 2000.

LUIS LIMA, Edgardo, HERNÁNDEZ BALAT, Victorio, FRANCISCO BISSIO, Juan, *“Hormigón armado: notas sobre su evolución y la de su teoría”*, Seminario sobre fundamentos de la resistencia de materiales, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Plata, Buenos Aires (Argentina), 2002.

LYNESS, J. F., OWEN, D. R. J. y ZIENKIEWICZ, O. C., *“Three-Dimensional Magnetic Field Determination Using a Scalar Potential. A Finite Elements Solution”*, Transactions on Magnetism, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 1649-1656, 1977.

MACADAR, Andrea, *“Entrevista: Paulo Mendes da Rocha”*, São Paulo (Brasil), Vitruvius 026.02 año 07 (Editorial Romano Guerra), abril de 2006.

MACIÁ LLUSÁ, Antonio, *“La construcción de uno o varios armazones, formados por un tejido de mallas más o menos espesas, de alambres de hierro o acero de todas formas, dimensiones y secciones combinadas con una o varias capas de ladrillos o rasillas, ordinarios, especiales o de cemento, situados bien interiormente a los armazones o exteriormente o entre ellos, bien combinando dos o todas estas disposiciones, enluciendo o no la obra por dentro y por fuera con mortero hidráulico o de cemento o una capa de hormigón”*, Barcelona (España), Ministerio de

Industria, Turismo y Comercio Oficina Española de Patentes y Marcas (O.E.P.M.). Archivo Histórico. Patente nº 15.562, 1894.

MALDON MICHELL, Anthony George, *"The limits of Economy of Material in Frame-Structures"* (artículo), Philosophical Magazine Series 6 (1901-1925) Volumen 8 nº 47 (1904), 8 de junio de 2010.

MAKOWSKI, Z. S., *"History of Development of Various Types of Barrel Vaults and Review of Recent Achievements all over the World. Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults"*, London, Elsevier Applied Science Publishers, 1985.

MARTÍN, H. C., *"Plane Elasticity Problems and the Direct Stiffness Method"*, The Trend in Engineering, Vol. 13, p. 5-19, Enero de 1961.

MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, Luis, *"Intersecciones"*, España, Editorial Rueda, 2004.

MARVÁ Y MAYER, José, *"Mecánica aplicada a las construcciones"*, Madrid, 3ª Ed. Julián Palacios, 1909 (primera impresión en 1894), p. 1557-1558.

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José, *"Mecánica de las Estructuras Antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban"*, Madrid (España), Munilla-Leira, 2011.

MELOSH, R. J. *"A Stiffness Matrix for the Analysis of Thin Plates in Bending"*, Journal of the Aerospace Sciences, Vol. 28, nº 1, p. 34-42, Enero de 1961.

MELOSH, R. J., *"Structural Analysis of Solids"*, Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, p. 205-223, Agosto de 1963.

MENDOZA, Gregorio B., *"Prefabricados de concreto: el futuro apenas empieza"*, México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC), abril de 2008.

MIJANGOS, Carmen y SERAFÍN MOYA, José, *"Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI"*, Madrid (España), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2007.

MOLEÓN, Pedro, *"John Soane (1753-1837) y la arquitectura de la razón poética"*, España, Mairea Libros (Impreso por Artes Gráficas Palermo S.L.), 2001.

MOLINÉ ESCALONA, Miguel, *"Las claves de la Arquitectura"*, España, Ed. Planeta, 1994.

MONFORT, Arturo, *"Puente de hormigón armado sobre el río Júcar. Aplicación de la teoría de Mörsch"*, Revista de Obras Públicas, Vol. LXV, nº 2166, p. 149-154, 1917.

MOSSOVICH, Marcela, *"El funcionalismo bajo el ojo de tres diseñadores. Van de Velde - Le Corbusier - Mies Van de Roche"*, Buenos Aires (Argentina), Creación y Producción en Diseño y Comunicación Nº21, p.27-29.

NEGROPONTE, Nicholas, *"Ser Digital"*, Barcelona (España), Ediciones B, 1995.

NERVI, Pier Luigi, *"Relations entre architectes, ingenieurs et constructeurs"*, Francia, L'architecture d'aujourd'hui, Diciembre 1961.

- NEWTON, Isaac, *"Analysis per aequationes número terminorum infinitos"*, Reino Unido, 1669.
- NIETO GARCÍA, Apuntes de *"Mecánica de medios continuos y teoría de las estructuras"* de OCW Universidad de Sevilla.
- NISSEN, Henrik, *"Construcción industrializada y diseño modular"*, Barcelona (España), Ed. Blume, 1976.
- NORBERG- SCHULZ, Christian, *"Intenciones en arquitectura"*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1979).
- PÁEZ BALACA, Alfredo, *"Cincuenta años de hormigón armado en España"*, España, Revista de Obras Públicas, (Vol. CIV, nº 2892), 1956.
- PÁEZ BALACA, Alfredo, *"El hormigón pretensado en la arquitectura"*, España, Informes de la Construcción, nº457-4, 11 de octubre de 1988.
- PAINE, Thomas, *"Los Derechos del Hombre"*, Filadelfia, Imprenta de Matías Carey e Hijos (Traducido del inglés por Santiago Felipe Puglia en 1821), 1791.
- PARÍS CARBALLO, Federico, CAÑAS DELGADO, José, FERNÁNDEZ CANTELI, Alfonso, LAMELA REY, María Jesús, *"Cálculo matricial de estructuras"*, Oviedo (España), Universidad de Oviedo, 2006.
- PASCAULT, Jean-Pierre y WILLIAMS, Roberto J.J., *"Epoxy Polymers: New Materials and Innovations"*, Alemania, Wiley-VCH Verlag Gmb H& Co. K Ga A, Weinheim, 2010.
- PAZ ABUÍN, Senén, *"Adhesivos estructurales: un panorama de presente y futuro"*, Interempresas.net, 2011.
- PEÑA BOEUF, Alfonso, *"Mecánica elástica"*, Madrid, 1ª Ed. Voluntad, 1925.
- PÉREZ NAYA, Antonia, *"Metáforas ocultas en los espacios de la muerte actuales"*, España, Boletín Académico. Revista de investigación y arquitectura contemporánea Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de La Coruña, 2013.
- PÉREZ WHITE, Tomás, MATEOS GÓMEZ, Juan Manuel y GÓMEZ SÁNCHEZ, Pedro Antonio, *"Resistencia de materiales"*, Salamanca (España), Universidad de Salamanca, 1992.
- PEVNER, Nikolaus, *"Pioneros del diseño moderno"*, Buenos Aires, Ediciones Infinito, 1958 (Primera edición, 1936).
- PEZZANO, Pascual A., *"Siderurgia"*, Buenos Aires (Argentina), Librería y Editorial Alsina, 1963
- PORT, M.H. *"Six Hundred New Churches: The Church Building Commission 1818–1856"*, Estados Unidos, Yale University Press, 2nd Ed, 2006.
- QUINTAS RIPOLL, Valentín, *"Sobre el teorema de Maxwell y la optimización de arcos de cubierta"*, Informes de la Construcción, 9 de Septiembre de 1988.

QUINTERO MORENO, Francisco, *“Estructuras de Acero, uniones”*, 2ª edición, Madrid, Editado por la Fundación Escuela de la Edificación, 1988.

RAHIM, Ali y otros, *“The digital and the material. Cecil Balmond in conversation with Michael Weinstock”*, Reino Unido, Architectural Design vol. 72 nº 1, enero de 2002.

REDER, Gustavo, FERNÁNDEZ SANZ, Fernando, *“Locomotoras de M.Z.A., Historia de la Tracción a Vapor en España – Tomo 1”*, España, Editado por Fernando Fernández Sanz, 1995.

REDER, Gustavo, FERNÁNDEZ SANZ, Fernando, *“Locomotoras del Norte, Historia de la Tracción a Vapor en España – Tomo 2”*, España, Editorial Noesis, 2001.

REYNER BANHAM, Peter, *“Guide to Modern Architecture”*, Reino Unido, Architectural Press, 1962.

REYNER BANHAM, Peter, *“The New Brutalism”*, Reino Unido, Architectural Press, 1966.

REYNER BANHAM, Peter, *“Megastructure”*, Reino Unido, Thames and Hudson, 1976.

RODRÍGUEZ BORLADO, Ramiro, *“Prontuario de Estructuras Metálicas”*, 6ª edición, Madrid, Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, 2002.

RODRÍGUEZ HENAO, Andrea, *“La arquitectura como influencia social, política y económica en el desarrollo de una civilización tanto en el poder como en la destrucción ambiental”*, Colombia, SCHEMA (ISSN: 2256-3717), 2014.

ROMERO MARTÍNEZ, Alonso, *“Evolución de los métodos de cálculo en las estructuras diseñadas con pórticos de concreto armado para edificios en el área norte de Latinoamérica”*, Revista de la Facultad de Ingeniería CUV v.20 n.2, 2005.

ROSELL, Jaume, CÁRCAMO, Joaquín, *“Los orígenes del hormigón armado y su introducción en Bizkaia. La fábrica Ceres de Bilbao”*, España, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Bizkaia, 1995.

RUI-WAMBA, Javier, FERNÁNDEZ ALBA, Antonio, *“Eugène Freyssinet un ingeniero revolucionario”*, España, Fundación Esteyco, 2003.

RUI-WAMBA MARTIJA, Javier, *“El pretensado como instrumento de diálogo entre la ingeniería y la arquitectura”*, España, Hormigón y Acero, 22 de agosto de 2007.

SALAS SERRANO, Julián, *“De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico”*, Informes de la Construcción, vol. 60, nº 512, octubre 2010.

SAMBRICIO, Carlos, *“Eienne-Louis Boullée: ensayo sobre el arte”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1985.

SCHMUTZLER, R., *“El modernismo”*, Madrid, Alianza ed. Col. Alianza Forma 12, 1982.

SEIM, Werner, *“Bewehrung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken”*, Estados Unidos, John Wiley & Sons, 2012.

- SIMONNET, Cyrille, *"HORMIGÓN historia de un material"*, España, Nerea, 2009.
- SOLÁ-MORALES RUBIO, Ignasi, OLIVERAS SAMITIER, Jordi, GRAELLS, Antoni y GRAELLS, Ramon, *"Introducción a la Arquitectura. Conceptos fundamentales"*, Barcelona (España), Edicions UPC, 2009.
- ST. JOHN WILSON, Colin, *"Building Ideas"*, Reino Unido, The Architect's Journal, vol. 195 nº 9, marzo de 1995.
- STEELE, Jeffrey, *"Applied Finite Element Method"*, Marcel Dekker, Inc. Segunda Edición, 1989.
- STRIKE, James, *"De la construcción a los proyectos: la influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000"*, Barcelona (España), Editorial Reverté, 2004.
- SWENSON, Alfred y CHANG, Pao-Chi, *"Building construction: High-rise construction since 1945"*, Encyclopædia Britannica, 2008.
- TARTARINI, Jorge Daniel, *"Arquitectura ferroviaria"*, Buenos Aires (Argentina), Colihue, 2005.
- THORNHILL, Ted, *"How to build a skyscraper in NINETEEN DAYS: Time-lapse how Chinese firm builds 57-storey block at a rate of thee floors a day"*, Reino Unido, dailymail.co.uk, 11 de marzo de 2015.
- TIMOSHENKO, Stephen, *"History of Strength of Materials"*, Estados Unidos, D. Van Nostrand Company, Inc, 1940 (Primera edición de 1930).
- TIMOSHENKO, Stephen, *"Resistencia de materiales. Teoría elemental y problemas"*, Espasa-Calpe, 1970.
- TOMÁS FRANCO, José, *"Video: Arquitectura Impresa / Digital Grotesque"*, México, ArchDaily, <http://www.archdaily.mx/mx/02-332275/video-arquitectura-impresa-digital-grotesque>, 04 de junio de 2014.
- TORROJA MIRET, Eduardo, *"Discurso leído en el acto de su recepción por 38 el Excmo. Sr. D. Eduardo Torroja Miret"*, Madrid, Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales, 1944.
- TORROJA MIRET, Eduardo, *"Razón y Ser de los Tipos Estructurales"*, Madrid, Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento, 1957.
- TORROJA MIRET, Eduardo, *"Las estructuras de Eduardo Torroja"*, Madrid, Editado por el Ministerio de Fomento, 1958 (Reedición de 1999).
- TSILIAKOS, Marios, *"Plasti (k) by Marc Fornes & The Very Many"*, Nueva York (EEUU), Archi Search.gr, 6 de febrero de 2012.
- TURNER, M. J. CLOUGH, R. W., MARTIN, H. C. y TOPP, L. J., *"Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures"*, Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 23, Nº 9, Septiembre de 1956.
- TZU, Sun, *"El arte de la guerra"*, España, EDAF 2004, (el texto original chino, data del siglo IV a.C.).

UNION CENTRALE DES ARTS DECORATIFS, *“Le livre des expositions universelles. 1851-1889”*, París, Editions des arts decoratifs – Herscher, 1983.

VACCHELLI, G, *“Las construcciones de hormigón y de cemento armado”*, Madrid (España), Romo y Fussel, 1903.

VARIS, Tapio, *“Finlandia: estrategia y destrezas comunicativas para la sociedad del conocimiento”*, España, Telos nº 72, julio-septiembre 2007.

VÁZQUEZ VAAMONDE, Alfonso J. y DAMBORENEA GONZÁLEZ, Juan J., *“Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos”*, Madrid (España), Colección Textos Universitarios, CSIC, 2001.

VENTURI, Robert, *“Complejidad y contradicción en la arquitectura”*, España, Gustavo Gili, 1972 (editado originalmente como *“Complexity and Contradiction in Architecture”* en Nueva York en 1966).

VENTURI, Robert, SCOTT BROWN, Denise, IZENOUR, Steven, *“Learning from Las Vegas: The Forgotten Symbolism of Architectural Form”*, Cambridge (Estados Unidos), The MIT Press, 1977. (Es una revisión del texto de 1972 *“Learning from Las Vegas”*).

VERANCIO, Fausto, *“Machinæ Novæ”*, Venetiis Privilegiis, 1617.

VINEGAR, Aron, *“I am a monument: On Learning from Las Vegas”*, Cambridge (Estados Unidos), The MIT Press, 2008.

VITRUVIO, Marco, *“Los diez libros de la arquitectura”*, (facsimil de la edición de 1787, VITRUVIO, Marco, *“Los diez libros de la arquitectura”*, Barcelona (España), Alta Fulla, 1993).

WENTWORTH THOMPSON, D'Arcy, *“Sobre el crecimiento y la forma”*, Reino unido, 1917.

WURMAN, Richard Saul, *“What will be has always been: The Words of Louis I. Kahn”*, Nueva York (Estados Unidos), Access Press and Rizzoli, 1986.

Y. ONODA, George y L. HENCH, Larry, *“Ceramic processing before firing”*, Estados Unidos, University of Florida, Wiley, 1978.

YEPES PIQUERAS, Víctor, *“La prefabricación revoluciona los procedimientos constructivos”*, Valencia (España), Universidad Politécnica de Valencia, 27 noviembre 2013.

WÖLFFLIN, Heinrich, *“Prolegomena zu einer Psychologie der Architektur”*, Múnich (Alemania), Kgl. Hof- & Universitäts-Buchdruckerei von Dr. C. Wolf & Sohn, 1886.

WORRINGER, Wilhelm, *“Abstraktion und Einfühlung”*, Múnich (Alemania), R. Piper & Co., Verlag, 1911 (Texto original de 1907).

ZAFRA, Juan Manuel, *“Construcciones de hormigón armado”*, Madrid (España), Imprenta V. Tordesillas, 1911.

ZAFRA, Juan Manuel, *“Tratado de hormigón armado”*, Madrid, Voluntad, (2ª ed.) 1923.

ZEVI, Bruno, *"Saber ver la arquitectura"*, Buenos Aires (Argentina), Poseidon Editora, 1951, (Publicado originalmente como *"Saper vedere l'architettura"* en 1948).

ZIENKIEWICZ, O. C., WATSON, M. y KING, I. P., *"A Numerical Method of Visco-Elastic Stress Analysis"*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 10, p. 807-827, 1968.

Bibliografía complementaria

AAVV, *“Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la construcción”*, Madrid (España), EFCA, 22-24 de octubre de 1998.

AAVV, *“De hospital a museo: Ampliación del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía”*, Madrid (España), SEEAC, 6-7 de 2005.

ÁBALOS, Iñaki y HERREROS, Juan, *“Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000”*, Guipúzcoa (España), Nerea, 1999.

ADORNO, Theodor W., *“Aesthetische Theorie”*, Frankfurt (Alemania), Suhrkamp, 1970, (Edición en castellano, *“Teoría Estética”*, Madrid, Taurus, 1992).

ANCESCHI, Luciano, *“Il caos, il metodo. Primi lineamenti di una nuova estetica fenomenologica”*, Italia, 1981.

ADORNO, Theodor W., *“Aesthetische Theorie”*, Frankfurt (Alemania), Suhrkamp, 1970, (Edición en castellano, *“Teoría Estética”*, Madrid, Taurus, 1992).

APARICIO GUIADO, Jesús María, *“Construir con la razón y los sentidos. Reflexiones docentes y de investigación”*, Buenos Aires (Argentina), Nabuko, 2008.

ARNHEIM, Rudolf, *“The Dynamics of Architectural Form”*, Estados Unidos, University of California, 1977, (edición en castellano, *“La forma visual de la arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2001 (1978-2001)).

AROCA HERNÁNDEZ-ROS, Ricardo, *“El método”*, Madrid (España), Instituto Juan de Herrera, 2000.

BACHELARD, Gaston, *“La poétique de l'Espace”*, Francia, Presses Universitaires de France, 1957.

BONELL COSTA, Carmen, *“Divina proporción, las formas geométricas y la acción del demiurgo”*, España, Editions UPC, 1995.

CAMPO BAEZA, Alberto, *“La idea construida. La arquitectura de la luz y las palabras”*, Madrid (España), Librería Técnica CP67, 2000.

CAPITEL, Antón, *“Las formas ilusorias en la arquitectura moderna”*, España, Tanais, 2004.

CARERI, Francesco, *“Wakscapes. El andar como práctica estética”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2002.

CASAL, José María, *“El ambiente luminoso en el espacio arquitectónico”*, Madrid (España), COAM y ADAE, exposición de 29 de noviembre de 1978.

CHARLESON, Andrew, *"Structure as Architecture: A Source Book for Architects and Structural Engineers"*, Reino Unido, Elsevier, 2005, (edición en castellano, *"La estructura como arquitectura. Formas, detalles y simbolismo"*, Barcelona (España), Reverté, 2007).

CLAUX CARRIQUIRY, Inés, *"La arquitectura y el proceso de diseño"*, Perú, Cauces Editores, 2016.

ECO, Umberto, *"Opera aperta. Forma e indeterminazione nelle poetiche contemporanee"*, Milan (Italia), Bompiani, 1962, (edición en castellano, *"Obra abierta. Forma e indeterminación en el arte contemporáneo"*, Barcelona (España), Seix Barral, 1965).

ECO, Umberto, *"La struttura assente"*, Milan (Italia), Bompiani, 1968, (edición en castellano, *"La estructura ausente"*, Barcelona (España), Lumen, 1974).

ECO, Umberto, *"La ricerca della lingua perfetta"*, Milan (Italia), Bompiani, 1962, (Edición en castellano, *"La búsqueda de la lengua perfecta"*, Barcelona (España), Grijalbo mondadori, 1994).

FERNÁNDEZ PER, Aurora, MOZAS, Javier y ARPA, Javier, *"This is Hybrid. An analysis of mixed-use buildings by a+t"*, España, a+t, 2011.

GADAMER, Hans-Georg, *"Wahrheit und Methode"*, Berín (Alemania), Akademik Verlag GmbH, 1975, (edición en castellano, *"Verdad y método"*, 1977).

GADAMER, Hans-Georg, *"Vernunft im Zeitalter der Wissernschaft"*, Frankfurt (Alemania), Suhrkamp Verlag, 1976, (edición en castellano, *"La razón en la época de la ciencia"*, Alfa, 1981).

GHYKA, Maitila Costiesco, *"Esthétique des proportions dans la nature las arts"*, Francia, Gallimard, 1927, (edición en castellano, *"Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes"*, Barcelona (España), Poseidon, 1983).

GOODMAN, Nelson, *"Ways of wordmaking"*, Estados Unidos, Nelson Goodman Hackett, 1978, (edición en castellano, *"Maneras de hacer mundos"*, Madrid (España), Visor Distribuciones, 1990).

GUILLAUME, Paul, *"La psychologie de la Forme"*, Francia, Flamarion, 1979.

HILDEBRAND, Adolf Von, *"Das Problem der Form in Bildenden Kunst"*, Estrasburgo (Francia), Heitz & Mündel, 1893, (edición en castellano, *"El problema de la forma en la obra de arte"*, Madrid, Visor, 1988).

HUSSERL, Edmund, *"Invitación a la fenomenología"*, Barcelona (España), Paidós, 1992.

KOOLHAAS, Rem, *"Conversaciones con estudiantes"*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 2002.

LE CORBUSIER, *"Vers une architecture"*, París (Francia), Crès, 1923, (edición en castellano, *"Hacia una arquitectura"*, Barcelona (España), Apóstrofe, 1977).

LE CORBUSIER, *“Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme”*, París (Francia), Crès, 1930,

LE CORBUSIER, *“Manière de penser l'urbanisme”*, París (Francia), l'Architecture d'Aujourd'hui, 1946.

LE CORBUSIER, *“Propos d'urbanisme”*, París (Francia), Bournnelier, 1946.

LE GUERN, Michel, *“Sémantique de la Métaphore et de la Métonymie”*, París (Francia), Larousse, 1973, (edición en castellano, *“La Metáfora y la Metonimia”*, Madrid (España), Catedra, 1984).

LYOTARD, Jean-François, *“La condition postmoderne: rapport sur le savoir y The Postmodern Condition: A Report on Knowledge”*, París (Francia), Les Éditions de Minuit, 1979, (edición en castellano, *“La condición posmoderna: Informe sobre el saber”*, Madrid (España), Catedra, 1987).

MANNHEIM, Karl, *“Ideology and utopia”*, Nueva York (Estados Unidos), Harcourt, Brace & World, 1936 (originalmente publicado en 1929), (edición en castellano, *“Ideología y utopía. Introducción a la sociología de conocimiento”*, Madrid (España), Aguilar, 1966).

MARTÍNEZ CALZÓN, Julio, *“Puentes, Estructuras, Actitudes”*, España, Turner, 2006.

MERLEU-PONTY, Maurice, *“Phénomélogie de la perception”*, Francia, Gallimard, 1945, (edición en castellano, *“Fenomenología de la percepción”*, Barcelona (España), Planeta De Agostini, 1993).

MONTEYS, Xavier, *“La gran máquina. La ciudad en Le Corbusier”*, Barcelona (España), Serbal, 1996.

NORBERT-SCHULZ, Christian, *“Intentions in Architecture”*, Cambridge, Massachusetts (Estados Unidos), MIT Press, 1965, (edición en castellano, *“Intenciones en arquitectura”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1998).

MUNTAÑOLA, Josep, *“Retórica y Arquitectura”*, Madrid (España), Hermann Blume, 1990.

NORBERT-SCHULZ, Christian, *“Existence, Space and Architecture”*, Londres (Reino Unido), Praeger Publishers, 1971, (edición en castellano, *“Existencia, Espacio y Arquitectura”*, Barcelona (España), Blume, 1980).

OMA, KOOLHAAS, Rem y MAU, Bruce, *“S, M, L, XL”*, Estados Unidos, Monacelli Press, 1995.

OTTO, Frei Paul, *“Arquitectura adaptable: seminario organizado por el Instituto de Estructuras Ligeras (IL)”*, Barcelona (España), Gustavo Gili, 1979.

RISEBERO, Bill, *“Fantastic Form. Architecture and Planning today”*, Reino Unido, The Herbert Press, 1992, (edición en castellano, *“Historia dibujada de la arquitectura. Últimas tendencias [Forma fantástica]”*, Madrid (España), Celeste, 1995).

RUIZ BARBARIN, Antonio, *“Pretextos para hablar de Arquitectura”*, España, nobuko, 2012.

SÁNCHEZ VIDIELLA, Álex, “Maestros de la Arquitectura”, Barcelona (España), Frechmann Kolón GmbH, 2010.

SEMPER, Gottfried “*Style in the Technical and Tectonic Arts; or, Practical Aesthetics*”, Estados Unidos, Getty Publications, 2004, (edición en castellano, “*Semper: el estilo: El estilo en las artes técnicas y tectónicas, o, Estética práctica y textos complementarios*”, Argentina, Azpiazu ediciones, 2013).

SERRES, Michel, “*Les orígenes de la geometrie*”, París (Francia), Flammarion, 1993, (edición en castellano, “*Los orígenes de la geometría*”, México, Siglo XXI, 1996).

SUMMERSON, John, “*The Classical Language of Architecture*”, Londres (Reino Unido), Tharnes and Hudson, 1963, (edición en castellano, “*El lenguaje clásico de la arquitectura. De L.B. Alberti a Le Corbusier*”, Barcelona (España), 2001 (Primera edición de 1974))

TOURNIKIOTIS, Panayotis, “*The Historiography of Modern Architecture*”, Estados Unidos, MIT press, 1999, (edición en castellano, “*La historiografía de la arquitectura moderna*”, Madrid (España), Mairera/Celeste, 2001).

TORRES ARCILA, Martha, “*Puentes*”, México (impreso en España por Grabasa), Atrium, 2002.

VATTIMO, Gianni y otros, “*En torno a la posmodernidad*”, Barcelona (España), Anthropos, 1990.

WESTON, Richard, “*Materials, Form and Architecture*”, Estados Unidos, Yale University Press, 2003, (edición en castellano, “*Materiales, forma y arquitectura*”, Barcelona (España), Blume, 2003).

ZEVI, Bruno, “*Saper vedere l'architettura*”, Torino (Italia), Einaudi, 1948, (edición en castellano, “*Saber ver la arquitectura*”, Barcelona (España), Apóstrofe, 1998).

ZEVI, Bruno, “*Storia dell'architettura moderna*”, Torino (Italia), Einaudi, 1950, (edición en castellano, “*Historia de la arquitectura moderna*”, Madrid (España), Poseidon, 1980).