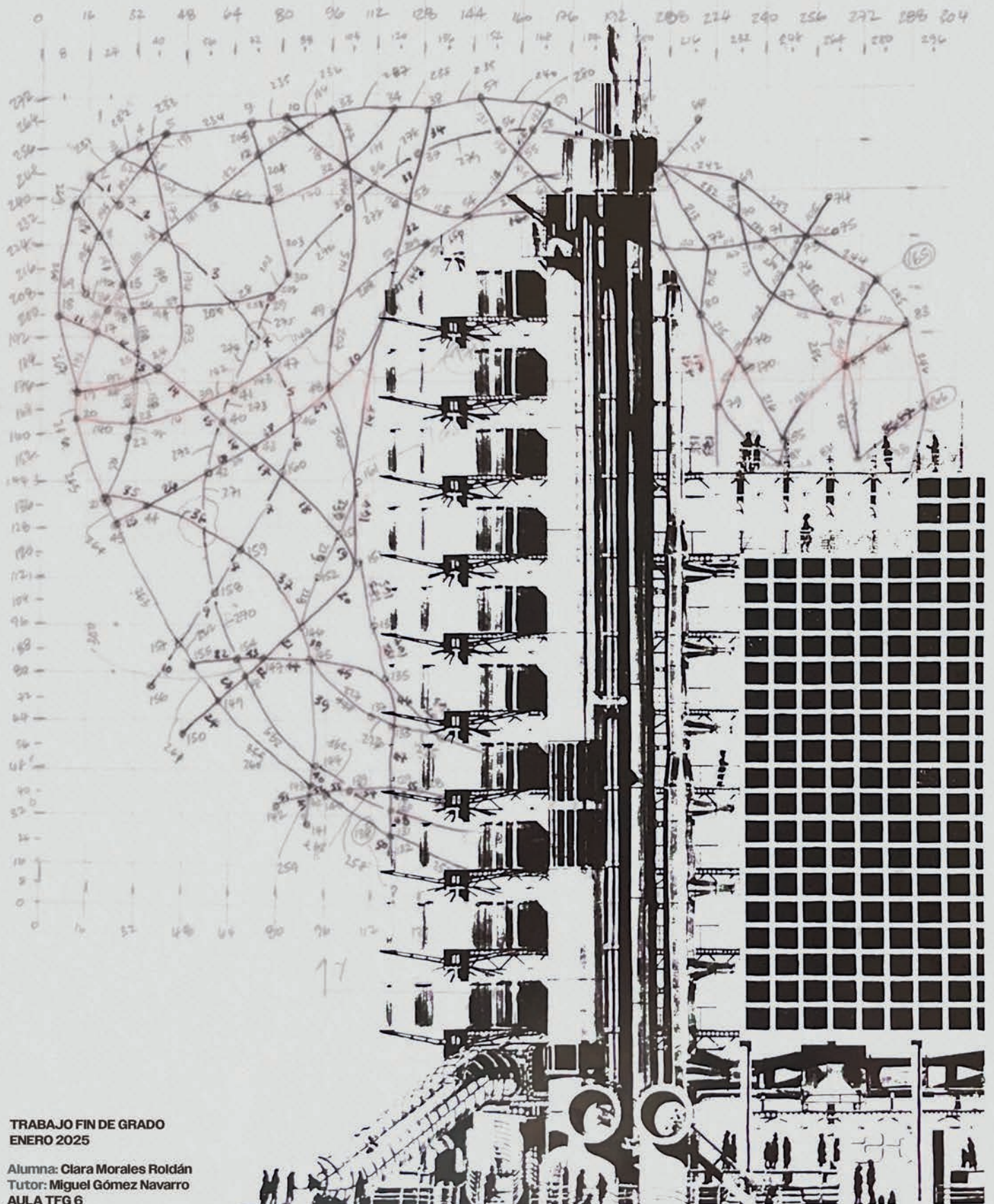


¿Y SI...?

Imaginando las estructuras que podrían haber sido (o no)



TRABAJO FIN DE GRADO
ENERO 2025

Alumna: Clara Morales Roldán
Tutor: Miguel Gómez Navarro
AULA TFG 6

A mi familia y amigos, por haber estado conmigo en cada paso.

A María, por entenderme, ayudarme y apoyarme.

A mi tutor, Miguel Gómez, por su interés y dedicación, y por devolverme mi pasión por las estructuras.

A mi abuelo Fede, que supo que éste era mi camino mucho antes que yo.

"Un arquitecto interesado consigue diseñar estructuras por sí mismo. Diseñar, no dimensionar, pero diseñar."

Jürg Conzett

(Zastavani y Wittevrongel, 2014)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Clara Morales Roldán

¿Y SI..?

Imaginando las estructuras que podrían haber sido (o no)

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

¿Y SI...?

Imaginando las estructuras que podrían haber sido (o no)

Alumna: Clara Morales Roldán

Tutor: Miguel Gómez Navarro

Departamento de Física y Estructuras de la Edificación

Trabajo de Fin de Grado Enero 2025

Aula TFG 6

Eduardo Pesquera González, coordinador

Giuseppe La Ferla, adjunto

© de las imágenes, sus autores, 2024

© de los textos, sus autores, 2024

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento.

¿Y SI...?

Imaginando las estructuras que podrían haber sido (o no)

Figura 1. 1st Traversina bridge, Jürg Conzett. Adaptado de *Traversinersteg* [Fotografía] por Kruh, 2023.



ÍNDICE

Resumen

Abstract

Introducción

Motivación	17
Estado de la cuestión	19
Objetivo	21
Metodología	23

1. Estructura y arquitectura y viceversa

1.1. Convergencia entre ingeniería y arquitectura	25
1.2. El proceso de diseño	27

2. Posibles relaciones entre estructura y arquitectura

2.1. Grado de influencia en el proyecto	31
2.2. Manifestación	32
2.3. ¿Qué están haciendo los arquitectos?	36

3. Casos de estudio

Metodología	56
El Leadenhall Building en hormigón	58
El Centre Pompidou en madera	76
La Mossbourne Community Academy en acero	102

Conclusiones

Bibliografía

Procedencia de las imágenes

118

RESUMEN

Esta investigación explora la interacción entre estructura y arquitectura, destacando la **influencia que tienen las decisiones estructurales en los proyectos arquitectónicos**. El estudio parte de una **base teórica** sobre la relación entre estructura y arquitectura, que se centra en dos aspectos fundamentales: el grado de influencia (la medida en que la estructura forma parte del proceso de diseño) y la manifestación (la relevancia visual y espacial que adquieren las estructuras en el proyecto final).

Con esta base se examinan 48 proyectos recientes de arquitectos de renombre, analizando parámetros relacionados con la estructura, como el grado de influencia, su manifestación, el material de los elementos portantes o los retos estructurales que presentan. Este análisis permite **extraer conclusiones e identificar tendencias sobre el papel que desempeñan las estructuras en la arquitectura actual** y si se integran o no en la concepción arquitectónica como **herramienta creativa**, más allá de sus funciones técnicas.

En una segunda fase, se seleccionan tres casos de estudio (The Leadenhall Building, Centre Pompidou y Mossbourne Community Academy) para profundizar en las implicaciones de las decisiones estructurales. Para cada uno de ellos se plantea un **escenario alternativo en el que se construyen con un material distinto** al original. Tras un análisis de las condiciones arquitectónicas iniciales y la solución estructural adoptada, se llevan a cabo unos cálculos basados en el material y en la normativa del país del proyecto que permitan establecer la viabilidad técnica y constructiva de la nueva propuesta. Se estudian también aspectos como la fabricación, el transporte, las uniones o la protección contra el fuego. Todas estas variables se sintetizan en una **comparación que permita evaluar cuál sería la influencia** de esta hipotética solución estructural **en la percepción espacial del proyecto**.

Este trabajo combina una aproximación técnica, pero también visual y conceptual, que invita a reflexionar sobre cómo las decisiones estructurales no sólo afectan a aspectos técnicos, sino que también pueden llegar a definir la imagen y la identidad de la arquitectura.

Palabras clave: estructura - arquitectura - influencia - material - decisiones - comparación

ABSTRACT

This research explores the interaction between structure and architecture, highlighting the **influence that structural decisions have on architectural projects**. The study starts setting a theoretical basis on the relationship between structure and architecture, focusing on two fundamental aspects: the degree of influence (the extent to which the structure is part of the design process), and the manifestation (the visual and spatial relevance that structures acquire in the final project).

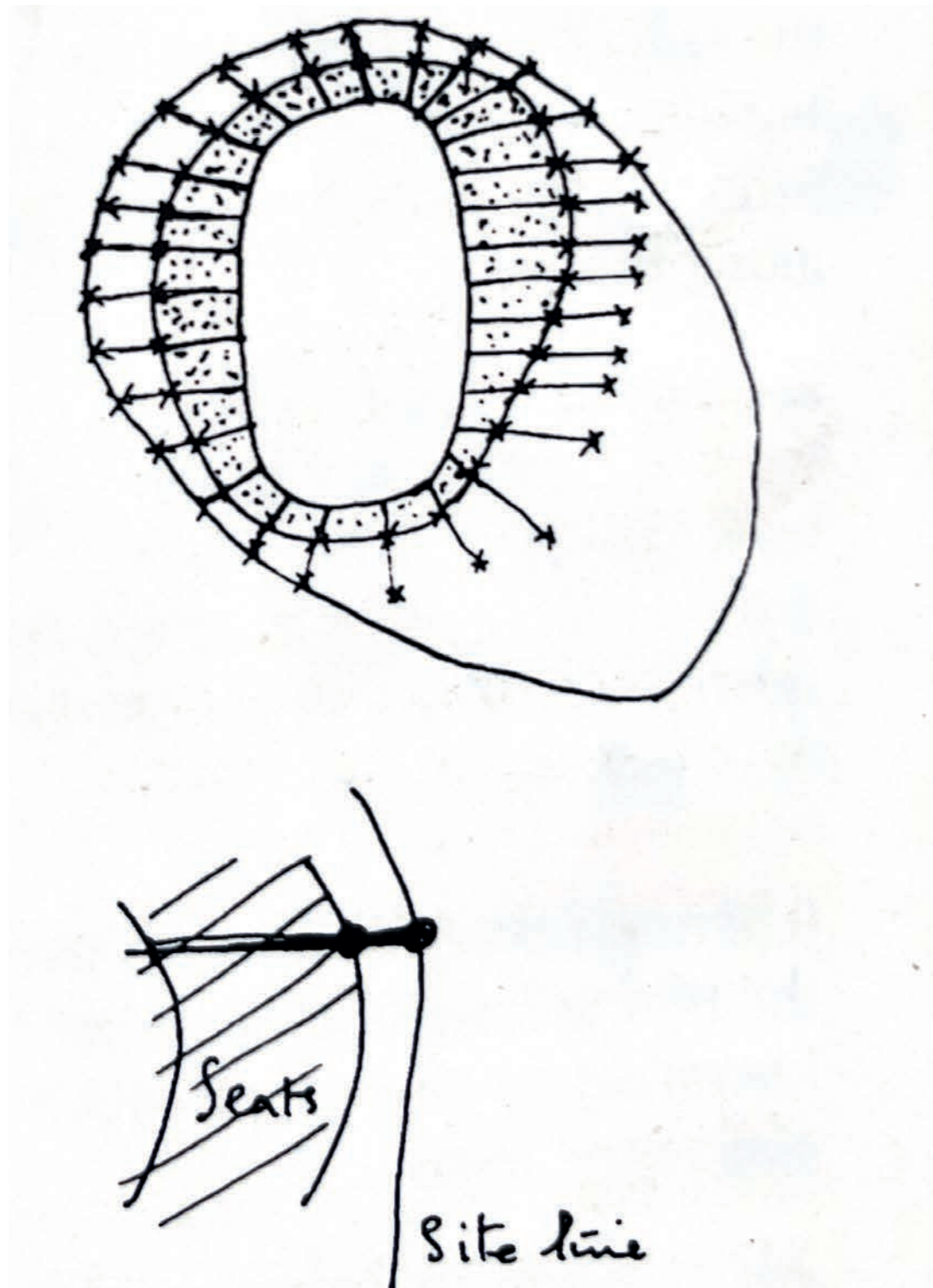
On this basis, 48 recent projects by renowned architects are examined, analyzing structure-related parameters such as the degree of influence, their manifestation, the material of the load-bearing elements or the structural challenges they present. This analysis allows conclusions to be drawn and trends to be identified on the **role played by structures in architecture today** and whether or not they are integrated into the architectural conception as a **creative tool**, beyond their technical functions.

In a second phase, three case studies (The Leadenhall Building, Centre Pompidou and Mossbourne Community Academy) are selected to explore the implications of structural decisions. For each of them, an **alternative scenario is proposed in which they are built with a different material** than the original one. After an analysis of the initial architectural conditions and the structural solution adopted, calculations based on the material and the regulations of the country of the project are carried out to establish the technical and constructive feasibility of the new proposal. Aspects such as fabrication, transport, joints or fire protection are also studied. All these variables are synthesized in a comparison to **evaluate the influence of this hypothetical structural solution on the spatial perception of the project**.

This work combines a technical approach, but also a visual and conceptual one, which invites us to reflect on how structural decisions not only affect technical aspects, but can also come to define the image and identity of the architecture.

Key words: structure – architecture – influence – material – decisions – comparison

Figura 2. Esquema de la resolución de la cubierta del Chemnitz Stadium, Adaptado de "a + u: Cecil Balmond", por N. Yoshida, 2020, *Architecture and Urbanism Magazine*.



MOTIVACIÓN

El interés por el desarrollo de este tema nace, primeramente, de una atracción personal por el diseño estructural, haciendo especial hincapié en la palabra "diseño" (que no en la palabra "cálculo"). Siempre me ha parecido fascinante, desde antes de comenzar mis estudios del grado, cómo las construcciones desafiaban las fuerzas de la naturaleza. Ya en aquel momento, me preguntaba, como diría J.E. Gordon, por qué las cosas no se caen¹.

En mi paso por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, a menudo me he encontrado con un entendimiento de las estructuras que las reduce a un problema matemático. Este enfoque, a mi parecer, es uno que se aleja mucho de la componente espacial e imaginativa de las estructuras, que podría interesar e incluso ayudar a los arquitectos en los proyectos. En el curso de Proyecto de Estructuras, gracias a mi profesor y ahora tutor de esta investigación, pude observar las estructuras desde un punto de vista diferente, siendo consciente de su gran potencial creativo. Recuperé mis primeras intuiciones, que había apartado durante la mayoría de la carrera, y mi interés por entender cómo funcionan, como interaccionan y cómo se diseñan las estructuras. Es esta perspectiva de las grandes posibilidades creativas y técnicas que ofrecen es lo que motiva la elección de este tema.

Esta investigación, además de ser una gran oportunidad para indagar en las inquietudes que me han acompañado desde hace años, espero que pueda ofrecer un acercamiento más asequible y conceptual a las estructuras para aquellos que, como yo, estamos inmersos en el proceso creativo, y vemos los problemas como una interacción de muchas partes, y no como una mera fórmula que resolver.

¹ El primer documento que leí jamás acerca de las estructuras fue un libro de J.E. Gordon llamado "Structures: Or Why Things Don't Fall Down".

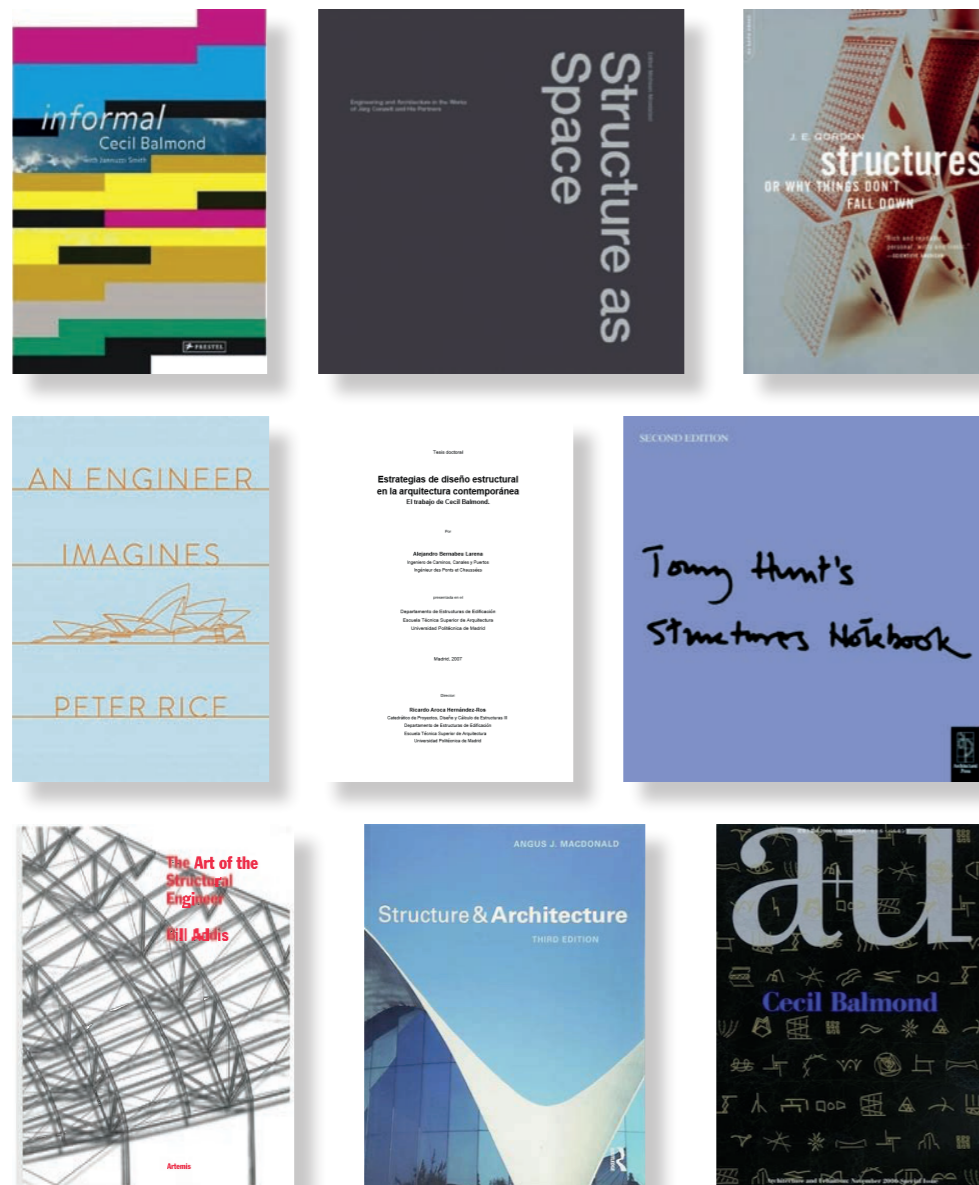


Figura 3. Principales fuentes consultadas para el desarrollo de la investigación. Elaboración propia.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

Existen numerosos manuales y formularios que abordan las estructuras desde un punto de vista del cálculo. Por supuesto, hay también una gran cantidad de escritos sobre el espacio arquitectónico, tratado desde perspectivas muy diferentes. La **interacción entre estructura y arquitectura** ha sido tratada en más de una ocasión, más por ingenieros interesados en el proceso creativo y proyectual, que por arquitectos interesados en el funcionamiento de las estructuras.

En las últimas décadas, se ha producido un acercamiento entre las profesiones de arquitecto e ingeniero², de manera que algunos aspectos de cada oficio han empezado a entrelazarse. Entre ellos, se encuentra el diseño de las estructuras. En este contexto de la colaboración estructurista-arquitecto, resultan especialmente interesantes las aportaciones de Cecil Balmond³, Jürg Conzett⁴ o Peter Rice⁵, todos ingenieros. Por el lado de la arquitectura, y aunque no haya sido recogido de una manera teórica explícita, han mostrado gran interés por la integración de las estructuras en sus proyectos nombres como Peter Zumthor, Christian Kerez o Rem Koolhaas.

Aunque existen publicaciones que recogen distintas soluciones estructurales que se han aplicado a proyectos muy diferentes, normalmente consisten en recopilaciones que, si bien sirven como ejemplo del gran potencial creativo de las estructuras, **no ofrecen una comparación de lo que significa tomar una u otra decisión**. Quizá el documento que más se ha acercado a este aspecto de "las posibilidades y las decisiones" ha sido la tesis doctoral de Alejandro Bernabeu Larena, ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dicha tesis fue titulada como "Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea", y fue presentada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid en el año 2007. Establece, entre otras muchas cosas, una base teórica del grado de interacción entre estructuras y arquitectura según el nivel de importancia de una u otra. Aún así, no trata el aspecto que este trabajo pretende aportar.

Por lo tanto, la investigación se centrará en aplicar las ideas de los documentos anteriores, de una manera metódica, práctica y visual, comparando los resultados estructurales y arquitectónicos a los que conducen distintas soluciones.

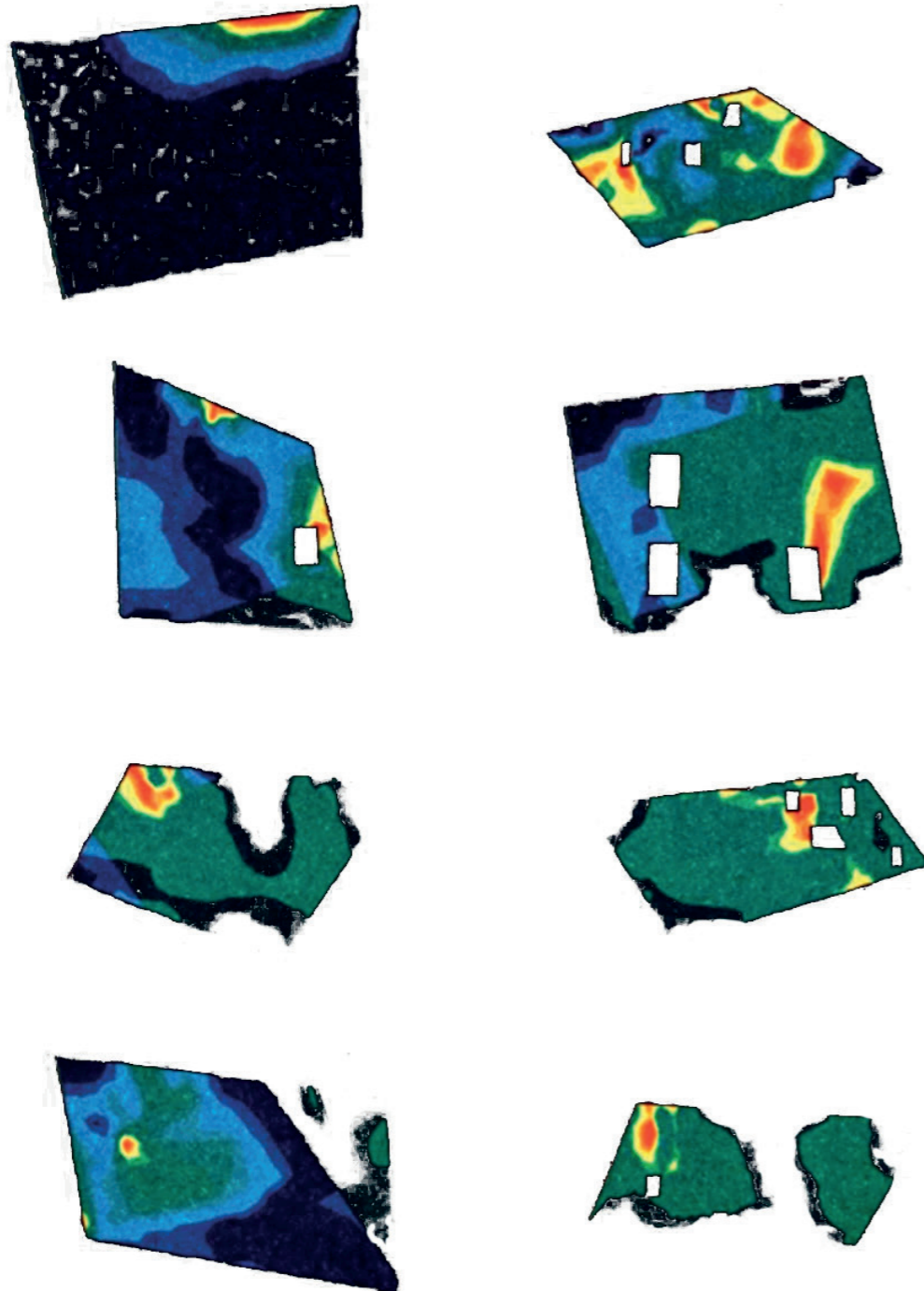
.....
2 A este respecto, consultar la tesis doctoral "Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea" de Alejandro Bernabeu Larena.

3 Cecil Balmond habla de nuevas estrategias de diseño estructural en su libro "Informal".

4 Trata este tema en su libro "Structure as space".

5 "An engineer imagines" de Peter Rice trata su enfoque hacia la colaboración entre ingenieros y arquitectos en algunos de los proyectos más desafiantes del siglo XX.

Figura 4. Imagen del proyecto V&A Spiral de Daniel Libeskind, en colaboración con Cecil Balmond. Adaptado de "a + u Cecil Balmond", por N. Yoshida, *Architecture and Urbanism Magazine*.



OBJETIVOS

Esta investigación tiene como propósito explorar y analizar la relación entre estructura y arquitectura, destacando su influencia en la concepción y materialización de proyectos arquitectónicos actuales. Se plantean, por lo tanto, dos objetivos principales:

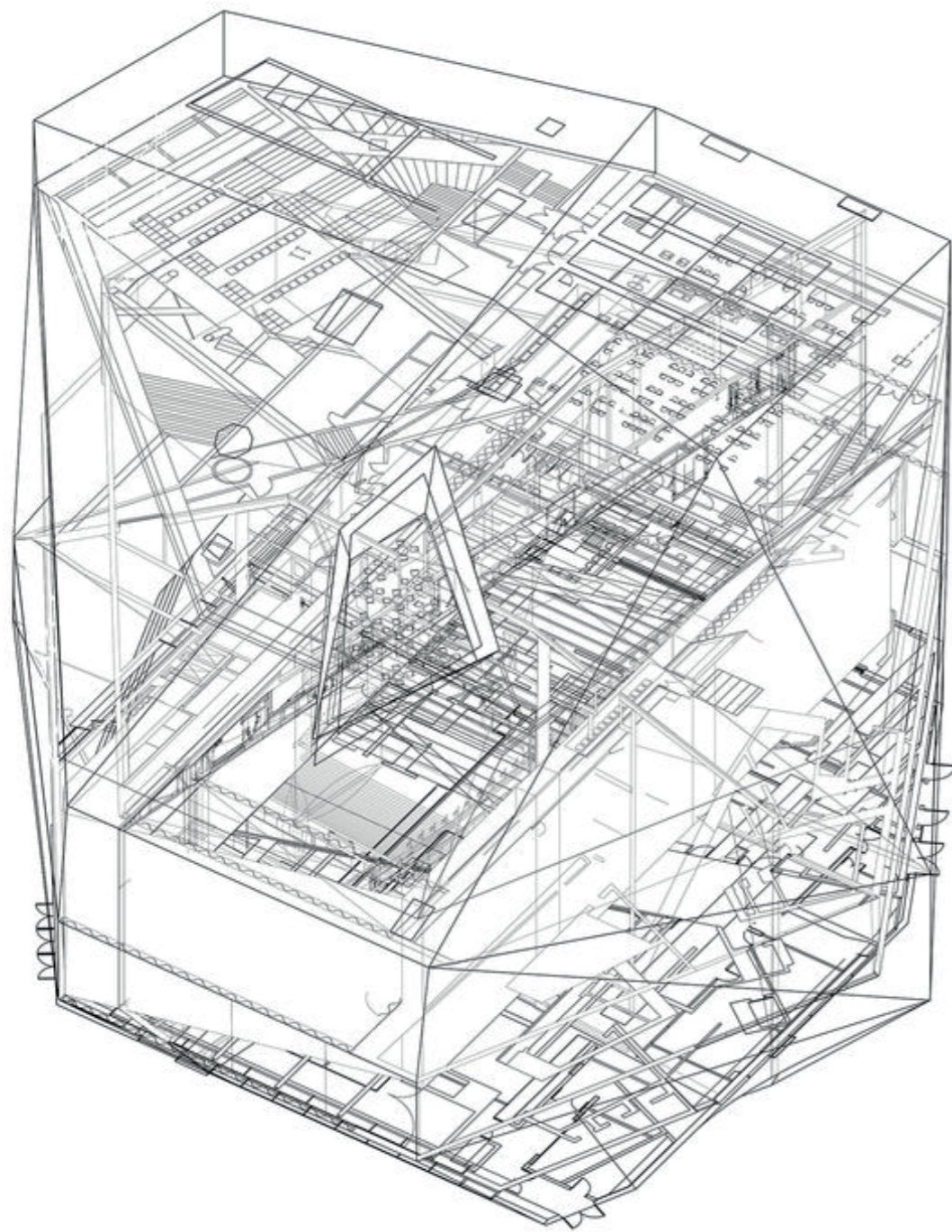
El primero consiste en establecer **qué papel juegan las estructuras en la arquitectura contemporánea**, identificando si su propósito está visto hoy en día por los arquitectos como algo puramente resistente, o si están siendo integradas como una herramienta proyectual. En este proceso, se incluyen aspectos como el avance de la tecnología, que ha ampliado enormemente las posibilidades formales, o la situación de emergencia climática, en la que se espera un cambio hacia materiales más sostenibles.

Aunque se han desarrollado publicaciones, libros y manifiestos sobre los procesos que condujeron a soluciones estructurales muy famosas⁶, éstos se han mostrado de una manera especializada, aplicable sólo al proyecto en cuestión, y sin ser comparados con otras soluciones que se podrían haber tomado. Por lo tanto, el segundo objetivo principal de este trabajo es aportar esa **parte de comparación de los posibles caminos y sus resultados que otras fuentes no tratan**. Para ello, se evalúa como habrían sido tres proyectos si su estructura se hubiera construido con otro material. Este análisis no solo considera la viabilidad técnica, sino que pretende aportar una **nueva perspectiva acerca del impacto de las estructuras en la percepción, la imagen y la identidad de los proyectos**.

Pretende, en última instancia, ser una muestra que nos ayude a los arquitectos a entender la interacción entre estructura y arquitectura, y averiguar si cierto entendimiento estructural nos puede ayudar a tener más herramientas para tener un **mayor control sobre las decisiones proyectuales**.

⁶ Ver, por ejemplo, la revista japonesa a+u (Architecture and Urbanism Magazine) en su número especial acerca de Cecil Balmond.

Figura 5. Casa da Musica, de OMA. Adaptado de *XRay* [Dibujo], por Sehr Yaqoob, 2015.



METODOLOGÍA

La investigación comienza por consultar fuentes bibliográficas que hayan tratado la interacción entre estructura y arquitectura de una manera teórica y/o práctica. Con esto se pretende establecer una conceptual sólida que permita entender qué condiciones deben cumplir las estructuras, cómo influyen en el espacio arquitectónico y qué papel juegan en el proceso de diseño.

Una vez establecida esa base teórica, el resto de la investigación se desarrollará de una manera práctica, siguiendo los siguientes pasos:

1. Seleccionar: se eligen tres casos de estudio de un mismo arquitecto, con la condición de que tenga un amplio repertorio de proyectos construidos y de que su arquitectura no esté limitada a un solo concepto o material.

2. Comprender: se analizará el funcionamiento de los casos elegidos y el enfoque de su solución estructural para la resolución de los retos que se presentaban.

3. Imaginar:

3.1. Focalizar: el material elegido para la solución alternativa se basa en las condiciones iniciales del proyecto (parcela, plazos, transporte, etc.) y en las características que éste debía tener (planta diáfana, aspecto de ligereza, etc.).

3.2. Extrapolar: consiste, básicamente, en imaginar de una manera técnica, teniendo en cuenta las características de los materiales, cómo sería el resultado estructural y arquitectónico sin variar el sistema estructural. Es decir, manteniendo todos los elementos en su posición original, ¿empezarían estructura y arquitectura a ser incompatibles?

4. Comparar: las iteraciones anteriores se compararán para extraer conclusiones acerca de los distintos retos estructurales, sus soluciones o incluso los propios materiales, que sirvan como muestra a la hora de incluir la componente estructural en nuestros proyectos.

5. Interpretar: aunque las soluciones fueran viables técnica y constructivamente, este último paso evalúa cuál sería el impacto de cambiar la solución estructural en la estética y la percepción del proyecto.

ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA Y VICEVERSA

"Y, aunque son disciplinas que tienen entidad propia y podemos considerar diferentes, no nos vendría nada mal que [...] los arquitectos tratáramos de ser un poco ingenieros y los ingenieros un poco arquitectos." (Nárdiz Ortiz, 2017)

"Muchas veces surge la pregunta: ¿quién diseñó ese edificio? La respuesta normalmente es: un arquitecto. Casi siempre, la verdad es que fue un equipo de arquitecto e ingenieros" (Addis, 2001)

01

1.1. Convergencia entre ingeniería y arquitectura

Si bien en el pasado la arquitectura estaba limitada por condicionantes técnicos o constructivos, el desarrollo de nuevos materiales y tecnología computacional ha conseguido que, estructuralmente hablando, casi cualquier proyecto pueda ser resuelto y construido⁷. Esto ha afectado indudablemente a la relación entre arquitectos e ingenieros estructurales, produciéndose una convergencia y una colaboración entre ambas profesiones. Con esa colaboración ha llegado también una "reivindicación por parte de los ingenieros del reconocimiento de su labor creativa en los proyectos" (Bernabeu, 2007) y una atribución de competencia a los arquitectos en cuestiones técnicas.

Como bien explica Charles Jencks en el prólogo del libro *Informal*, la organización predominante en los procesos de ideación, resolución y construcción de la arquitectura ya no es tanto una jerarquía tradicional, sino una organización en red: una red de colaboración. Califica a este proceso (que ya tenía mucha influencia cuando el libro fue publicado hace más de 20 años) de una "vanguardia creativa que está moviendo la arquitectura", afirmando que "los arquitectos se vuelven escultores, los ingenieros se vuelven diseñadores, los artistas se convierten en arquitectos, y todas las descripciones de estos trabajos se vuelven borrosas" (Balmond, 2002).

Esa colaboración de arquitectos e ingenieros estructurales de la que habla Jencks se ha traducido en algunas de las obras arquitectónicas más impresionantes de la arquitectura contemporánea, como la Torre CCTV de OMA, la Filarmónica de Hamburgo de Herzog & de Meuron, el Swiss Sound Pavillion de Peter Zumthor o la Sede HSBC de Norman Foster. De hecho, Balmond le dedica su libro a los arquitectos con los que ha colaborado, diciendo que:

Sin los arquitectos y sus inventivas, que propiciaron el diálogo desde el principio, no habría libro. [...] Ellos fomentaron el diálogo abierto entre ingeniería y arquitectura, y su estimulante colaboración fue el suelo fértil sobre el que Informal echó raíces. (Balmond, 2002)

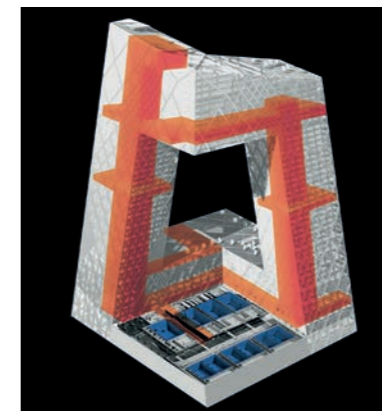


Figura 6. Esquema de la CCTV Tower de OMA. Adaptado de CCTV [Dibujo], por OMA, 2003.



Figura 7. Maqueta de V&A Spiral de Libeskind. Adaptado de V&A Spiral Extension [Fotografía], por Balmond Studio, 1996.

⁷ Consultar el capítulo "2.1. La aparición de nuevos materiales como factor fundamental en el desarrollo de nuevas formas" de la tesis consultar la tesis doctoral "Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea" de Alejandro Bernabeu Larena.

Muchos atribuyen a Ove Arup, fundador de Ove Arup and Partners, el comienzo de una nueva relación entre ambas profesiones⁸. Siendo una de las oficinas de ingeniería más importantes del mundo, se dio a conocer gracias al proyecto de la Ópera de Sydney de Jørn Utzon. El mismo Arup decía que "la ingeniería no es una ciencia. [...] está más relacionada con el arte y la creación [...]. Es una actividad creativa, que requiere imaginación, intuición y decisión." (Arup, 1985)⁹

Otros autores, como Peter Rice, han dicho que "la labor del arquitecto es fundamentalmente creativa", mientras que la de los ingenieros es "fundamentalmente inventiva" (Rice, 1998). La diferencia, para él, está en que los ingenieros buscan convertir los problemas en otros con parámetros impersonales, cosa que no hacen los arquitectos, por estar movidos por cuestiones personales.

Parece, sin embargo, que los grandes nombres que han abordado este tema reducen a los arquitectos a meros creativos, sin atribuirles ningún conocimiento técnico. Esto probablemente venga del hecho de que en muchos países los estudios de arquitectura se restringen al ámbito del diseño, siendo España una clara y reconocida excepción a esta tendencia¹⁰.

Entonces, si según Arup la ingeniería es una actividad creativa, y según Rice los arquitectos son fundamentalmente creativos, ¿son ambas profesiones tan distintas como para estar claramente diferenciadas? Como diría Rice con sus propias palabras: "[yo] creo que no" (Rice, 1998). Indudablemente, son trabajos distintos y complementarios, pero parecen tener mucho más en común de lo que la concepción tradicional de ambas figuras nos dice, y más ahora que muchas más escuelas de arquitectura incluyen formación técnica en su currículum.

A pesar de que la tendencia de la colaboración es la que parece prevalecer en los proyectos contemporáneos, no es pequeño el número de ingenieros que prefieren ser calculistas (papel que Bernabeu definió en 2007 como "asistente [del arquitecto], de gran cualificación e importancia, pero asistente"), ni la cantidad de arquitectos que prefieren ser diseñadores, delegando en otros la resolución de las estructuras, las instalaciones o la construcción. Siendo válido y de gran complejidad, este enfoque resulta menos atractivo en cuanto a innovación y creatividad se refiere. Para que la sinergia resulte interesante y fructífera, debe producirse desde el principio del desarrollo del proyecto, ya no solo entre estructura y arquitectura, sino entre todas las disciplinas (instalaciones, acústica, iluminación...).

8 Entre ellos el propio Balmond, que desarrolló sus primeros años profesionales en esta oficina, Charles Jencks, o Alejandro Bernabeu.

9 La frase original es del propio Ove Arup, en un escrito que publicó en 1968 bajo el nombre de "The world of the structural engineer", republicado en The Arup Journal en 1985.

10 También son una excepción la TU Delft, en Países Bajos, la ETH de Zurich, o el Politécnico de Milano.

Figura 8. Peter Rice con Renzo Piano y otros colaboradores. Adaptado de "Anthony Hunt is the high-tech architect's engineer", por J. Atsbury, 2019, *Dezeen*.



1.2. El proceso de diseño

En general, para un mismo proyecto, no existe una sola solución estructural correcta. Ove Arup dijo que "siempre hay muchas soluciones posibles; la búsqueda intenta encontrar la mejor – pero no existe una mejor, sólo algunas más o menos buenas" (Addis, 1994) Esta afirmación subraya cómo las decisiones deben equilibrar varios factores constructivos, económicos, o medioambientales, siendo la condición principal la compatibilidad con la arquitectura.

La posibilidad de construir casi cualquier planteamiento formal ha hecho que muchos arquitectos tomen la postura de ignorarla completamente. Esta ignorancia es válida en cuanto a generar arquitectura se refiere, pero se corre el riesgo de que el proyecto acabe tomando una forma completamente diferente a la idea original. Diseñar unos enormes voladizos sin dejar ninguna reserva geométrica para sostenerlos, o pretender sujetar varios pisos con pilares de enorme esbeltez resultará, además de en una enorme frustración para el arquitecto, en soluciones estructurales aceleradas y costosas, que tienen muchas más posibilidades de encontrar conflicto con el resto de aspectos del proyecto.

Bernabeu (2007) considera que el espacio difícilmente puede mantenerse ajeno o indiferente a la presencia de la estructura y que "si se concibe la estructura como un elemento activo de la definición del proyecto, los requisitos estructurales dejan de ser condicionantes molestos [...] y pasan a ser oportunidades. Esta perspectiva resalta la importancia de integrar la estructura desde las etapas iniciales del proyecto, no solo por una cuestión técnica, sino también por su potencial estético y conceptual.

Dicho esto, es cierto que hay proyectos relativamente sencillos en los que la ausencia

de retos estructurales permiten que el esqueleto resistente sea algo que se resuelva a posteriori y no influya en las ideas principales del proyecto. No significa que en todos los proyectos sencillos la estructura sea "irrelevante", ni que en todos los proyectos complejos juegue un papel absolutamente crucial. Por ejemplo, las conocidas cáscaras de Félix Candela encierran espacios sencillos pero majestuosos generados gracias a la estructura, y otros edificios que parecen complejos, como el Heydar Aliyev Cultural Centre de Zaha Hadid, esconden cáscaras resistentes que se limitan a adaptarse a las formas cambiantes y futuristas del proyecto final, pero que no tienen ninguna influencia en las decisiones tomadas en el diseño.

En definitiva, la importancia de las estructuras en el proceso de diseño es variable según el contexto del proyecto. Si bien hay ocasiones en las que la estructura puede ser tratada como un aspecto secundario, considerarla como parte del diseño puede enriquecer el proyecto y, desde luego, minimizar los conflictos en la parte de definición de los detalles. La clave está en encontrar el equilibrio entre las ideas arquitectónicas y las posibilidades estructurales, entendiendo que ambas disciplinas pueden complementarse en la búsqueda de la buena arquitectura.

Figura 9. Chapel Palmira de Félix Candela. Adaptado de "Las conchas de hormigón de Félix Candela: una arquitectura diseñada para México y Chicago", por P. Cuesta, 2018, *Metalocus*.



POSIBLES RELACIONES ENTRE ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA

He tenido la suerte de no tener que dedicarme profesionalmente a calcular estructuras para vivir; he hecho las de mis proyectos y, en ocasiones, las de algunos amigos y en todos los casos estaba presente el cómo empezar, no como una imposición de algo ya decidido, sino como un elemento más a tener en cuenta desde la concepción del proyecto. (Aroca, 2024)

02

2.1. Grado de influencia de la estructura en el proyecto

La interacción entre estructura y arquitectura puede ir desde su completa influencia en la forma arquitectónica (lo que el ingeniero Angus J. Macdonald (2001) define como "estructura generadora de la forma") hasta la ignorancia completa de la estructura ("estructura ignorada"). El grado de influencia tiene que ver con las herramientas y el protagonismo de unos u otros conceptos en el proceso de ideación de los proyectos. Para poder entender cómo influye en nuestros proyectos y poder tomar una decisión consciente al respecto, se propone la siguiente clasificación, basada en la de MacDonald y en la extrapolación que Bernabeu (2007) hace de ella en su tesis doctoral:

- **Estructura arquitectónica.** El espacio arquitectónico se genera enteramente, o casi en su totalidad, por la estructura. Es lo que Jürg Conzett denomina "structure as space", concepto al que le dedica su libro con el mismo título.
- **Estructura determinante.** Se da en aquellos casos en los que los requerimientos estructurales, bien por los retos que presenta, o bien por el sistema estructural escogido, son tales que definen la forma del edificio. El diseño de los espacios está supeditado a los requisitos estructurales, y su influencia es tal que define y limita gran parte de la arquitectura. Aunque el ejemplo más claro son los grandes rascacielos, se puede dar en otros casos; por ejemplo, un edificio cuya estructura sean muros de carga está muy limitado en cuanto a dimensiones y formas por las propias características del sistema estructural.
- **Estructura colaboradora.** Arquitectura y estructura se encuentran en un punto medio en el que confluyen ambos intereses. Ninguna de las dos predomina en la definición del proyecto y, a la vez, las dos ceden para dar paso a la otra.
- **Estructura ornamentada.** Se da en el caso de que los elementos estructurales se "adornan" para que tengan más atractivo visual, sin que eso aporte nada estructuralmente hablando. Muchas veces vienen acompañado de una estructura complicada innecesariamente para dotarlas de un cierto aspecto, como ocurre en las arquitecturas "high-tech".
- **Estructura ignorada.** La estructura solo sirve como soporte que se resuelve posteriormente al diseño del proyecto, desempeñando sólo una función resistente.

Es importante destacar que, a la hora de generar arquitectura, cualquiera de estos enfoques es válido. En el caso de la estructura arquitectónica, arquitecto e ingeniero tendrían un trabajo bastante parecido, por ser la estructura arquitectura, y la arquitectura estructura. En el otro "extremo", la estructura ignorada no significa que no deba existir una colaboración entre ambos profesionales. La debe haber, pues la estructura debe servir como soporte resistente para las ideas arquitectónicas y, en muchos casos, hacer

que esto suceda requiere de una solución compleja y habilidosa. La diferencia está, sin embargo, en cuándo se da esa colaboración: bien desde el principio (estructura arquitectónica) – Addis (2001) diría que casi siempre los edificios los diseñan arquitectos e ingenieros, y no hace distinciones en este aspecto–, o bien al final (estructura ignorada), lo que conlleva que cada uno "ceda" en su labor para ir amoldando las piezas.

Como se ha dicho anteriormente, para proyectos de edificación comunes es más probable que el grado de influencia de la estructura sea ignorada o colaborante, por no tener retos estructurales que puedan afectar demasiado a la arquitectura, y poderse resolver con soluciones más que conocidas y estudiadas. En otros proyectos, sobre todo los que tienen grandes luces, gran altura, encuentros de volúmenes poco comunes, o un requisito especial de ligereza, entre otros retos, el grado de influencia será inevitablemente mayor.

En este sentido, para poder entender cómo afectará la estructura en el proyecto, es vital tener en cuenta el factor referente a la escala. Por un lado, intentar resolver problemas estructurales de gran envergadura con configuraciones comunes resultará en que el requisito básico de resistencia no se cumpla. Por otro, aplicar soluciones demasiado elaboradas en proyectos de pequeña o media escala hará que todo se complique sin necesidad, quedando elementos desproporcionados para la función que desempeñan. En el punto medio está la virtud.

La clave consiste en saber cuáles son los conceptos generadores de la arquitectura, entender lo suficiente como para poder elegir cómo integrar la parte resistente, y no estar forzados a delegar en otros por desconocimiento, ya que puede afectar negativamente al proyecto.

1.3. Manifestación de la estructura en el proyecto

Un concepto diferente, aunque ligado, al grado de influencia de la estructura es su manifestación visual en el proyecto. Por ejemplo, la influencia en un gran rascacielos será determinante por el reto que supone la altura, pero la estructura puede ocultarse completamente. Mientras que el grado de influencia tiene que ver con las herramientas que se utilizan para generar el proyecto, la manifestación sólo es una medida de su expresión visual, conceptos que normalmente se confunden. No están necesariamente relacionadas, excepto en un caso: el de la estructura arquitectónica, cuya manifestación es siempre generadora. Si el proyecto de arquitectura es únicamente estructura, está claro que ésta es la generadora del espacio.

Se establecen, entonces, las siguientes manifestaciones visuales de la estructura en el proyecto:

- **Oculto:** no existe ninguna demostración ni exhibición de la estructura en el proyecto. De no ver los planos, sería prácticamente imposible asegurar cómo es el sistema estructural.
- **Aceptada:** no se hace un esfuerzo por ocultarla, pero no tiene ninguna relevancia en el espacio arquitectónico, queda relegada a un segundo o tercer plano. Puede estar vista en algunas zonas y en otras no.
- **Integrada:** no genera el espacio arquitectónico de por sí, pero tiene cierta presencia que contribuye a crearlo.
- **Participante:** la estructura es una de las herramientas utilizadas para generar el espacio, aunque convive con otras, como pueden ser la expresión de los materiales de los acabados, las dimensiones de los espacios, etc.
- **Generadora:** la estructura es la que define el espacio arquitectónico.



Figura 10. Casa 1736 de H Arquitectes. Adaptado de Casa 1736 [Fotografía], por H Arquitectes, 2017.



Influencia **DETERMINANTE**

Este proyecto de H Arquitectes reutilizaba el material de la demolición del edificio existente en el solar para fabricar los muros de carga que sustentarían el nuevo proyecto. Además, los forjados se eligieron de CLT, por lo que las dimensiones del edificio quedaban algo limitadas por el sistema estructural. Era, sin embargo, una buena decisión, puesto que este edificio residencial tenía unas dimensiones pequeñas en planta y el altura. La elección de los arquitectos no sólo te integraba con la arquitectura, sino que también participaba en ella.

Figura 11. Habitatges socials 2104. Adaptado de *Habitatges Socials* [Fotografía], por H Arquitectes, 2021.



Influencia **COLABORADORA**

El proyecto Küppersmühle Museum de Herzog y de Meuron consistía en la ampliación de unos antiguos silos para albergar un museo. Si bien el programa con las salas de exposiciones era lo más importante a la hora de idear este proyecto, también lo fue el hecho de que el nuevo volumen (a la izquierda del silo) se construyera de tal manera que pareciera, como dicen los arquitectos, "que siempre había estado allí". Por eso, se da un equilibrio perfecto entre la estructura y la arquitectura, de manera que ambas se integran y se ceden espacio mutuamente, para generar un proyecto en el que todo dialoga y trabaja junto.

Figura 12. Proyecto del Küppersmühle. Adaptado de *433 MKM Museum Küppersmühle Extension* [Fotografía], por Herzog & de Meuron, 2017.



Influencia **IGNORADA**

El centro de conferencias en Shenzhen, proyecto de OMA, tiene como concepto principal tres volúmenes que forman un atrio urbano. Según los arquitectos, la forma del edificio responde a criterios urbanísticos, conectando distintas partes de la ciudad Qianhai y la bahía. En este caso, en el que las formas se han generado a partir de modelos conceptuales, la estructura será un soporte que deberá adaptarse con precisión a los conceptos fundamentales del proyecto. Los encargados fueron los consultores de ingeniería CCDI, y el edificio está aún en construcción.

Figura 13. Q i a n h a i International Financial Exchange Centre. Adaptado de *Centro de Conferencias en Shenzhen* [Fotografía], por Arquitectura Viva, 2020.

Manifestación **GENERADORA**

El espacio centra del Audrey Irma Pavillion, de OMA, se genera con una bóveda de madera, creando un espacio de reunión central. Alrededor de él se concibe el resto del edificio de forma trapezoidal, que tiene en cuenta los edificios históricos que rodean a este nuevo centro cultural. La estructura de madera es el único elemento presente en este gran vacío central, y es la encargada de transmitir la calidez y la sensación de sentirse acogido.

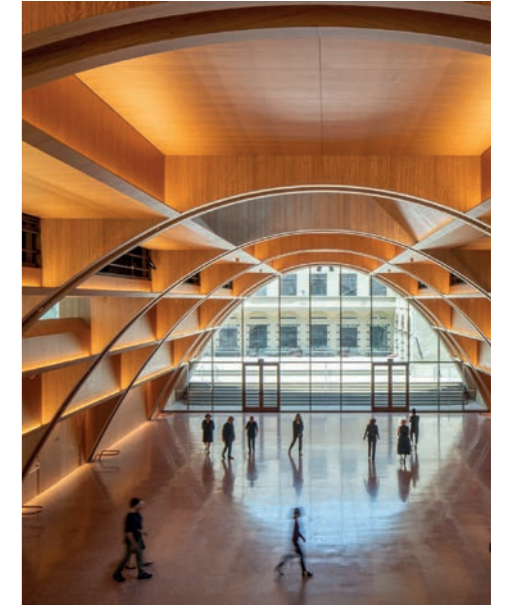


Figura 14. Audrey Irma Pavillion. Adaptado de *Audrey Irma Pavillion* OMA, por J. O Rear, 2021, Archdaily.

Manifestación **PARTICIPANTE**

Los enormes perfiles diagonales del Taipei Performing Arts Center se abren paso en el patio del edificio. Gracias a ellos y a la fachada del vidrio ondulado, los visitantes perciben en este espacio algo más que un simple patio. De una manera sencilla pero efectiva, la estructura consigue participar en el espacio y transformar su percepción.

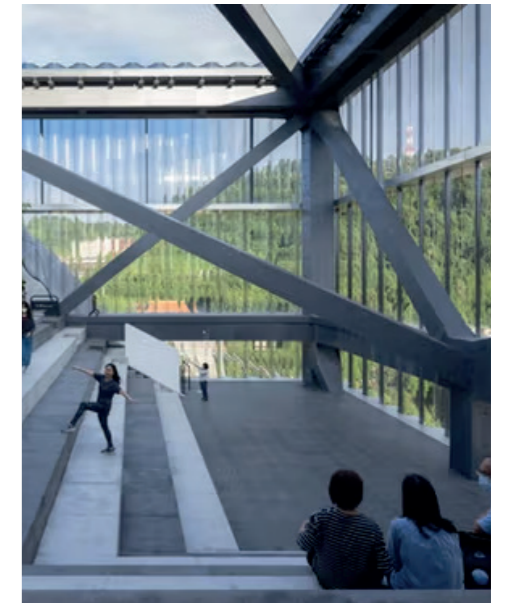


Figura 15. Patio exterior. Adaptado de *Taipei Performing Arts Center* [Fotografía], por OMA, 2022.

Manifestación **ACEPTADA**

Esta rehabilitación de la central eléctrica de Brooklyn Rapid Transit de Herzog & de Meuron utilizó los cimientos históricos de la fábrica para levantar una estructura de hormigón que albergara talleres de cerámica, textiles, etc. A pesar de que la estructura se tuvo en cuenta en el diseño del proyecto, no se le dio demasiado protagonismo en la zona nueva, cosa que sí sucedió en las salas en las que se mantuvieron las cerchas de acero originales.

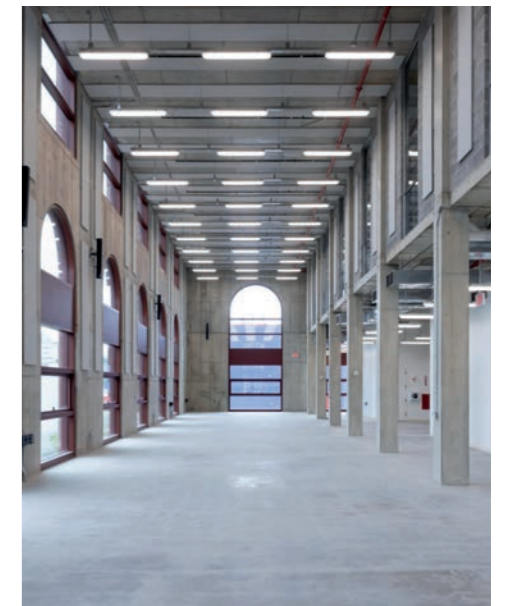


Figura 16. Talleres nuevos. Adaptado de *461 Powerhouse Arts* [Fotografía], por Herzog & de Meuron, 2023.

2.3. ¿Qué están haciendo los arquitectos?

Siguiendo los conceptos definidos en el apartado anterior, ¿qué está sucediendo en la arquitectura actual?

¿Se está produciendo gracias a la tecnología una tendencia a diseñar formas "imposibles" que se resuelven a posteriori? ¿O se está dando, gracias a la progresiva "tecnificación" de las escuelas de arquitectura y una convergencia entre las profesiones, un escenario de colaboración absoluta? En cuanto a materiales, ¿realmente se está produciendo un cambio hacia materiales más sostenibles? ¿Se están dando soluciones más eficaces que usen menos material para reducir el impacto ambiental?

Para intentar tener una idea de qué está sucediendo verdaderamente, se han recopilado los últimos 10 proyectos construidos de 5 estudios de arquitectura influyentes en el panorama arquitectónico actual, intentando que sean lo más variados posibles en cuanto a edad, nacionalidad y filosofía. Se han seleccionado estudios con reconocimiento nacional e internacional, con la premisa de que sus aproximaciones al diseño pueden influir en las nuevas generaciones de arquitectos, además de con la condición de que tuvieran el suficiente número de proyectos construidos. Estos estudios/arquitectos son Herzog & de Meuron, OMA, Estudio Herreros, H Arquitectes y Foster + Partners.

De cada proyecto se ha recopilado:

- Autor
- Ingeniero estructural
- Año
- País de construcción
- Uso principal
- Material principal de la estructura portante
- Problemática estructural principal (si la hay)
- Grado de influencia de la estructura
- Manifestación visual de la estructura

La información se ha esquematizado y relacionado de diferentes maneras:

– El diagrama de cuerdas permite ver todas las variables a la vez, adquiriendo los sectores circulares mayor tamaño según las líneas que llegan a él. Esto brinda información sobre qué predomina en cada categoría, pero no relaciona unas variables con otras (figuras 18 y 19).

– Por eso, se han esquematizado además el número de casos por cada categoría de cada variable, según el arquitecto. Esto ofrece un vistazo acerca de la "personalidad" de cada uno, viendo qué tipo de proyectos predominan en su obra desde el punto de vista estructural (figuras 20 a 23 y 25 a 28).

– Para relacionar unas variables con otras y todas sus posibles intersecciones, se realiza un diagrama de densidad (figura 24).

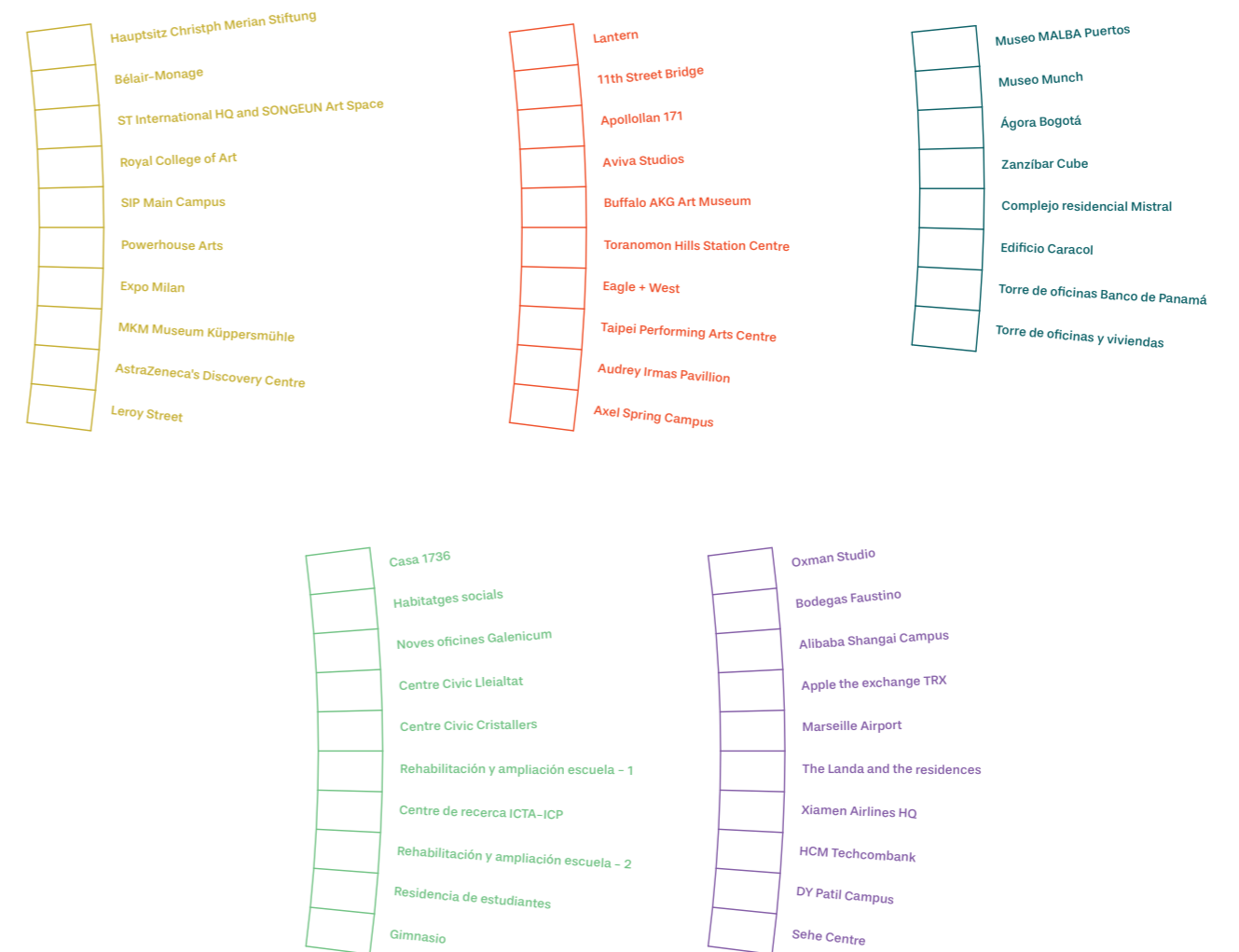


Figura 17. Recopilación de proyectos de arquitectos influyentes en el panorama actual. Elaboración propia.

GRADO DE INFLUENCIA

De acuerdo a los 48 proyectos estudiados, no existe ninguna tendencia clara a que la estructura sea una de las premisas más influyentes en el proyecto, o a considerarla una estrategia generadora del mismo.

Sí es cierto que la gran mayoría de los proyectos con estructura de categoría "determinante" lo son por ser edificios de gran altura (de los 13 proyectos con estructura determinante, 7 presentan esta problemática). Esta condición de **considerar la estructura a la hora de idear el proyecto viene más por una limitación constructiva que por una decisión consciente y voluntaria de los arquitectos de querer generar arquitectura con las estructuras.**

El porcentaje de proyectos con estructura ornamentada es de sólo un 2,1% (es decir, un solo proyecto de los 48). No parece haber, entonces, como existía había unas décadas, una predilección por los edificios "high-tech", que en muchos casos añaden elementos innecesarios estructuralmente.

MANIFESTACIÓN

Examinando los porcentajes, no hay ninguna inclinación hacia generar espacio con la estructura, pero tampoco a ocultarla. Si es cierto que la mayoría de los proyectos parece inclinarse bien hacia un lado o hacia al otro, siendo muy pocos los que dejan la estructura simplemente como "un elemento más": o se utiliza para generar espacio activamente, o se hace cierto esfuerzo por que no interfiera con el resto de elementos.

MATERIAL

En esta variable existe una clara preferencia: la del hormigón. Sorprendentemente, y para lo que se podría pensar en un panorama de emergencia climática, en el que la sostenibilidad está en boca de todos, **la construcción con madera representa un pequeño 12,5%**. Los proyectos que incorporan materiales aún más convencionales, como la fábrica o la piedra, resultan únicamente 2 de un total de 48, siendo ambos de los mismos arquitectos.

PROBLEMÁTICA

En la mayoría de proyectos, más de un 70%, existe algún tipo de reto estructural, siendo el **predominante el de la gran altura**. Quizá esto esté relacionado con una proliferación de ciudades en altura y un urbanismo que cada vez apuesta más por los núcleos urbanos densos. Los **espacios diáfanos, que requieren elementos de grandes luces** sin pilares intermedios, es el segundo reto más común, lo que podría indicar una inclinación hacia una arquitectura muy versátil, que admita muchos usos y que sea capaz de adaptarse a las necesidades futuras.

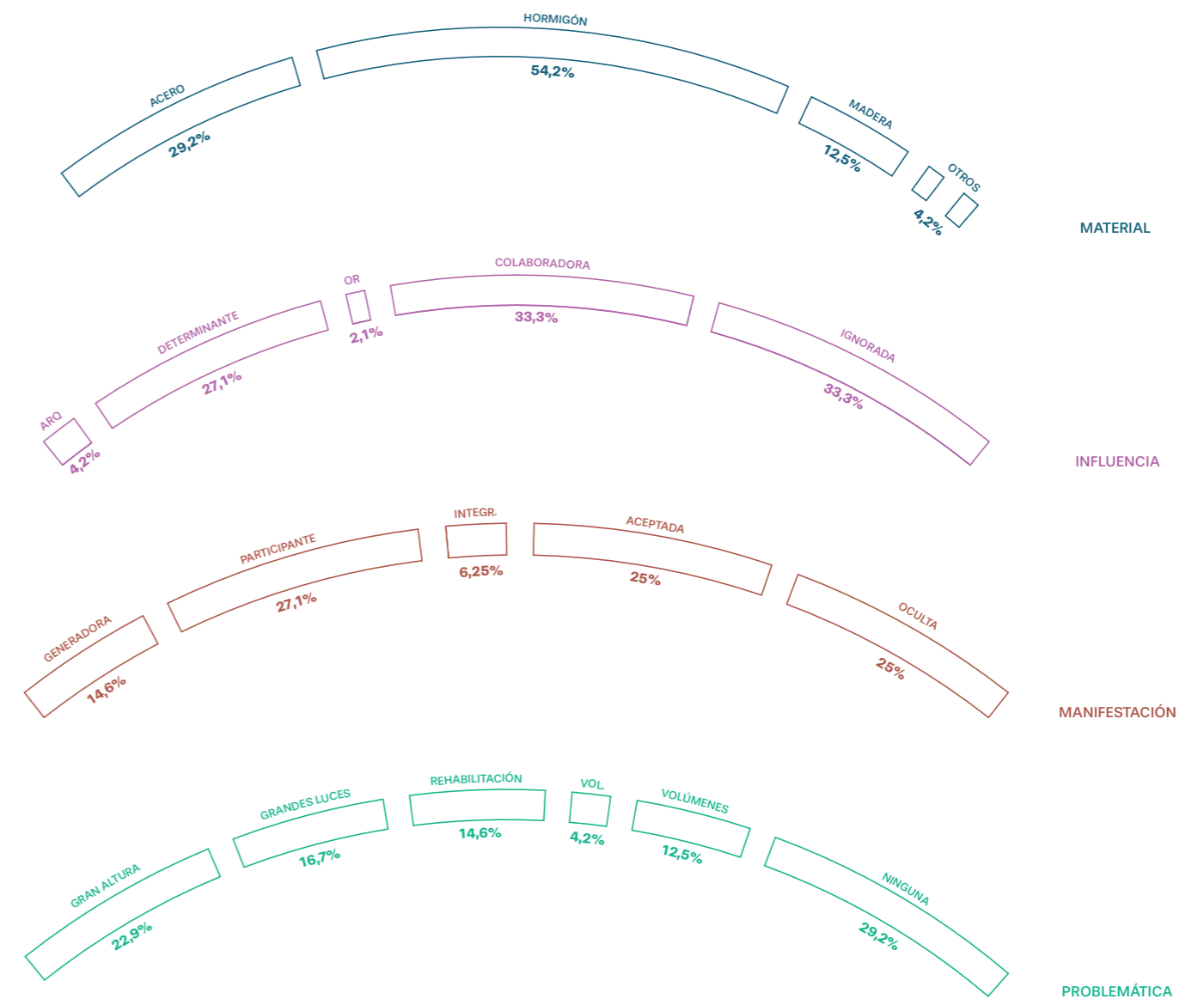


Figura 19. Porcentajes por categoría de las distintas variables. Elaboración propia.

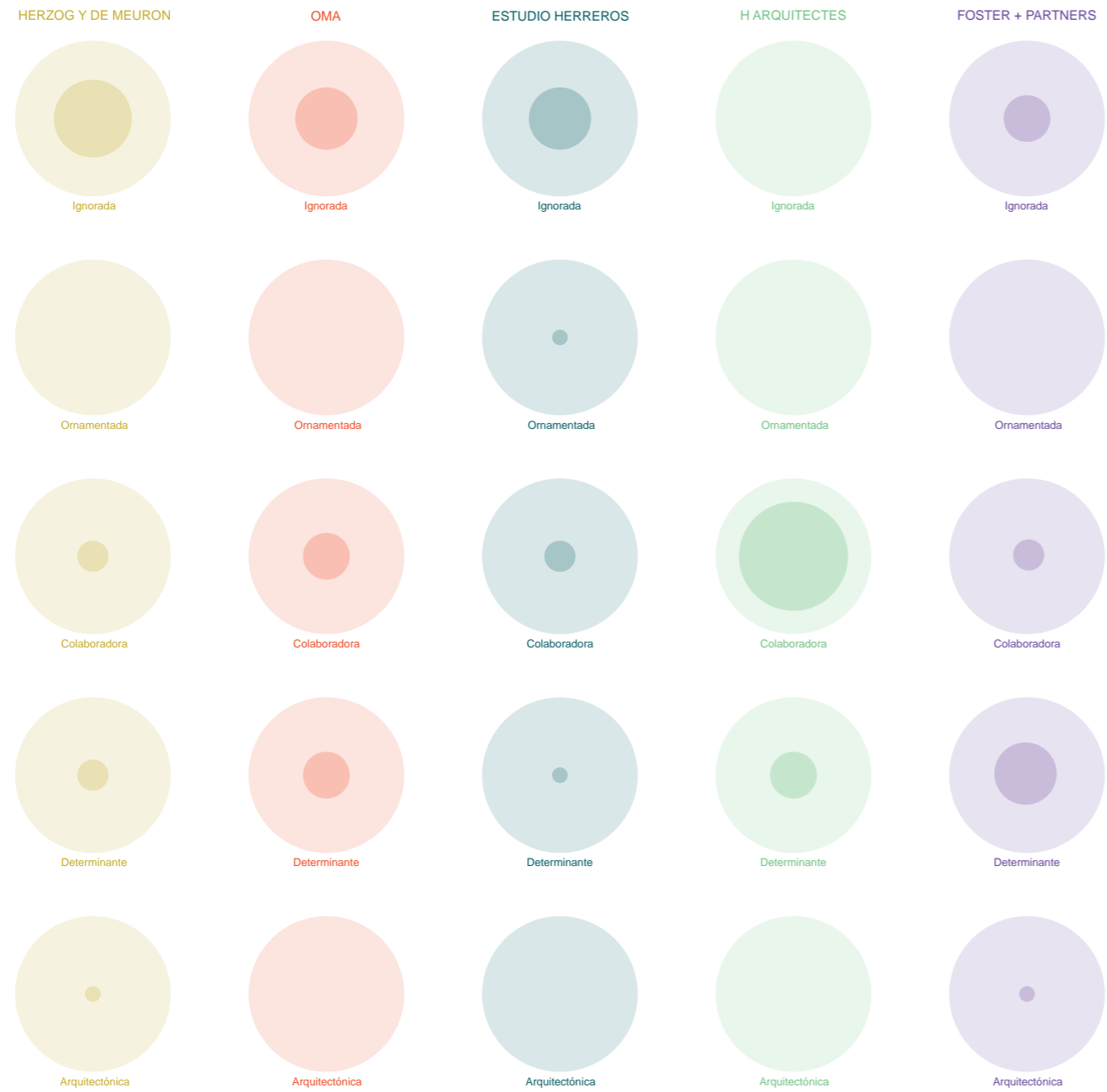


Figura 20. Número de casos por categoría y arquitecto de la variable "grado de influencia".
Elaboración propia.

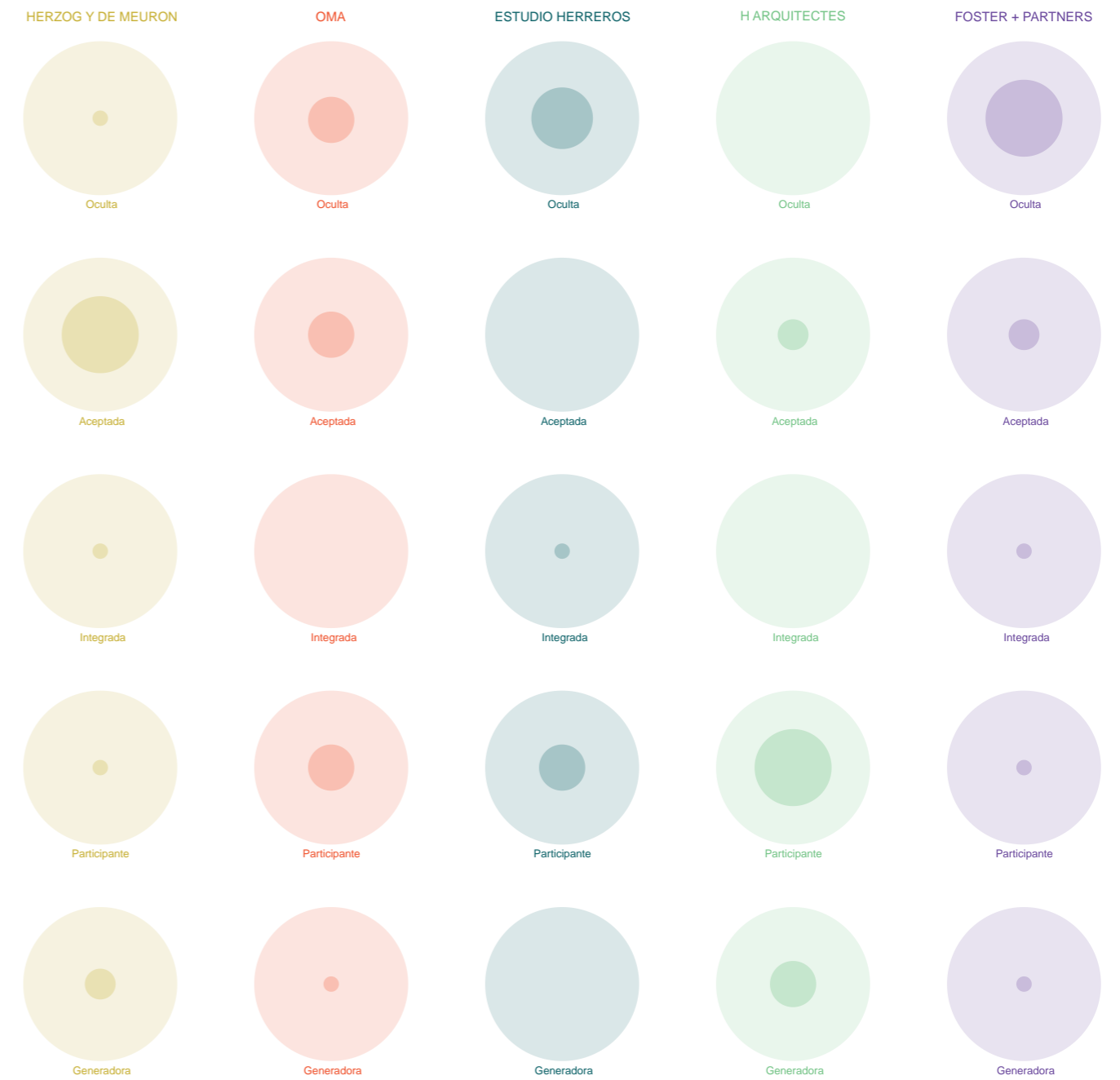


Figura 21. Número de casos por categoría y arquitecto de la variable "manifestación".
Elaboración propia.

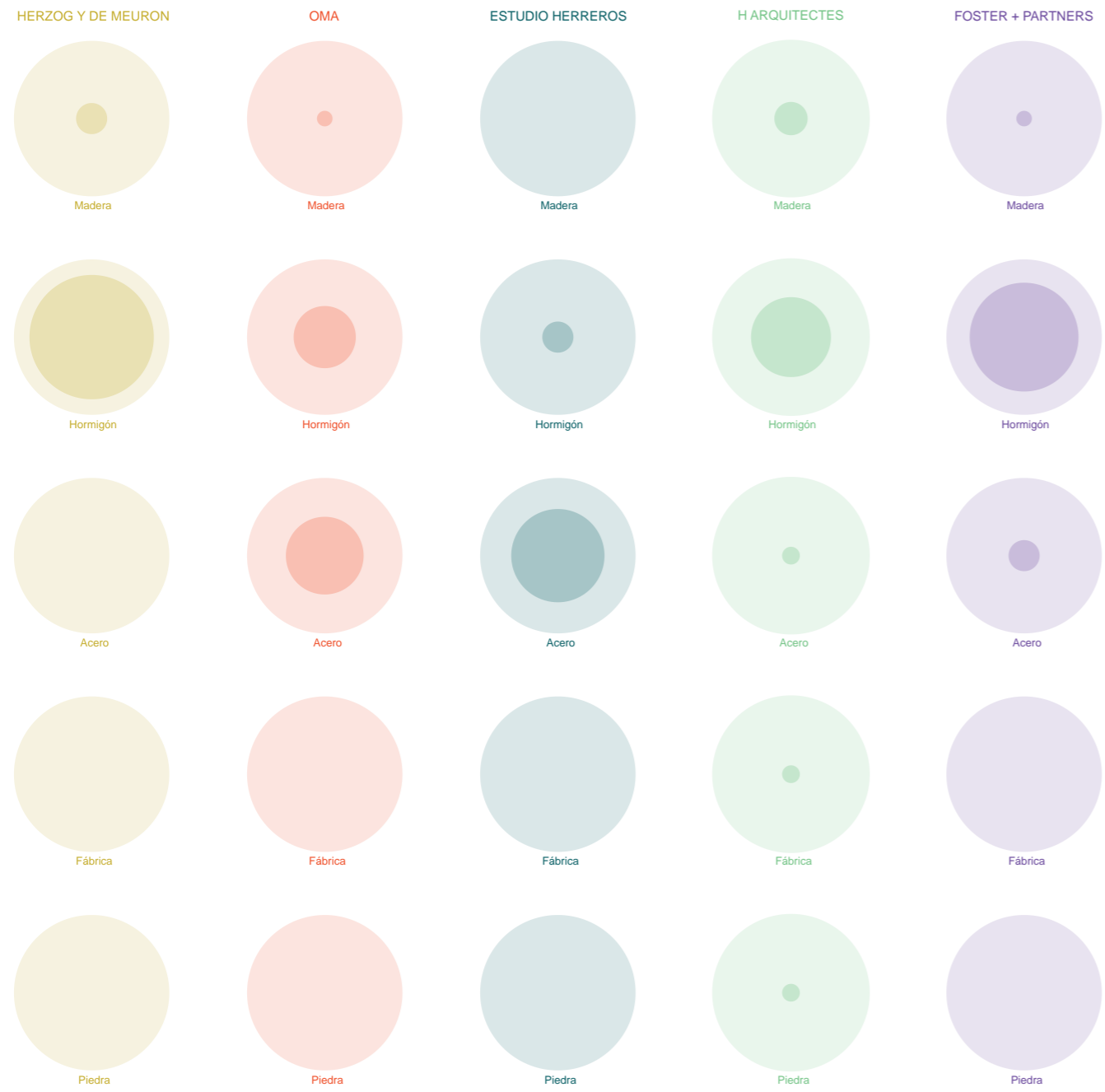


Figura 22. Número de casos por categoría y arquitecto de la variable "material". Elaboración propia.

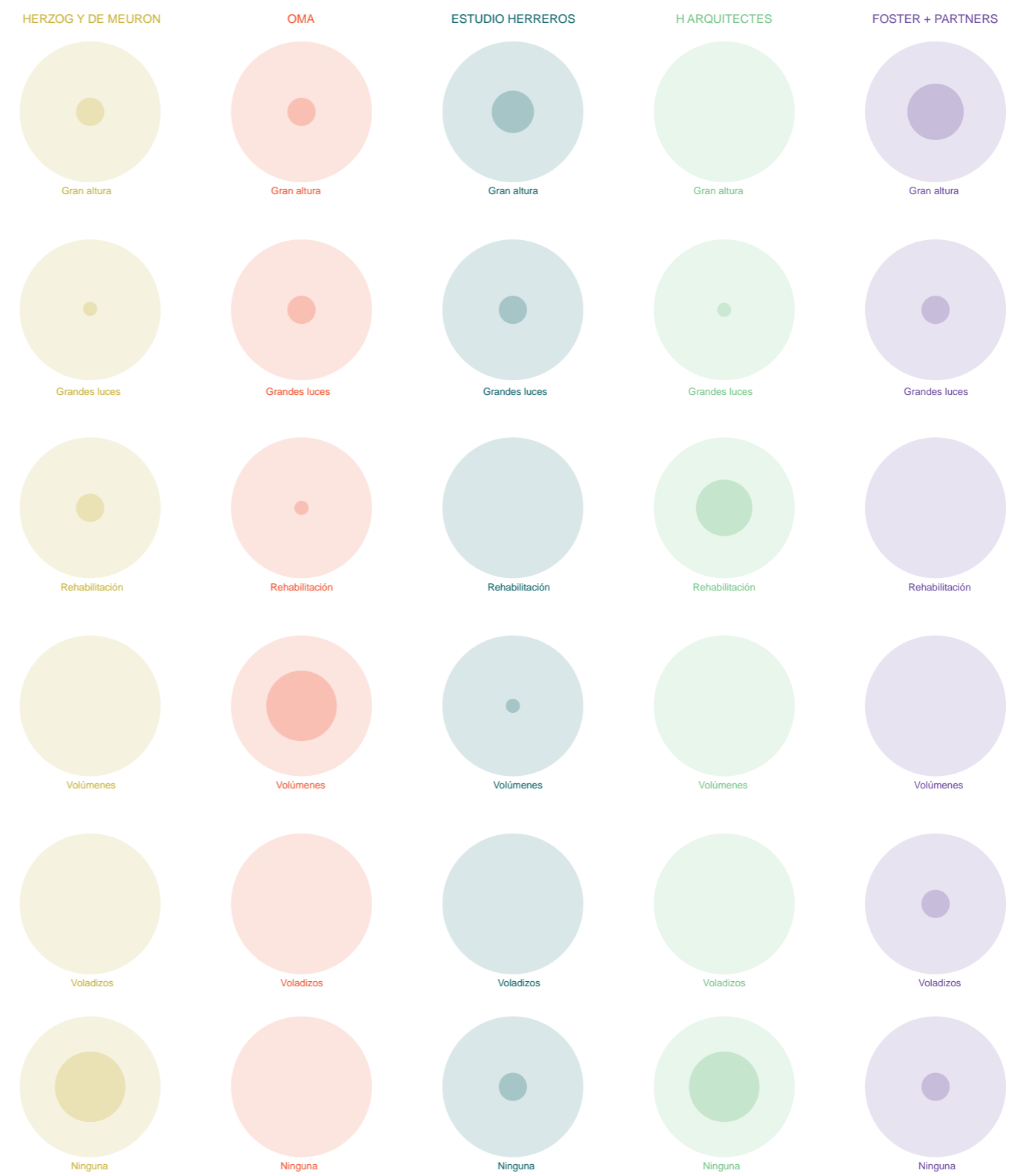


Figura 23. Número de casos por categoría y arquitecto de la variable "problemática". Elaboración propia.

Cuando los datos se examinan por arquitecto, queda claro que cada uno tiene una personalidad bastante diferenciada. De los proyectos analizados, se extraen las diferentes conclusiones en cuanto a qué prevalece en cada arquitecto o estudio, sin que ninguna de ellas sea indicativo de lo buena que es su arquitectura.

Herzog & de Meuron tienden a generar sus proyectos a partir de condicionantes urbanísticas, espaciales y volumétricas, y a tener muy en cuenta, por ejemplo, el aspecto de la fachada, pero rara vez utilizan la estructura como generadora del espacio. Además, en sus proyectos existe una clara predilección por la utilización del hormigón en la estructura.

OMA, conocido por sus edificios de volúmenes poco frecuentes, se decanta más por el acero. Tiene más variedad en cuanto a la influencia y la manifestación de la estructura, sin que se pueda establecer una categoría predominante.

El Estudio Herreros, por otro lado, presenta muchos más casos en los que la estructura se resuelve a posteriori y es, además, el autor del único proyecto con estructura ornamentada de los recogidos en la investigación. Por un lado, esto reconoce la capacidad de la estructura de generar espacio, utilizándola activamente en la arquitectura. Sin embargo, este caso es una excepción a los proyectos del estudio, que tienden más a simplemente aceptar que la estructura es necesaria para sostener físicamente la arquitectura.

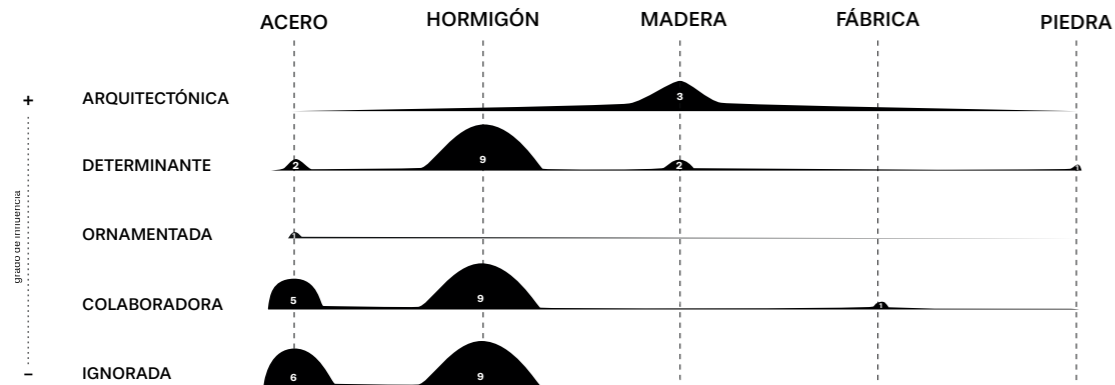
H Arquitectes son conocidos por buscar una arquitectura basada en el material y en la sostenibilidad, aspecto que muchas veces extrapolan a la estructura. La enorme mayoría de las obras de este estudio encuentran un equilibrio entre la arquitectura y la estructura y, en los casos en los que no se da el punto medio, es porque la estructura adquiere mucho protagonismo. Muchas de las decisiones tomadas en el proyecto proceden de un gran conocimiento sobre los materiales y los sistemas constructivos, sus posibilidades, sus ventajas y sus limitaciones.

Por último, Foster & Partners tienden a ocultar la estructura en muchos de sus proyectos. Aquellos en los que se ha tenido en cuenta para el diseño, son casos en los que la problemática no dejaba otra opción. Esto lleva a pensar que este estudio en particular no presenta demasiado interés por las estructuras, prevaleciendo en sus diseños otros aspectos.

Y todos estos datos en conjunto, ¿qué conclusiones arrojan acerca de la arquitectura contemporánea y su relación con la estructura? Para responder, se han puesto en relación todas las categorías con las demás, estableciendo un gradiente de colores y representando en tres dimensiones el número de casos que se da en la intersección de dos variables.



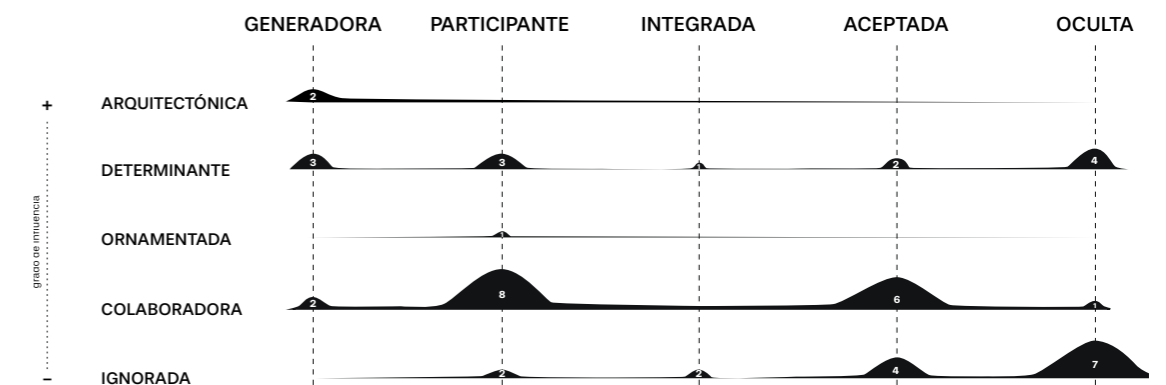
Figura 24. Número de casos que se intersecan en dos categorías de distintas variables. Elaboración propia.



GRADO DE INFLUENCIA VS. MATERIAL:

- Cuando la estructura es arquitectura (**estructura arquitectónica**), el material elegido en los proyectos recopilados siempre es **madera**. Esto parece indicar que la madera está actualmente considerada como un material de enorme expresividad que es capaz de generar arquitectura por sí sola. En ningún proyecto en el que la estructura haya sido resuelta a posteriori se ha elegido la madera para resolver el esqueleto resistente.
- En los proyectos en los que la estructura es determinante (la gran mayoría de ellos rascacielos), la estructura elegida es el hormigón, muy por delante del acero. Parece algo sorprendente, si se considera la diferencia de resistencia entre ambos materiales (una estructura portante de acero, en principio, permitiría ganar espacio en planta, aspecto que resulta muy relevante si el edificio tiene decenas de ellas).
- Si la estructura se resuelve completamente a posteriori, sólo se elige acero u hormigón para la estructura. Esto concuerda con la primera conclusión de que la madera únicamente se usa cuando es uno de los aspectos generadores del proyecto.
- Materiales que no son acero, hormigón o madera no son representativos en el panorama actual. Eso no quiere decir que no exista ningún proyecto; en esta muestra hay un proyecto de fábrica y otro de piedra, pero además existen muchas arquitecturas textiles o incluso de cartón, como las de Shigeru Ban. Aunque haya ejemplos de otros materiales, suponen más una excepción que algo extendido.

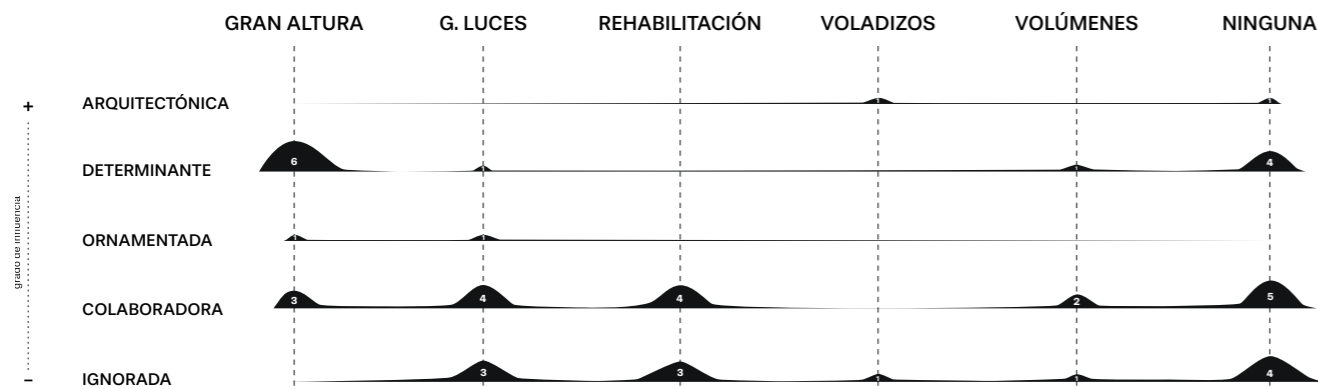
Figura 25. Relación entre grado de influencia y material. Elaboración propia.



GRADO DE INFLUENCIA VS. MANIFESTACIÓN:

- Como se comentó anteriormente, en aquellos casos en los que la estructura es arquitectónica, se da necesariamente una manifestación generadora de la estructura. En esta categoría se encuentran únicamente 2 proyectos de 48, siendo uno un pabellón de la Expo de Milán y otro unas bodegas. Es decir, que no es común en el panorama actual utilizar únicamente la estructura para generar espacio, y mucho menos en edificios de varios pisos y/o cargas considerables, sino más bien en construcciones pequeñas de gran delicadeza.
- Existe una distribución bastante homogénea en los casos en los que la estructura es determinante pero, curiosamente, los 4 casos en los que se decide ocultarla completamente son oficinas.
- Como era de esperar, en ningún caso en el que la estructura se trata como algo ajeno al proyecto, ésta se utiliza en el espacio. Un gran porcentaje de este tipo de proyectos decide ocultar completamente los elementos resistentes para darle protagonismo a otros aspectos.
- En el espectro contrario, todos aquellos proyectos en los que se tiene en cuenta la estructura en el diseño, ésta acaba quedando a la vista en mayor o menor medida. Parece, entonces, que cuando los arquitectos hacen un esfuerzo, elegido o no, por integrar en el proyecto el aspecto resistente, deciden mostrarlo como algo positivo.

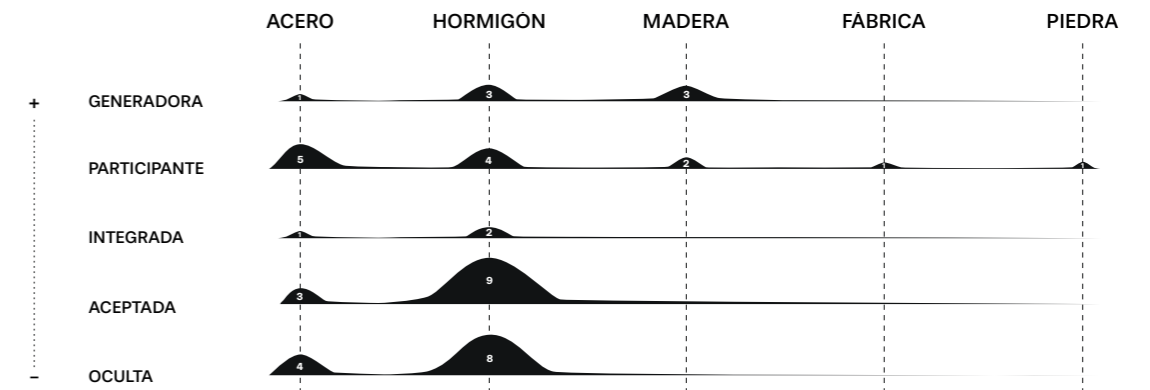
Figura 26. Relación entre grado de influencia y manifestación. Elaboración propia.



GRADO DE INFLUENCIA VS. PROBLEMÁTICA:

- La mayoría de proyectos en los que la estructura es **determinante son edificios en altura**. Aquellos que no pertenecen a esta categoría de problemática es porque una de las ideas claves del proyecto era un sistema constructivo con ciertas limitaciones. Por ejemplo, uno de los proyectos de H Arquitectes usaba como punto de partida una estructura de muros de carga de piedra. El edificio, pensado para albergar viviendas, en principio no presentaba ningún reto de altura, voladizos, ni ningún otro, pero el sistema constructivo elegido definió en gran medida las dimensiones de los espacios. Este tipo de decisiones es una excepción a la norma.
- Es decir, **que la mayoría de los proyectos que sí tienen la estructura en cuenta lo hacen por una limitación constructiva y técnica, más que por una decisión voluntaria del arquitecto**.
- En los proyectos en los que no existe **ningún reto estructural significativo, aparece una tendencia algo mayor a ignorar la estructura** en el proceso de diseño. Aún así, hay en los retos de grandes luces, uno que normalmente se asocia con elementos de grandes dimensiones (cerchas, por ejemplo) hay varios casos que no consideraron su resolución en el diseño, lo que resulta sorprendente.
- **En la rehabilitación, uno podría esperar que el grado de influencia de la estructura sea bastante alto y, sin embargo, sucede lo contrario**. En los proyectos de rehabilitación, parece lógico utilizar un material conocido por su ligereza de manera que se sobrecargue lo menos posible la estructura existente. Sin embargo, sólo uno de los proyectos la utiliza, siendo sorprendentemente la opción más elegida el hormigón.

Figura 27. Relación entre grado de influencia y problemática. Elaboración propia.



MANIFESTACIÓN VS. MATERIAL:

- **Materiales como la madera, la fábrica o la piedra tienden a dejarse vistas y a participar en el espacio arquitectónico**. En los casos en los que se acaba ocultando la estructura, el material siempre es hormigón o acero.
- En general, **se observa una clara predisposición a utilizar en hormigón como material estructural. Esto puede sugerir una gran versatilidad**, pues se encuentran casos de todas las categorías de manifestación construidos con hormigón. También, relacionándolo con el gráfico anterior, puede sugerir simplemente que es un material más que conocido, ensayado y controlado y con el que los arquitectos parecen sentirse más familiarizados. Por eso, en caso de no "saber bien qué elegir", el hormigón parece poder adaptarse a prácticamente cualquier situación.
- Esta versatilidad y adaptabilidad parece tenerla también el acero, el segundo material más utilizado. Sin embargo, **el acero obtiene normalmente más protagonismo en los proyectos, y se tiende menos a ocultarlo**.

Figura 28. Relación entre manifestación y material. Elaboración propia.

Conclusiones

Sobre las tendencias en la arquitectura contemporánea...

En general, estos datos muestran que **la arquitectura contemporánea no se centra en la estructura como herramienta generadora del proyecto**. En los casos en los que **se tiene en cuenta en el proceso de diseño, es más por limitaciones técnicas y constructivas** que por una decisión intencionada.

Sobre la materialidad y su influencia...

Es interesante la **escasa presencia de la madera** como material estructural en un contexto en el que la sostenibilidad está en boca de todos y en el que la tecnología ha avanzado lo suficiente como para salvar muchas de las limitaciones que podía presentar en el pasado, como la durabilidad o la poca conformabilidad. Además, aquellos arquitectos que le dan mucha importancia al material, ya sea como estructura o como herramienta que modifique la percepción espacial, son arquitectos que se caracterizan por ello. Es decir, que no es algo extendido, sino más una cosa puntual que diferencia a algunos estudios.

Sobre las problemáticas estructurales...

Las categorías **predominantes de retos estructurales son los edificios de gran altura y los que presentan grandes luces**. Esto podría tener que ver con las demandas contemporáneas de crear ciudades densas y edificios versátiles y flexibles que puedan ser reutilizados de acuerdo a necesidades futuras. Sin embargo, cuando estas oportunidades se dan en el campo de la rehabilitación, la estructura que interactúa con lo existente no parece ser una de las preocupaciones principales.

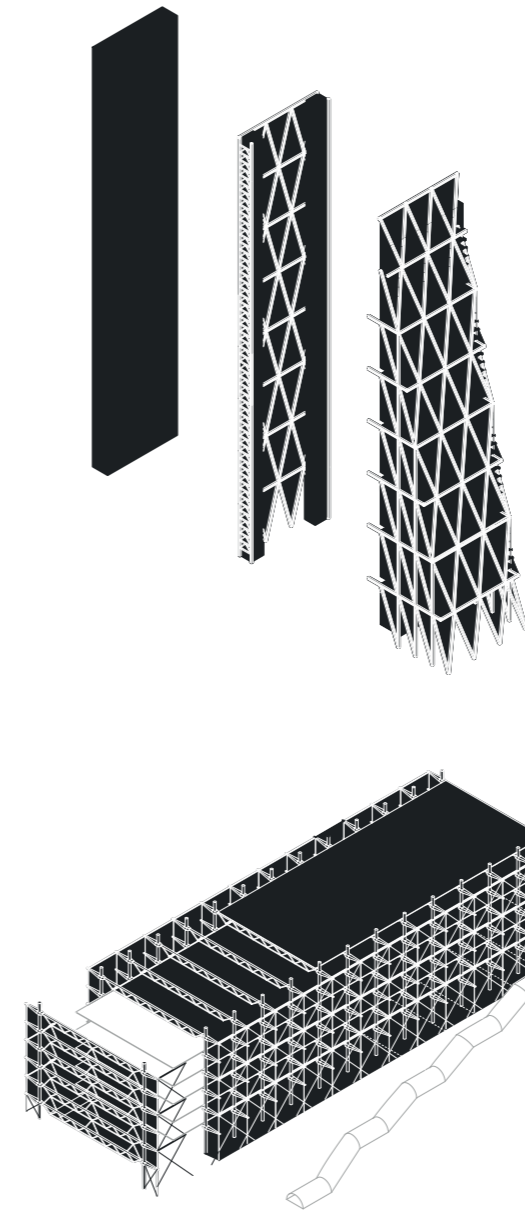
Sobre la manifestación visual...

Las estructuras vistas se asocian más comúnmente con la madera que con el hormigón y el acero. El hormigón es más frecuente cuanto menos se tiene en cuenta la estructura en el diseño, y es el material que más número de casos tiene en las categorías de menor manifestación. Por lo tanto, no se está utilizando explotando actualmente como un material de grandes cualidades expresivas.

Cada estudio aborda la relación entre arquitectura y estructura de maneras significativamente diferentes. **El uso de la estructura como variable del espacio arquitectónico se considera más una seña de identidad** que una estrategia generalizada.



Figura 29. Proyecto de Kerez diseñado en madera y construido en hormigón. Adaptado de "Madera estructural", por Ó. Linares, 2024, AV Proyectos.



Arquitectos	Rogers Stirk Harbour + Partners
Ingenieros estructurales	Arup
Lugar	Londres, Reino Unido
Altura total	224,5 m

The Leadenhall Building

Arquitectos	Piano + Rogers
Ingenieros estructurales	Ove Arup & Partners (Structures 3)
Lugar	París, Francia
Altura total	42 m

Centre Pompidou

Arquitectos	Rogers Stirk Harbour + Partners
Ingenieros estructurales	Whitby Bird & Partners
Lugar	Londres, Reino Unido
Altura total	18 m

Mossbourne C.A.

CASOS DE ESTUDIO

La ingeniería estructural [es] en general considerada –incluso por los propios ingenieros– exclusivamente en términos técnicos, olvidando su potencial artístico, mientras que el mundo de la arquitectura se ha apropiado de aquellos ingenieros que han demostrado un mayor interés formal y creativo, convirtiéndolos en "arquitectos honorarios". (Bernabeu, 2007)

03

Casos de estudio

Se han seleccionado tres casos de estudio de un mismo arquitecto para explorar cómo las decisiones estructurales influyen en la arquitectura. Esto se consigue planteando un escenario alternativo en el que la solución estructural se construye en otro material diferente al original.

Criterios de selección del arquitecto

Se optó por Richard Rogers y el estudio que, desde 2007, le sucede, RSHP (Rogers Stirk Harbour & Partners), por ser una figura con suficiente trayectoria y con un gran repertorio de proyectos construidos.

Rogers y RSHP no tienen una personalidad selectiva en el sentido de sólo construir con un material, o aceptar sólo proyectos de ciertas dimensiones, sino que se caracterizan por la variedad. RSHP no tiene una tendencia clara a la hora de generar arquitectura; no se basan en el material, como lo hacen por ejemplo H Arquitectes, ni en volumetrías poco frecuentes, como OMA, sino que priorizan uno u otro factor dependiendo de la situación y la intención. Por eso, resulta muy enriquecedor ver a qué herramientas le dan prioridad en cada caso y cómo la estructura forma, o no, parte ellas.

Criterios de selección de los proyectos

Los tres proyectos seleccionados son el Leadenhall Building, el Centre Pompidou y la Mossbourne Community Academy. Todos tienen características y condiciones de partidas muy distintas (usos, dimensiones, retos, cargas...), y soluciones que no asemejan en absoluto la una con la otra. Dos de ellos se resuelven con acero y el tercero en madera.

Metodología

1. COMPRENDER

En primer lugar, se estudia el proyecto tal y como fue construido. Con esto se pretende entender cuáles fueron las condiciones iniciales de diseño, qué retos arquitectónicos y estructurales existían y cómo se resolvieron. Esta primera fase incluye, por lo tanto:

- Las condiciones iniciales: por ejemplo, características y emplazamiento de la parcela, limitaciones de plazo, bases del concurso (para aquellos que se construyeron por ser una propuesta ganadora), etc.
- Ideas generadoras de la arquitectura: se refiere a los conceptos del diseño, aquellos a los que los arquitectos no estarían dispuestos a renunciar. Incluyen, entre otras, la planta diáfana, la versatilidad, la forma general, la materialidad, etc.
- Retos estructurales y constructivos: evalúa si el diseño presentaba alguna problemática de las definidas en apartados anteriores, o cargas elevadas, dificultades del terreno, o algún reto parecido.
- Resolución estructural: se detalla la solución adoptada en cuanto al material, el sistema constructivo, piezas o uniones especiales, etc.

2. IMAGINAR

2.1. Focalizar

En base a la arquitectura y las condiciones iniciales, se evalúa qué opciones se presentan en la elección del material. Algunas de estas opciones pueden estar limitadas, por ejemplo: el acero es una opción con la condición de que todo sea prefabricado fuera de obra y sólo requiera ser atornillado. Estas opciones deberán resolver, por tanto, los retos identificados en el apartado anterior.

2.2. Extrapolar

Este paso pretende analizar si una solución estructural alternativa en otro material habría sido viable técnica y constructivamente. Se realizan cálculos simplificados basados principalmente en los Eurocódigos o en la normativa vigente en el país de construcción. En muchas ocasiones, los distintos Documentos Básicos del Código Técnico de la Edificación que se utilizan en España son una traducción directa de los Eurocódigos, por lo que se utilizan los DB por facilidad lingüística. Se evalúan aspectos como el transporte, el montaje, las uniones, la manipulación en obra o su posible modificación futura.

3. COMPARAR

En base a lo obtenido en el apartado anterior, se realizan dibujos comparativos a escala que permitan evaluar aspectos como las alturas libres resultantes, la afectación del espacio en planta u otros aspectos arquitectónicos relevantes del proyecto.

4. INTERPRETAR

Aunque las soluciones fueran viables técnica y constructivamente, este último paso evalúa cuál sería el impacto de cambiar la solución estructural en la estética y la percepción del proyecto. En muchos casos, otras soluciones habrían sido viables, pero habrían modificado tanto el aspecto del proyecto que se estaría hablando de otro igual de válido pero completamente diferente.

En el análisis de los casos de estudio, no se incluyen todos estos pasos de una manera tan lineal y explícita como aquí se indica, pues cada uno presenta unas características muy diferentes. Sin embargo, sí se incluyen todos los aspectos anteriores de manera que ayuden a comprender cada uno de los proyectos individualmente y a extraer conclusiones.



The Leadenhall Building

"A one-of-a-kind design."

Arquitectos	Rogers Stirk Harbour + Partners
Ingenieros estructurales	Arup
Lugar	Londres, Inglaterra
Año	2002-2014
Superficie interior	84.424 m²
Número de plantas	50
Altura total	224,5 m
Uso principal	Oficinas y negocios



Diseño arquitectónico

Las estrategias principales de diseño tienen que ver con el entorno de la parcela, especialmente con las vistas hacia la St Paul's Cathedral, pero también con la existencia de otros rascacielos cercanos. Los arquitectos optaron por un desarrollo en altura cónico. La capacidad de construir en altura permitió la creación de un espacio público significativo en la base de la torre.

Retos estructurales

¿Cuáles son los grandes retos a resolver?

Respuesta corta: la altura, la planta diáfana y la parcela

1 Gran altura - acciones de viento

En los edificios de gran altura, las **fuerzas horizontales generadas por el viento** son uno de los factores más importantes a considerar en el diseño de la estructura. La velocidad y la presión del viento crecen con la altura, generando en el edificio unas fuerzas importantes de presión y succión.

2 Planta diáfana

El proyecto se diseñó para que cada planta pudiera ser ocupada por empresas diferentes, por lo que el **espacio debía ser lo más diáfano posible** para dar cabida a usos y necesidades diversas. Por eso, en la **zona central hay únicamente seis pilares**, estando el resto de la estructura en la fachada. Esta estructura recibe el nombre de **"mega-frame"**.

3 Dimensiones de la parcela

La huella del edificio ocupa casi toda la **parcela (que es sólo 3m más ancha que él)**. Esto, sumado a que el entorno que lo rodea está repleto de otros edificios de gran altura, hizo que trazar una **buena estrategia constructiva** fuera crucial.

¿Cómo se transmiten las cargas verticales y horizontales al suelo?

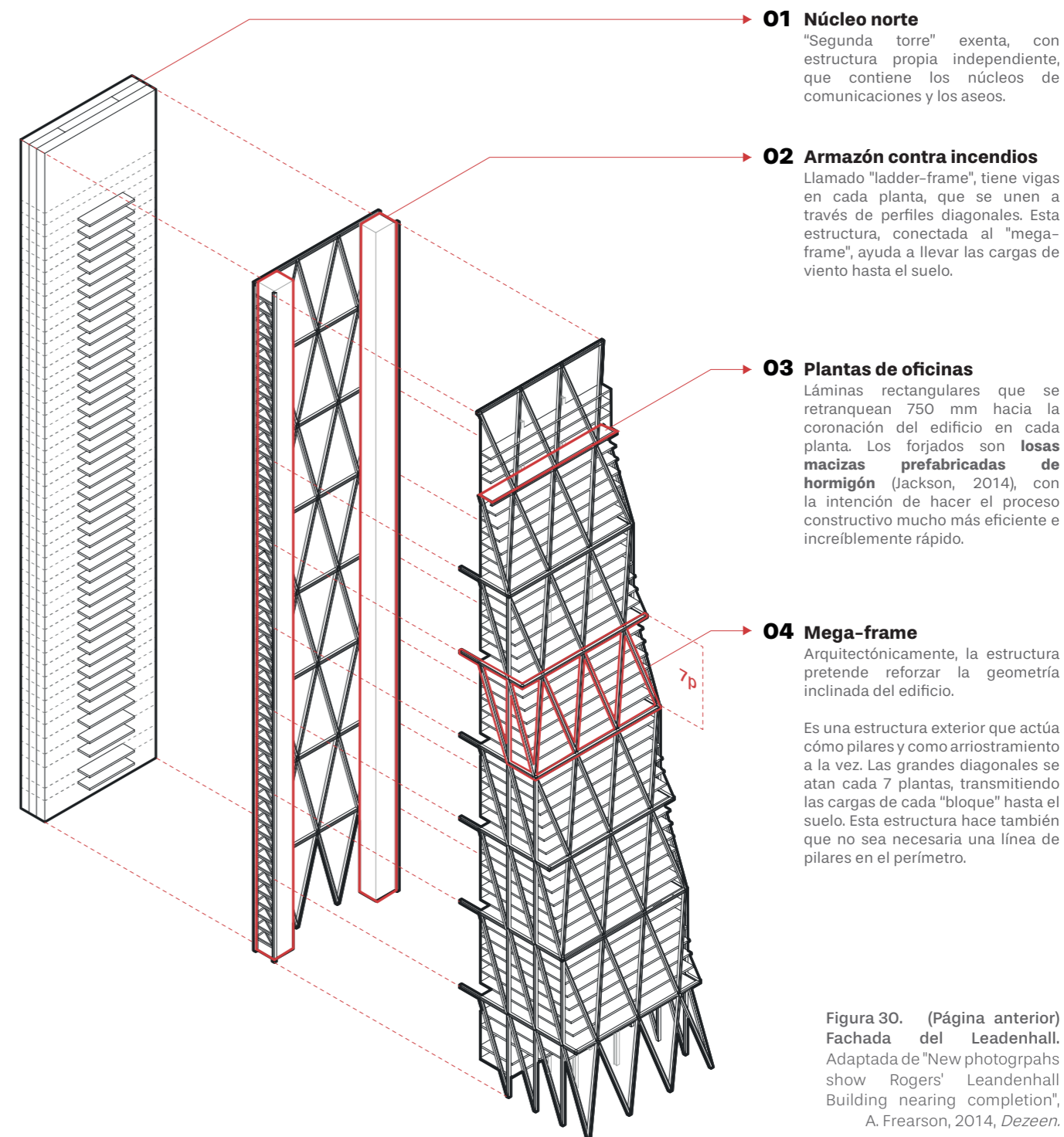
Respuesta corta: con elementos diagonales atados cada 7 plantas

En lugar de optar por dos sistemas, uno para cargas verticales y otro para cargas horizontales, **se unifican los elementos en un único gran armazón**. Es común en los rascacielos utilizar los núcleos de comunicación como arriostramientos, y transmitir las cargas verticales con pilares. RSHP (arquitectos) y Arup (ingenieros estructurales) se decidieron por una estructura completamente vista, con elementos diagonales, que cobra protagonismo en el edificio y que, atando los forjados de 7 en 7, permite transmitir todas las cargas hasta el suelo. **Estas diagonales son pilares y arriostramiento a la vez**, y uno de los mayores desafíos fue resolver los nudos a los que acometían seis perfiles de acero de grandes dimensiones.

¿Cómo se construyó si la parcela era tan estrecha?

Respuesta corta: prefabricación especializada

Los enormes perfiles de acero y todos sus nudos se fabricaron y soldaron en talleres en el norte de Inglaterra. Después, se llevaron a otro taller donde se les dieron los acabados necesarios, incluida la pintura para la protección contra el fuego. Los perfiles se almacenaban hasta que se requerían en obra, momento en el que cortaban el tráfico de Londres de madrugada para permitir el acceso a los camiones que transportaban los perfiles. **Una vez puestos en su lugar, sólo quedaba atornillarlos.**



01 Núcleo norte

"Segunda torre" exenta, con estructura propia independiente, que contiene los núcleos de comunicaciones y los aseos.

02 Armazón contra incendios

Llamado "ladder-frame", tiene vigas en cada planta, que se unen a través de perfiles diagonales. Esta estructura, conectada al "mega-frame", ayuda a llevar las cargas de viento hasta el suelo.

03 Plantas de oficinas

Láminas rectangulares que se retranquean 750 mm hacia la coronación del edificio en cada planta. Los forjados son **losas macizas prefabricadas de hormigón** (Jackson, 2014), con la intención de hacer el proceso constructivo mucho más eficiente e increíblemente rápido.

04 Mega-frame

Arquitectónicamente, la estructura pretende reforzar la geometría inclinada del edificio.

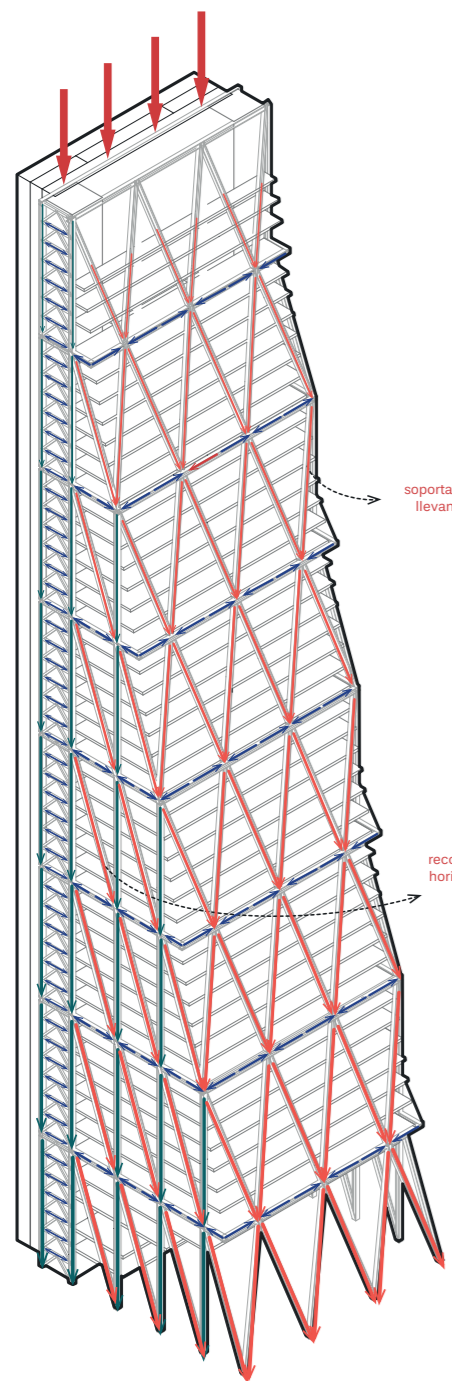
Es una estructura exterior que actúa como pilares y como arriostramiento a la vez. Las grandes diagonales se atan cada 7 plantas, transmitiendo las cargas de cada "bloque" hasta el suelo. Esta estructura hace también que no sea necesaria una línea de pilares en el perímetro.

Figura 30. (Página anterior) Fachada del Leadenhall. Adaptada de "New photographs show Rogers' Leadenhall Building nearing completion", A. Frearson, 2014, *Dezeen*.

Figura 31. Esquema de los elementos estructurales principales. Elaboración propia.

Transmisión de cargas

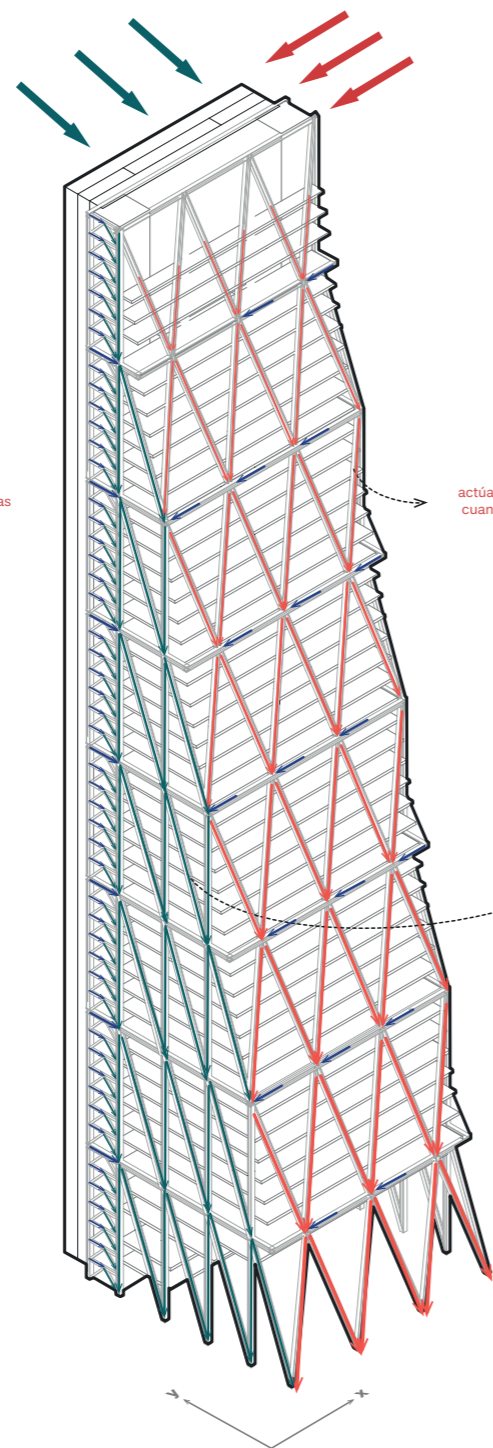
Verticales



soportan cargas verticales y las llevan hasta el suelo con un ángulo de 11°

recogen la componente horizontal de los pilares inclinados

Horizontales



actúan como arriostros cuando el viento sopla en la dirección X

actúan como arriostros cuando el viento sopla en la dirección Y

Figura 32. Esquema de la transmisión de cargas verticales y horizontales. Elaboración propia.

Proceso constructivo

El mega-frame utilizado en el Leadenhall no tenía precedentes de su escala y, además, contaba con una parcela de muy complicado acceso para las dimensiones de sus elementos. Cada "megalevel" tiene 28m de alto y, en total, hay 18.500 toneladas de acero.

La gran mayoría de los elementos, incluidas las uniones entre ellos (a los que llamaron "meganodos"), fueron prefabricados y transportados a la obra. Este aspecto de **la prefabricación y las uniones era clave**. En casi todos los nudos, acometen seis perfiles de enormes dimensiones. Los nudos requirieron de una investigación y un desarrollo intenso durante años. En total, hay aproximadamente 475 uniones que varían en grosor, ángulo y en su conexión con la fachada. El peso de cada una se encuentra entre las 12 y las 60 toneladas.

Es crucial en este tipo de proyectos pensar en el proceso constructivo, que no incluye sólo el montaje en obra: ¿cómo se prefabrican unas piezas de unas dimensiones enormes? ¿Hay alguna limitación en el proceso de fabricación? ¿Cómo se transportan todas estas piezas de los talleres a la obra? ¿Hay camiones capaces de llevar piezas de casi 30m y que sean capaces de acercarse lo suficiente a la zona de montaje? ¿Qué horas del día se puede hacer el transporte, que requiere cortar el tráfico del centro de Londres? ¿Qué grúas hacen falta para elevar las piezas a 224 metros de altura?

Todos esos planteamientos son necesarios desde el principio del proceso del diseño de la estructura. Gran parte del éxito de este edificio radica en que ingenieros y arquitectos trabajaron juntos en cada paso del diseño, teniendo en cuenta todas las variables arquitectónicas y estructurales.



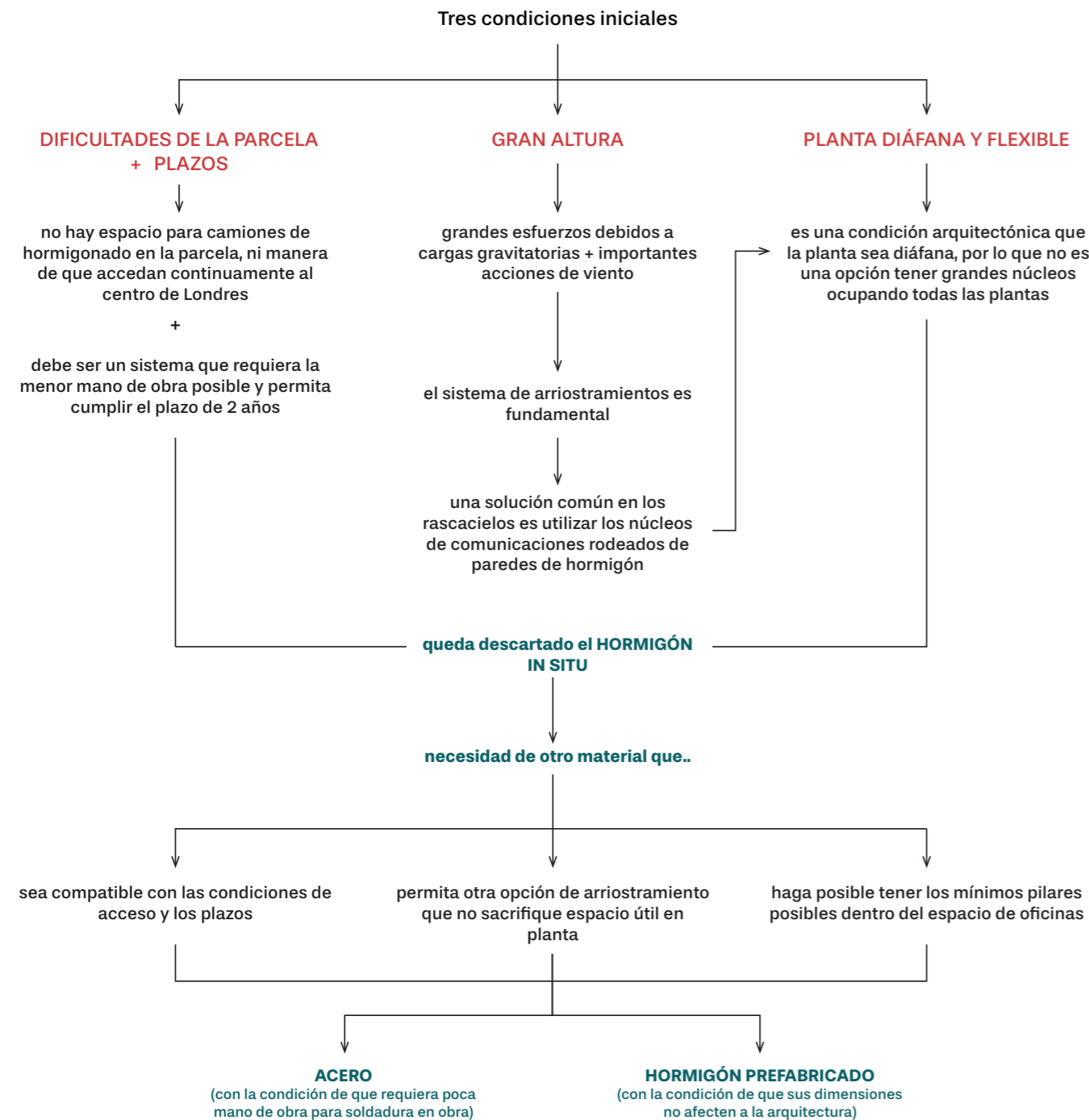
Figura 33. Imagen del Leadenhall en construcción. Adaptado de *In Progress: The Leadenhall Building* [Fotografía], por Rogers Stirk Harbour + Partners, 2013.

Figura 34. Node 6. Adaptado de *Node 6 at level 19*, por D. Krolikowski, 2016.

Figura 35. Operarios soldando uno de los nudos. Adaptado de *Leadenhall Building* [Fotografía], por Australian Steel Institute, 2018.

El Leadenhall en hormigón

¿Se podría haber hecho este proyecto en hormigón, manteniendo los elementos estructurales y el funcionamiento tal y cómo están diseñados? Para imaginar cómo podría haber sido el Leadenhall en hormigón, se tienen en cuenta varios aspectos, comparando lo que supone elegir uno u otro material para cada uno de ellos.



Según estas condiciones iniciales, el hormigón prefabricado podría haber sido el sistema elegido para levantar el rascacielos. ¿Por qué no lo fue?

Proceso constructivo

El edificio tenía un plazo de menos 26 meses para ser levantado. Esto hacía necesario que el sistema fuera, como lo describen los ingenieros, "some assembly required on a monumental scale" (Jackson, 2014). Se refieren a que, más que una obra como la conocemos, llena de operarios vertiendo hormigón, colocando armaduras y soldando piezas, este proceso de construcción eran principalmente grúas que colocaban piezas como un Lego. Entonces, hay tres condiciones que el hormigón prefabricado tendría que cumplir en cuanto a la construcción se refiere:

Plazos

En el sentido de que el sistema estructural esté formado por piezas listas para ensamblar en obra y así ahorrar tiempo, el hormigón prefabricado podría equipararse al acero. En ambos sistemas, las piezas se fabricarían fuera de la obra y se transportarían hasta el emplazamiento, así que en **este aspecto no existe mucha diferencia.**

Transporte

En términos de material, el acero es más denso que el hormigón. Sin embargo, su resistencia es también mucho mayor, lo que significa que las secciones de acero pueden ser más esbeltas, y sin embargo las de hormigón requieren mucho más material. En general, las secciones de hormigón acaban teniendo tanta sección que pesan mucho más que las de acero. Por sus dimensiones y su peso, en principio, **transportar piezas de hormigón prefabricado habría sido mucho más complicado y también más lento.**

Levantamiento de las piezas

Por sus mayores dimensiones y mayor peso, **levantar las piezas de hormigón prefabricado a más de 200 m de altura habría requerido unas grúas mucho más grandes** (que ya de por sí no tenían demasiado margen en la parcela), al igual que mucho más espacio de maniobra. Ya con la estructura de acero, "la grúa con más capacidad tenía una capacidad máxima de 32 toneladas, así que se hicieron dos grúas nuevas especialmente para la construcción del Leadenhall building" (The Leadenhall Building Official Website, City of London)

Uniones

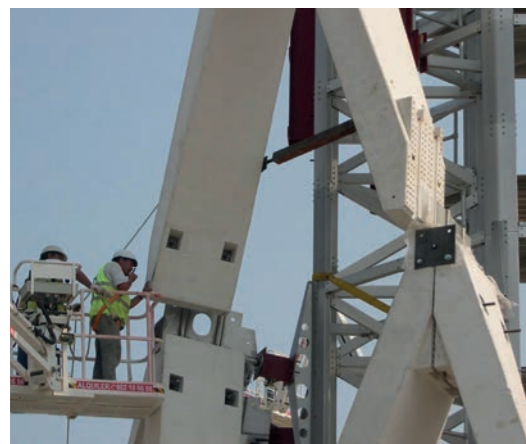
Las uniones entre los perfiles de acero fue fruto de investigación y estudio durante años, pues no había precedentes de esta escala y complejidad cuando el edificio fue diseñado en la década de los 2000. Estas mismas uniones habrían complejas de diseñar en hormigón prefabricado, pues las que existen están pensadas para una construcción rápida y reticular.

Figura 36. Condiciones iniciales. elaboración propia.

En términos de altura, el edificio más alto construido en hormigón prefabricado, el Avenue South Residences, está programado para acabarse en 2026. Tendrá 192 metros (aproximadamente 30 metros menos que el Leadenhall) y no tiene ninguna luz ni geometría fuera de lo común, por lo que los elementos principales y sus uniones están estandarizados.

En términos de complejidad geométrica, la Torre de Control del Aeropuerto de Barcelona se construyó en 2003 y tiene una estructura cuya forma procede de un hiperboloide como volumen de revolución. Siendo su altura una cuarta parte del Leadenhall, ya requirió nudos de cierta complejidad, con tubos, taladros previstos en las dovelas, chapas intermedias, barras Dywidag... (Carrasco, 2005)

Por lo tanto, se podría decir que, por las condiciones del Leadenhall, para esta estructura no existía en los años 2000 ni en la actualidad unas uniones en hormigón prefabricado capaces de resolver esta geometría en altura. Sin embargo, y para ser justos, tampoco existían las que se ejecutaron en su momento en acero. El Leadenhall es precisamente conocido por el hito que supuso su estructura y su proceso constructivo, ya que no se había hecho nada igual. En este sentido, no se puede descartar que se pudiera haber aplicado lo mismo al hormigón prefabricado y se hubieran conseguido unas novedosas y sorprendentes uniones.



Uniones de la Torre de Control de Barcelona



Uniones del Leadenhall Building

Protección contra el fuego

Es un problema que está siempre muy presente en los edificios con grandes alturas de evacuación. En términos generales, el hormigón es mucho más resistente al fuego que el acero, y no requiere de medidas adicionales como pinturas intumescentes o revestimientos aislantes. Sin embargo, es importante considerar el hecho de que parte de la **estructura de acero** planteada en el Leadenhall **está fuera del edificio, lo que permite consideraciones diferentes en la normativa inglesa, pero no en la española.**

La normativa inglesa relativa a incendios, el Approved Document B: Fire Safety, dice

Figura 37. Operarios junto a uno de los nudos de la Torre de Control. Adaptado de *Nueva torre de control del aeropuerto de Barcelona*, por A. Carrasco, 2005.

Figura 38. Operarios junto a uno de los Meganodos. Adaptado de *Node type 7 in fabricaiton*, por D. Krolkowski, 2016.

en su apartado B26 que "en algunas circunstancias, puede ser razonable [variar la resistencia al fuego de ciertos elementos] **si la estructura portante está al aire libre** y no es probable que le afecte el fuego que se pueda producir dentro del edificio"¹¹. El Documento Básico de Seguridad Contra Incendios del **CTE no contempla esta posibilidad**, obligando a todos los elementos estructurales a tener una resistencia R120 para alturas mayores de 28m en uso administrativo (incluso R180 si se considera la parte de pública concurrencia de las plantas bajas del Leadenhall).

Dimensiones

Quizá el parámetro más importante desde el punto de vista arquitectónico es el de las dimensiones de los elementos principales, especialmente el de los pilares en edificios de este tipo. Para tener una idea de cómo habría sido este edificio si se hubiera hecho en hormigón, se proponen unos cálculos aproximados y generales que permitan mostrar la escala de ciertos elementos clave, teniendo en cuenta que no se pretende hacer dimensionados finos, ni tener en cuenta todos los detalles.

Bases de cálculo

1. Consideraciones geométricas

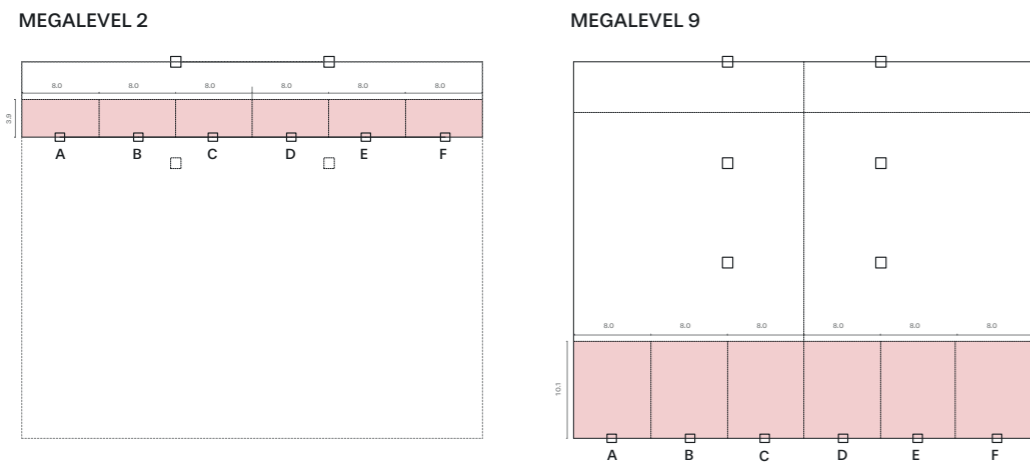
Con la intención de simplificar el modelo tridimensional de cálculo, se modela únicamente el "megaframe", sin incluir los forjados ni los sistemas secundarios que los sostienen. Dada la geometría del edificio, los forjados tienen menos área según aumenta la altura, únicamente dos pilares de los seis que existen dentro del edificio llegan hasta la coronación, y, además, las diagonales que actúan como pilares se unen a los forjados en puntos diferentes según el piso. Todo esto hace que sea complejo saber exactamente qué área tributaria corresponde a cada diagonal de cada "megalevel". Por eso, se hacen las siguientes aproximaciones:

- SUBESTRUCTURA DE LOS FORJADOS: no existe mucha información del subsistema de los forjados, pero a partir de fotografías de la construcción, se puede asumir que la subestructura que sujeta los forjados es un entramado de vigas bidireccional, que transmite las cargas a grandes vigas perimetrales unidas al "megaframe".



Figura 39. El edificio en construcción. Adaptado de *In Progress: The Leadenhall Building* [Fotografía], por Rogers + Stirk Harbour + Partners, 2013.

- **CÁLCULO DE ÁREAS TRIBUTARIAS:** se considerará que los 7 forjados contenidos en un "megalevel" tienen todos el mismo largo, el del forjado intermedio. Aunque el área tributaria de los pilares inclinados del megaframe 'A' y 'F' se vería ligeramente reducida por la presencia de los pilares en el plano perpendicular, la reducción es bastante pequeña (representa menos de un 10%), así que no se considera. Sin embargo, se aplicará a las vigas perimetrales de las fachadas perpendiculares una carga equivalente al 10% de la suma de las cargas puntuales de ese piso, con la intención de evaluar correctamente las acciones gravitatorias y del viento conjuntamente. A continuación se adjuntan como ejemplo las áreas consideradas para los "megalevels" 2 y 9.



- **ENTREGA DE CARGAS:** además, como las diagonales del "megaframe", que actúan como pilares, se van inclinando a medida que se desciende en cada "megalevel", los puntos de entrega de carga de los elementos secundarios que sostienen los forjados al almacén general varían con la altura. Esto requeriría o bien modelar todos los forjados, o bien establecer áreas tributarias para cada uno de las 50 plantas. En su lugar, se vuelve a tomar como referencia el forjado intermedio de cada "megalevel" y su área tributaria. Teniendo en cuenta la disposición geométrica, se obtienen las cargas puntuales a aplicar en cada nudo. Se sigue un procedimiento similar para el viento, teniendo en cuenta que el retranqueo de los forjados afectará para la acción del viento en la dirección V_x , y que la superficie sobre la que actúa en viento en V_y+ está inclinada. Se aplicará al nivel de la viga perimetral de cada "megalevel" el viento que actúe sobre la mitad del "megalevel" superior y la mitad del que actúe sobre el inferior. El primer "megalevel" desde la cota del suelo no tiene viento porque no tiene fachada, es un espacio abierto. Al ser el edificio simétrico respecto al eje 'y' en forma y cargas, la acción del viento en V_x+ y la del V_x- será igual, por lo que sólo se considera una de ellas.

Figura 40. Áreas tributarias consideradas para cada pilar inclinado del "megaframe".
Elaboración propia.

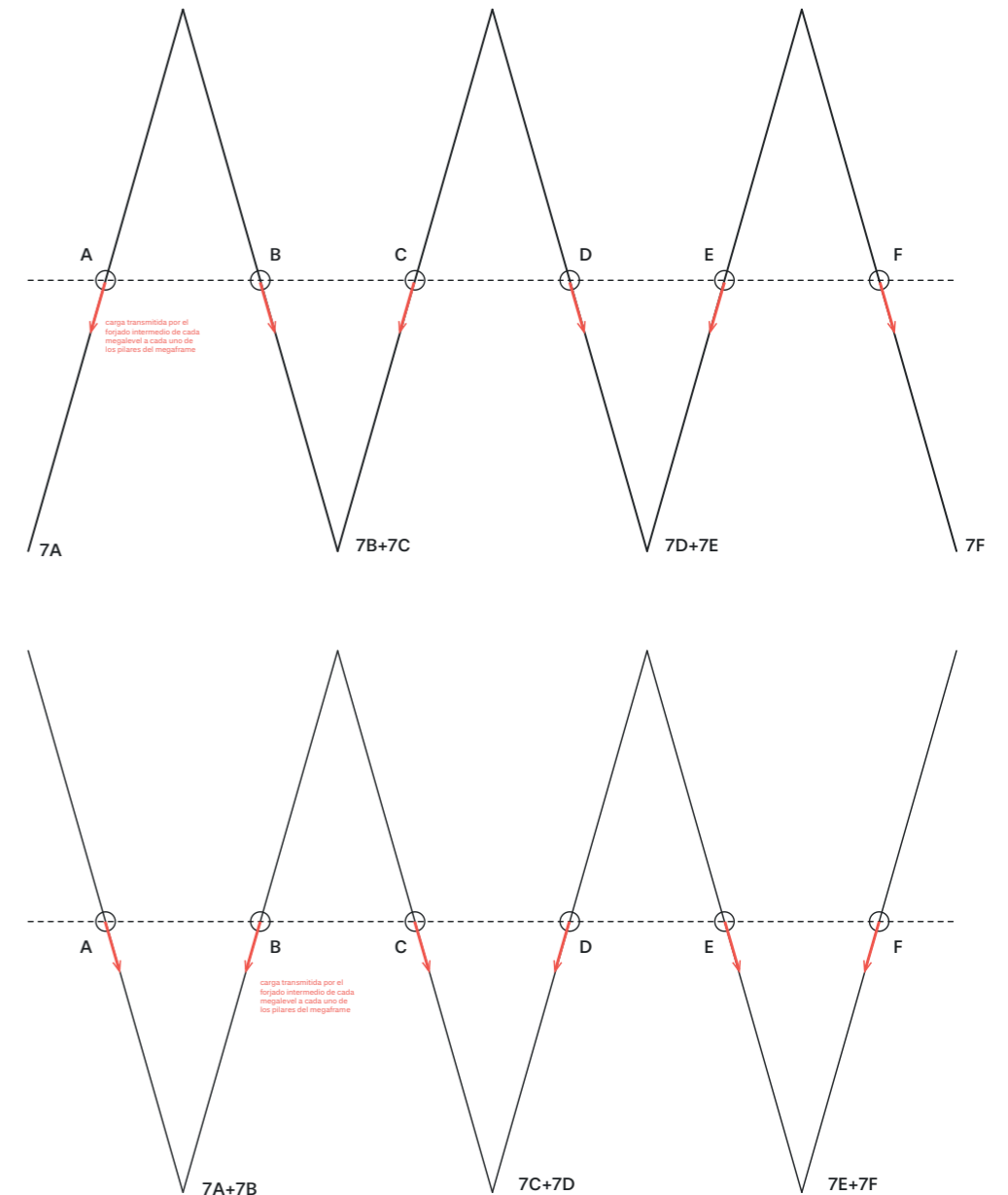


Figura 41. Geometría simplificada utilizada para aplicar cargas puntuales inclinadas en cada "megalevel".
Elaboración propia.

2. Acciones consideradas

- **PPO.** Peso propio de los elementos estructurales. Los cálculos se realizan con el programa SAP2000, que tiene en cuenta el peso propio de los elementos estructurales en la obtención de diagramas de esfuerzos.
- **PP1.** Peso propio de los elementos constructivos: se considera el peso de una losa maciza de 20 cm de espesor. $PP1 = h \cdot \rho \cdot a = 5 \text{ kN/m}^2 \cdot a$, siendo a el ancho tributario.
- **SU.** Sobrecargas de uso: sobrecarga de $2,00 \text{ kN/m}^2$ por ser uso de oficinas según el DB SE-AE. Cumple las condiciones del punto 3.1.2. para reducción de sobrecargas, por lo que se reducirán por un factor de 0,8, así que se aplica $1,60 \text{ kN/m}^2$.
- **Vx+, Vx-, Vy-, Vy+.** Viento: para la construcción de edificios de gran altura, se realizan pruebas en túneles de viento específicos para el proyecto. Se aplica aún así de forma simplificada el DB SE-AE a falta de otros datos más precisos. El viento se determina de acuerdo a la expresión $q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$. Aplicando lo establecido en el Anejo D, se obtiene una acción de presión de $1,50 \text{ kN/m}^2$ y una acción de succión de $1,30 \text{ kN/m}^2$, igual en 'x' y en 'y' (por la relación entre las dimensiones de la planta y la altura).

En cálculos más detallados, sería necesario incluir pesos propios de solados, falsos techos, instalaciones, máquinas de climatización, ascensores, etc., además de sobrecargas mayores en zonas de almacenaje, vestíbulos, etc., por lo que es muy probable que los esfuerzos obtenidos sean notablemente mayores en la realidad.

3. Coeficientes parciales de seguridad

- **Acciones permanentes:** para PPO y PP1 se aplica $\alpha = 1,35$.
- **Acciones variables:** para SU y V se aplica $\alpha = 1,5$. En algunas circunstancias, se puede considerar una de las acción como acción variable base y reducir el resto en base a un coeficiente de simultaneidad establecido en la tabla 4.2. del DB-SE. No se aplica en este caso porque no se consideran más que dos acciones variables.

4. Combinaciones de acciones

Al ser el "megaframe" un sistema que sirve como pilares (soportará esfuerzos de compresión) pero también de arriostramiento (se producirán esfuerzos de tracción), se combinan las acciones de tal manera que se pueda averiguar **si en alguna de las opciones se produce una tracción debida al viento que pueda superar la compresión por cargas gravitatorias** (siendo el esfuerzo global de tracción, por lo tanto). En este sentido, la sobrecarga de uso se considera favorable, porque añadiría más compresión. Por eso, no se incluye en estas combinaciones, que equivaldrían al supuesto de que las oficinas están vacías por la noche y sopla el viento en cualquiera de las direcciones:

- **ELU 01:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot Vx+$
- **ELU 02:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot Vy+$
- **ELU 03:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot Vy-$

Figura 42. Esfuerzos axiales obtenidos para las combinación ELU 05. Elaboración propia.

Por otro lado, la mayor compresión se produciría cuando se dan todas las sobrecargas de uso y el viento sopla de tal manera que produce tracción en uno de los lados y compresión en el contrario. Corresponde a que las oficinas estén llenas es hora punta y que sople el viento en cualquier dirección:

- **ELU 04:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU+ Vx+)$
- **ELU 05:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU + Vy+)$
- **ELU 06:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU + Vy-)$

Esfuerzos resultantes

Con estas condiciones, el mayor axil de compresión alcanza casi los 40.000 kN. Si se considera que esta carga, proveniente de la estructura principal y el uso, representa alrededor del 75-80% de las cargas totales del edificio, la carga real contando con instalaciones, solados, estructuras secundarias, etc. podría llegar a los 52.000 kN muy fácilmente. Los esfuerzos generados por el viento no llegan a superar nunca los producidos por las cargas gravitatorias en la fachada principal (figuran 34), por lo que no se producen tracciones en los pilares inclinados del megaframe. En las fachadas paralelas haría falta un estudio más detallado para ver si se producen en algún caso (en el modelo se producen tracciones si se aplica el Vy+), que pueden ser reales o pueden ser fruto de las aproximaciones.

Se lleva a cabo un dimensionado aproximado de los pilares inclinados de la fachada principal, que tienen estos esfuerzos:

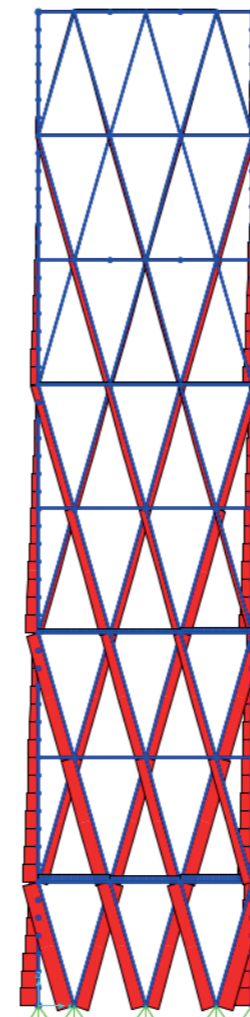
- Megalevel 1: 5.200 kN
- Megalevel 2: 11.200 kN
- Megalevel 3: 16.400 kN
- Megalevel 4: 25.000 kN
- Megalevel 5: 28.600 kN
- Megalevel 6: 39.000 kN
- Megalevel 7: 42.900 kN
- Megalevel 8: **52.000 kN**

Los pilares centrales tienen más área tributaria que los perimetrales, llegando a los **98.000 kN**

Las vigas perimetrales tienen un momento flector que se aproxima a los **2800 kN ·m**.

Dimensionado

Se aplica lo recogido en el anejo 19 del Código Estructural. Se utiliza como resistencia a compresión del hormigón la correspondiente al HA-50, aplicando un coeficiente de minoración de 1,50 (según tabla A19.2.1.), por lo que $f_{cd} = 33 \text{ N/mm}^2$. A partir de la



expresión $A_c = N_{Ed} / f_{c,d}$, se realizan tanteos con diferentes secciones rectangulares (para mantener la estructura lo más pegada a los forjados posible). No se considera que la esbeltez sea un problema porque, aunque la longitud total de los pilares inclinados sea de más de 28m, están atados en cada planta por los forjados, por lo que su altura real es de aproximadamente 3,60m.

La viga perimetral se predimensiona mediante tanteos. Primero, se determina un armado mínimo, que según el Código Estructural, es del 2,8 ‰, aunque se puede reducir por 0,65 por ser el ancho mayor de 80 cm. Con esto se procede a la elección de redondos y se tiene en cuenta su área real. Después de realiza el cálculo de $M = U \cdot z$, habiendo obtenido previamente el brazo de palanca según las dimensiones de la viga y el armado.

Se obtienen, por lo tanto unos elementos de estas dimensiones:

- Megalevel 1: pilares inclinados de 0,7 m x 0,4 m
- Megalevel 2: pilares inclinados de 0,85 x 0,5 m
- Megalevel 3: pilares inclinados de 0,9 x 0,6 m
- Megalevel 4: pilares inclinados de 1,0 m x 0,8 m
- Megalevel 5: pilares inclinados de 1,1 m x 0,9 m
- Megalevel 6: pilares inclinados de 1,2 m x 1,0 m
- Megalevel 7: pilares inclinados de 1,3 x 1,1 m
- Megalevel 8: **pilares inclinados de 1,5 m x 1,2 m**
- **Pilar interior: 1,9 m x 1,6 m**
- **Viga perimetral** de fachada principal: **1,2 m de ancho x 1,5 m de canto**

Conclusiones

Entonces, ¿podría el Leadenhall haberse hecho de hormigón?

- Desde el punto de vista de la **construcción: no**. El hormigón in situ quedaba descartado por las razones explicadas al principio del análisis. Una estructura de hormigón prefabricado tendría unas dimensiones notablemente mayores que la estructura existente de acero. Esto supone un mayor peso propio, lo que haría que levantar estas piezas requiriera de grúas más grandes y más espacio de maniobra.
- Desde el punto de vista de las **uniones: quizá**. Las uniones serían indudablemente complejas en hormigón, y no existe a día de hoy un edificio de estas características que haya elegido el hormigón prefabricado como material. Sin embargo, el Leadenhall fue pionero en su estructura, precisamente porque las uniones eran novedosas y se invirtió una enorme cantidad de dinero en estudiar algo que no se había hecho hasta entonces. Visto así, se podría invertir ese dinero en estudiar

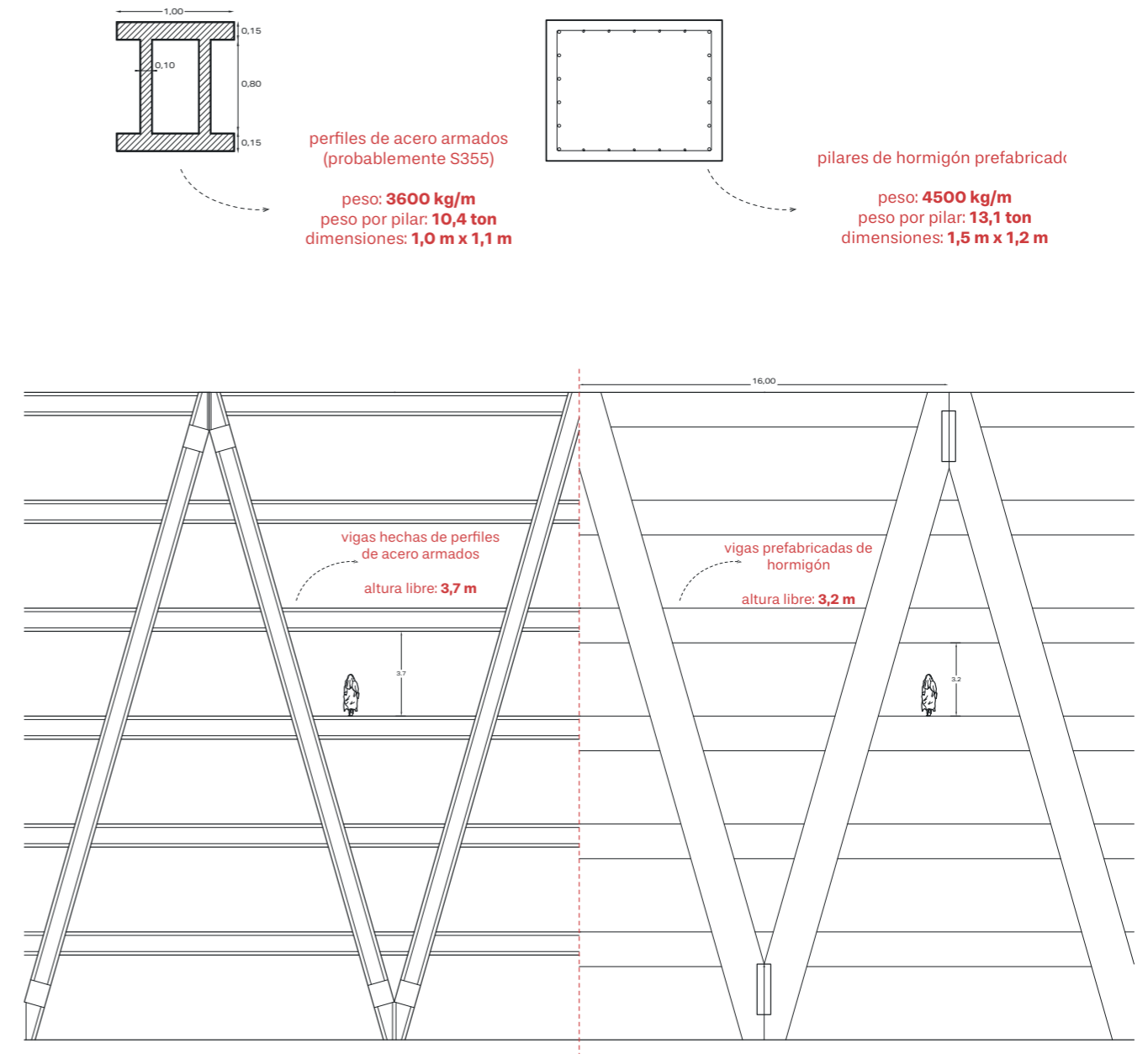


Figura 43. Comparación de dimensiones generales entre estructura de acero (izquierda) y hormigón (derecha). Elaboración propia.



uniones complejas y jamás vistas de hormigón prefabricado.

- Desde el punto de vista de los **esfuerzos: sí**. La respuesta a esto requeriría tener más información detallada sobre los subsistemas de los forjados para saber exactamente cómo transmiten las cargas y ver si en algún momento las diagonales de las fachadas cortas tienen más esfuerzos por el viento que por las cargas gravitatorias. En el caso de que hubiera tracciones, la bajísima resistencia del hormigón a tracción haría que fuera necesaria introducir elementos de hormigón pretensado.
- Desde el punto de vista de **las condiciones arquitectónicas iniciales: sí**. Es cierto que el edificio se vería muchísimo más masivo, pero la sensación de ligereza no era uno de los condicionantes del proyecto. Los pilares ocuparían más espacio, pero no hasta el punto de sacrificar la planta diáfana. La altura libre, sin embargo, se vería reducida en 0,5m, lo que puede influir mucho en la percepción del espacio. Estas decisiones quedarían en manos de los arquitectos.

Incluso aunque la tecnología del hormigón prefabricado se desarrollara exclusivamente para un Leadenhall alternativo, parece que el aspecto constructivo es el más limitante. Por eso, se concluye que **el Leadenhall no podría construirse en otro material, y que**

Figura 44. Contexto del Leadenhall. Adaptado de *Welcome to the Leadenhall Building* [Fotografía], por The Leadenhall Building City of London, s.f.

los ingenieros y arquitectos hicieron un gran trabajo en elegir una estructura que se acomodaba a las premisas arquitectónicas a la vez que las necesidades técnicas.

Influencia en la percepción y la identidad

Desde el punto de vista únicamente arquitectónico, el Leadenhall no habría perdido su esencia arquitectónica de haberse hecho en hormigón. Los elementos resistentes no habrían adquirido unas dimensiones tales que impidieran alguna de las premisas arquitectónicas. En cuanto a la percepción del espacio, definitivamente habría variado, pero el edificio seguiría siendo claramente reconocible como el Leadenhall.

Por eso, y en este caso, el **no poder construir el Leadenhall en hormigón viene más por limitaciones constructivas e intrínsecas del material que por afección a la arquitectura** o a la estética del proyecto.

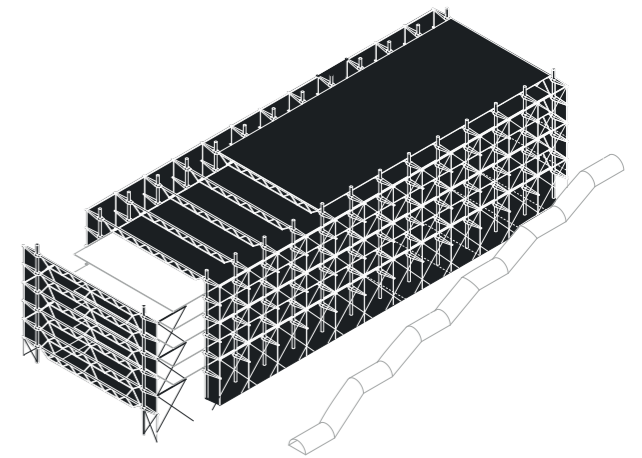
Figura 45. Fotomontaje de un Leadenhall alternativo en hormigón. Elaborado a partir de *Welcome to the Leadenhall Building* [Fotografía], por The Leadenhall Building City of London, s.f. Elaboración propia.



Centre Pompidou

"People either love it or hate it, but they always react to it".

Arquitectos	Piano + Rogers
Ingenieros estructurales	Ove Arup & Partners (Structures 3)
Lugar	París, Francia
Año	1971-1977
Superficie interior	100.000 m²
Número de plantas	Baja + 6
Altura total	42 m
Uso principal	Museo



Diseño arquitectónico

El concepto de Rogers y Piano era el de un contenedor flexible en el que todos los espacios interiores pudieran organizarse como se quisiera, y en el que todos los elementos exteriores pudieran añadirse o quitarse a lo largo de la vida útil del edificio. Toda la estructura, al igual que las conocidísimas instalaciones de colores, forma un almacén independiente en la parte exterior del edificio. En general, está pensado para adaptarse a las posibles necesidades futuras.

Retos estructurales

¿Cuáles son los grandes retos a resolver?

Respuesta corta: planta diáfana, gran luz, grandes cargas y un sistema estructural no convencional.

1 Planta diáfana - gran luz

La flexibilidad y la versatilidad era uno de los puntos principales del proyecto, en el sentido de poder utilizar el espacio de maneras muy diferentes, pero también en el de que el edificio pudiera modificarse incluso estructuralmente en el futuro (idea que generó la arquitectura, pero que no se llegó a aplicar en la estructura). Por eso, no existe ningún pilar dentro del edificio, sino que están todos fuera, en la estructura externa, sirviendo de apoyo para las cerchas. Sacar todos los pilares fuera supone que las cerchas deben salvar una luz de casi 45m.

2 Grandes cargas

El hecho de ser un edificio público y, sobre todo, que gran parte del edificio debía estar destinada a una biblioteca con grandes archivos, suponía que las cargas a soportar por la estructura eran bastante grandes.

3 Estructura no convencional

La estructura que queda dentro del edificio tenía que interactuar con la que quedaba fuera, que servía de soporte a la "3 dimensional wall". Llegar a una solución de la escala y dimensiones adecuadas fue todo un reto.

¿Cómo se transmiten las cargas verticales y horizontales al suelo?

Respuesta corta: con cerchas, pilares y cruces.

La novedad del funcionamiento estructural está más en la disposición de elementos, en su claridad y en los pequeños detalles. En las uniones y apoyos se produce una transmisión de cargas cuidadosamente pensada, como ocurre con las gerberettes, pero, a escala general, el funcionamiento es simple: las cargas gravitatorias van desde los forjados a las cerchas, y de las cerchas a los pilares. Los arriostramientos se resuelven con cruces en las fachadas largas y con elementos que conectan las cerchas en las fachadas cortas.

Gerberettes 01

Diseñadas exclusivamente para este proyecto, son necesarias para sostener la estructura externa donde se encuentran las circulaciones. Y, aún más importante, interactúan con las cerchas ayudándoles a reducir su canto.

Estructura externa 02

La necesidad proyectual de tener plantas completamente diáfanas que se adaptaran a cualquier cambio futuro suponía sacar las instalaciones y las circulaciones a la parte exterior.

Esta estructura es a la vez la fachada principal del edificio (la llamada "3 dimensional wall"), y da la impresión de ser muy ligera. En ella se integra el sistema de arriostramientos longitudinales.

Cerchas 03

Las cerchas salvan la luz de 44,8m, con unas cargas considerables (muchas de las plantas tenían un programa de biblioteca y archivo). Están dispuestas en el sentido longitudinal cada 12,8m y, aunque de lejos es imperceptible, están compuestas en realidad por dos cordones superiores y dos inferiores. Algunas diagonales también se descomponen en dos barras. Esta decisión se tomó porque dos barras juntas dan una impresión de ligereza mucho mayor que una sola de grandes dimensiones.

En las dos fachadas cortas, las cerchas se conectan entre el cordón inferior y el superior de la siguiente, excepto en la planta baja, donde el arriostramiento se realiza mediante cruces colocadas en la estructura externa.

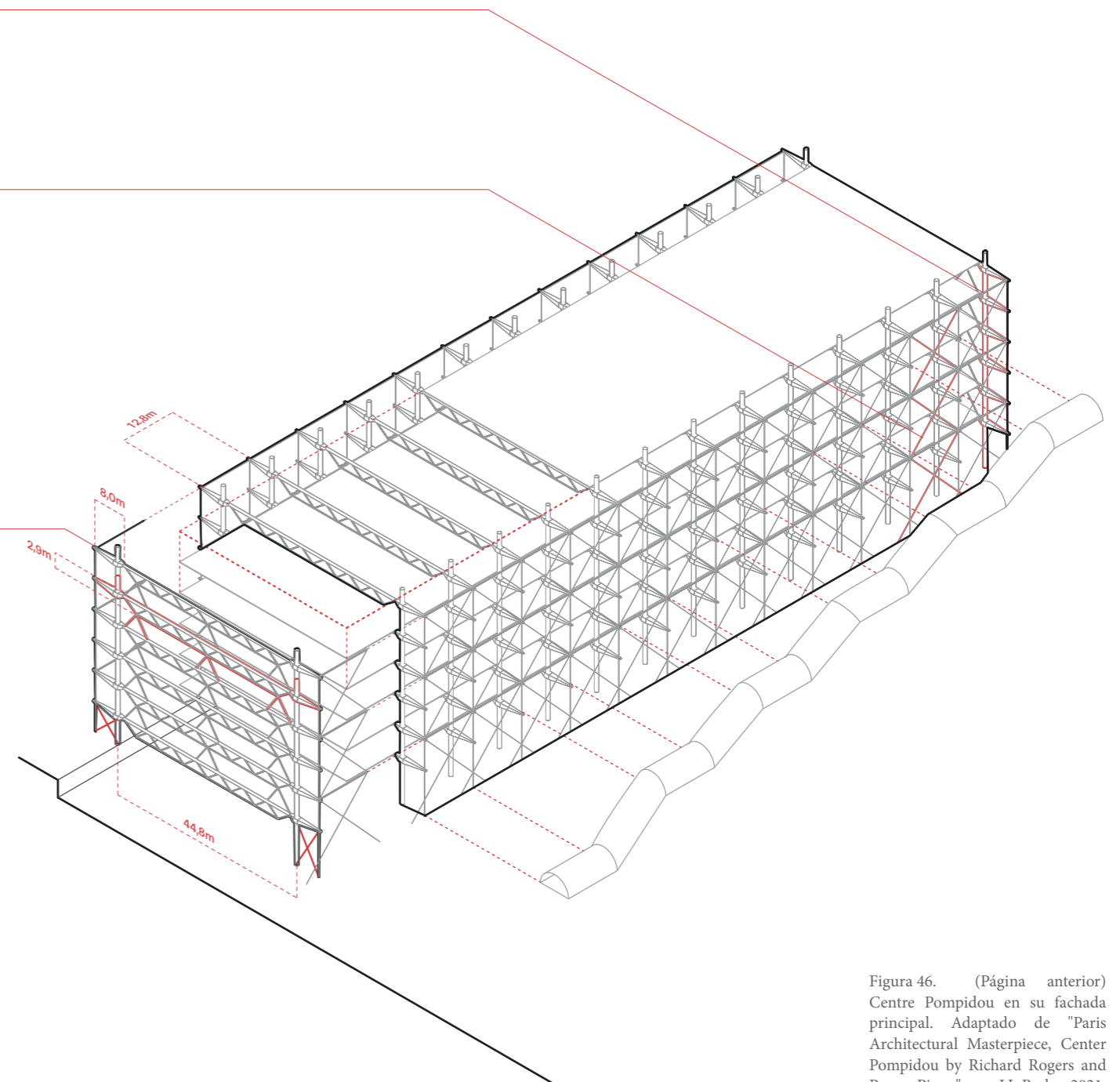
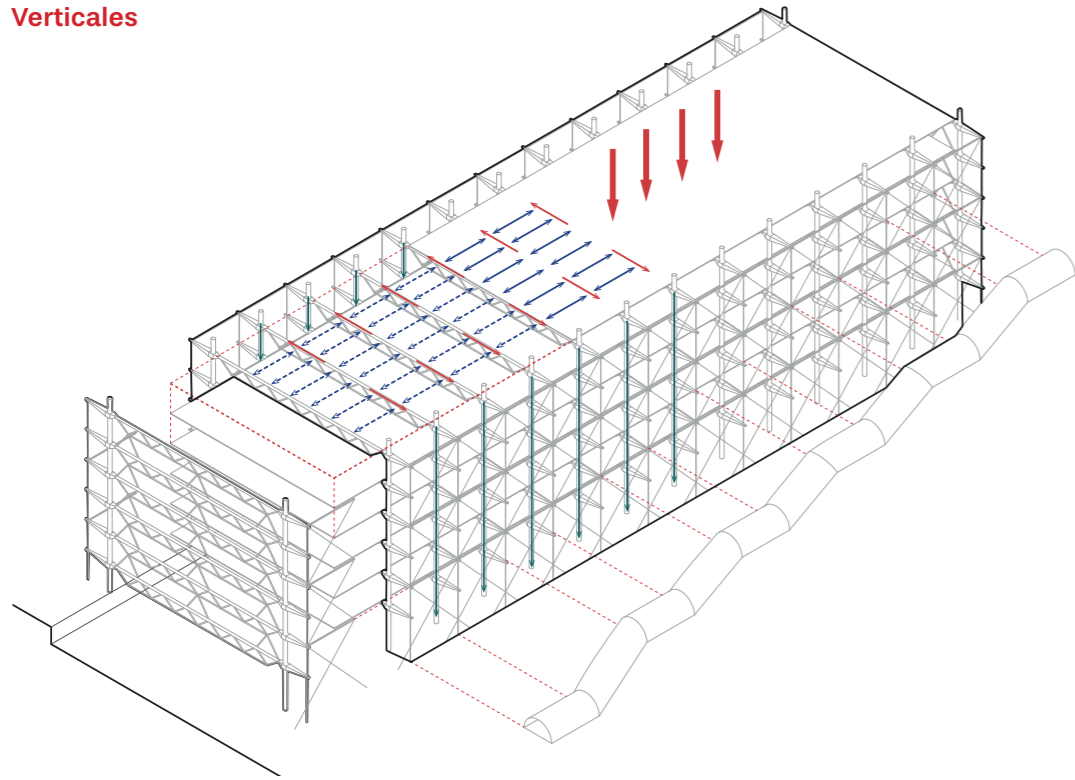


Figura 46. (Página anterior) Centre Pompidou en su fachada principal. Adaptado de "Paris Architectural Masterpiece, Center Pompidou by Richard Rogers and Renzo Piano", por J.J. Barba, 2021, Metalocus.

Figura 47. Esquema de los elementos estructurales principales. Elaboración propia.

Transmisión de cargas

Verticales



Horizontales

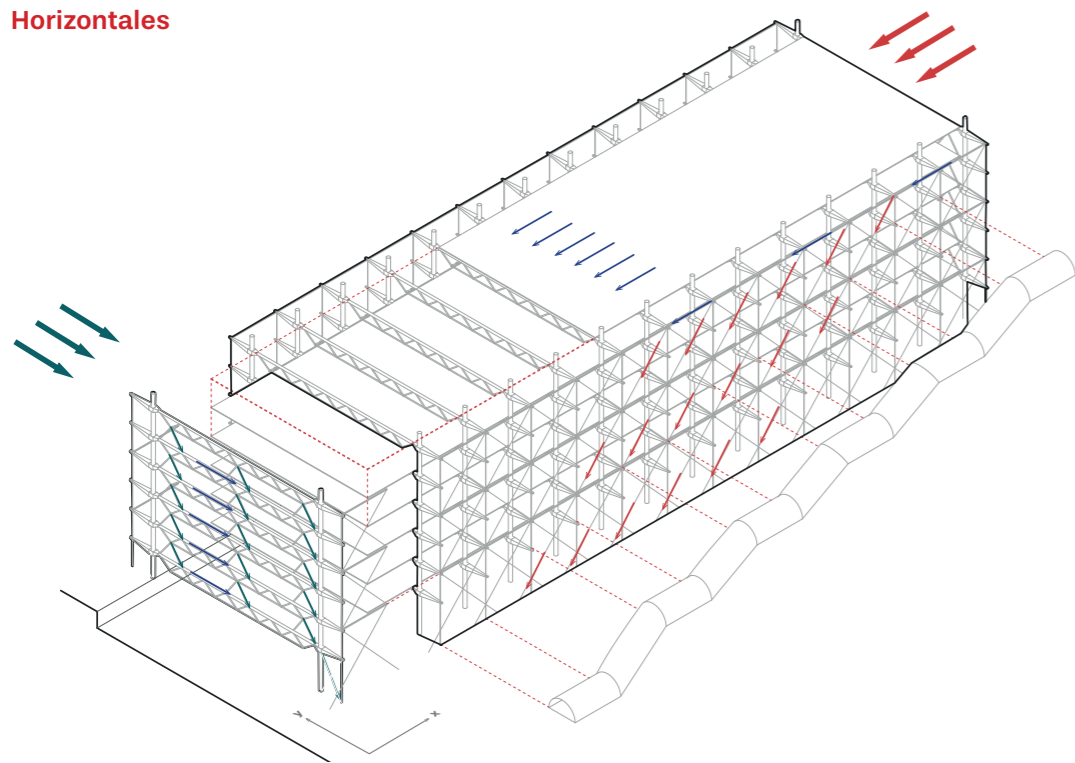


Figura 48. Esquema de la transmisión de cargas verticales y horizontales. Elaboración propia.

Proceso constructivo

Pensada como un "Mecanoo", gran parte de la estructura llegaba montada a la obra, donde simplemente se ensamblaban unas piezas con otras. Como suele ocurrir en proyectos con elementos prefabricados en el centro de grandes ciudades, las grandes cerchas de casi 45m se transportaban y levantaban de noche. No existía, como en el Leadenhall, una parcela con condiciones difíciles, así que el transporte y el espacio en obra no fue un problema.

Las gerberettes se diseñaron, ensayaron y fabricaron exclusivamente para este proyecto. La empresa alemana Krupps se encargó de hacer los primeros prototipos de las gerberettes. Los ensayos iniciales revelaron que las piezas no resistían ni la mitad de carga para la que fueron diseñadas (Gameiro, 2017). Resultó que los ingenieros, en su mayoría ingleses, habían dado especificaciones muy precisas de cómo debían fabricarse y ensayarse las piezas, escritas en francés, a fabricantes alemanes. Peter Rice y su equipo viajaron a Alemania y encontraron el por qué de ese inesperado resultado en los ensayos. Sin embargo, no fueron capaces de convencer a los fabricantes, que preferían seguir utilizando los estándares alemanes de fabricación. Al final, mediante un intermediario especialista en mecánica de materiales de la Universidad de Stuttgart, se hizo una segunda "tanda" de gerberettes, cuya resistencia resultó ser exactamente la esperada.



Figura 49. Pompidou en construcción. Adaptado de "46 años del Centre Pompidou", por B. Gómez-Pimienta, 2023, Arquine.



Figura 50. Cercha siendo transportada a la obra del Centre Pompidou. Adaptado de "Paris Architectural Masterpiece, Center Pompidou by Richard Rogers and Renzo Piano", por J.J. Barba, 2021, Metalocus.

Funcionamiento estructural: gerberettes

La propuesta de una estructura con cerchas y tirantes no era una novedad, pues en los años 70 se habían construido ya muchos puentes con esta solución (Ezquerro, 2017). Sin embargo, al ser puentes solían tener un solo forjado, siendo el Pompidou el primero en aplicar este sistema para una estructura de varias alturas y, además, a una escala humana y no de puente. ¿Cómo funciona este sistema y por qué es tan especial?

Las cerchas centrales tienen una luz muy considerable (casi 45 metros), y soportan un ancho tributario de 12,80m sobre los que gravita una gran carga (exposiciones de pública concurrencia, bibliotecas o archivos). De manera convencional, esta gran luz de 48 metros entre pilares se podría salvar con una viga en celosía biapoyada. Esto requeriría una cercha de gran canto y unas barras de sección considerable. El Pompidou estaba limitado en altura (Gameiro, 2017), así que reducir el canto de todas las cerchas podía suponer ganar una planta más en el edificio. Los ingenieros estructurales optaron entonces por hacer un sistema basado en las vigas Gerber, de ahí el nombre de "gerberettes".

Una viga Gerber es básicamente una **viga continua subdividida a través de articulaciones**. Los nuevos tramos que se crean hacen que la viga pase de ser hiperestática a ser isostática, pues pasa de ser una viga continua de varios vanos a convertirse, por ejemplo, en dos vigas extremas que tienen un voladizo y una viga biapoyada en el vano central. Dado que el momento en las articulaciones siempre es cero, se puede variar el comportamiento de la viga y sus diagramas de momentos ajustando la posición de las articulaciones de manera que convenga más al proyecto. En general, "en un vano se sitúan rótulas, y en el siguiente no, siendo el número máximo de articulaciones por vano de dos, con la excepción de que en los extremos sólo se puede situar una" (Ezquerro, 2016). En el caso del Pompidou, **se produce una articulación entre la gerberette (que es en realidad una especie de balancín) y el pilar, y también entre la gerberette y la cercha**. La gerberette tiene mucha más sección en su unión con el pilar porque es donde se produce el mayor momento.



Figura 51. Montaje de las cerchas. Adaptado de *Fixation d'une poutre à une gerberette* [Fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f.

Figura 52. Unión entre las gerberettes y el pilar. Adaptado de *Le noeud poteau - poutre - gerberette - tirant* [Fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f.

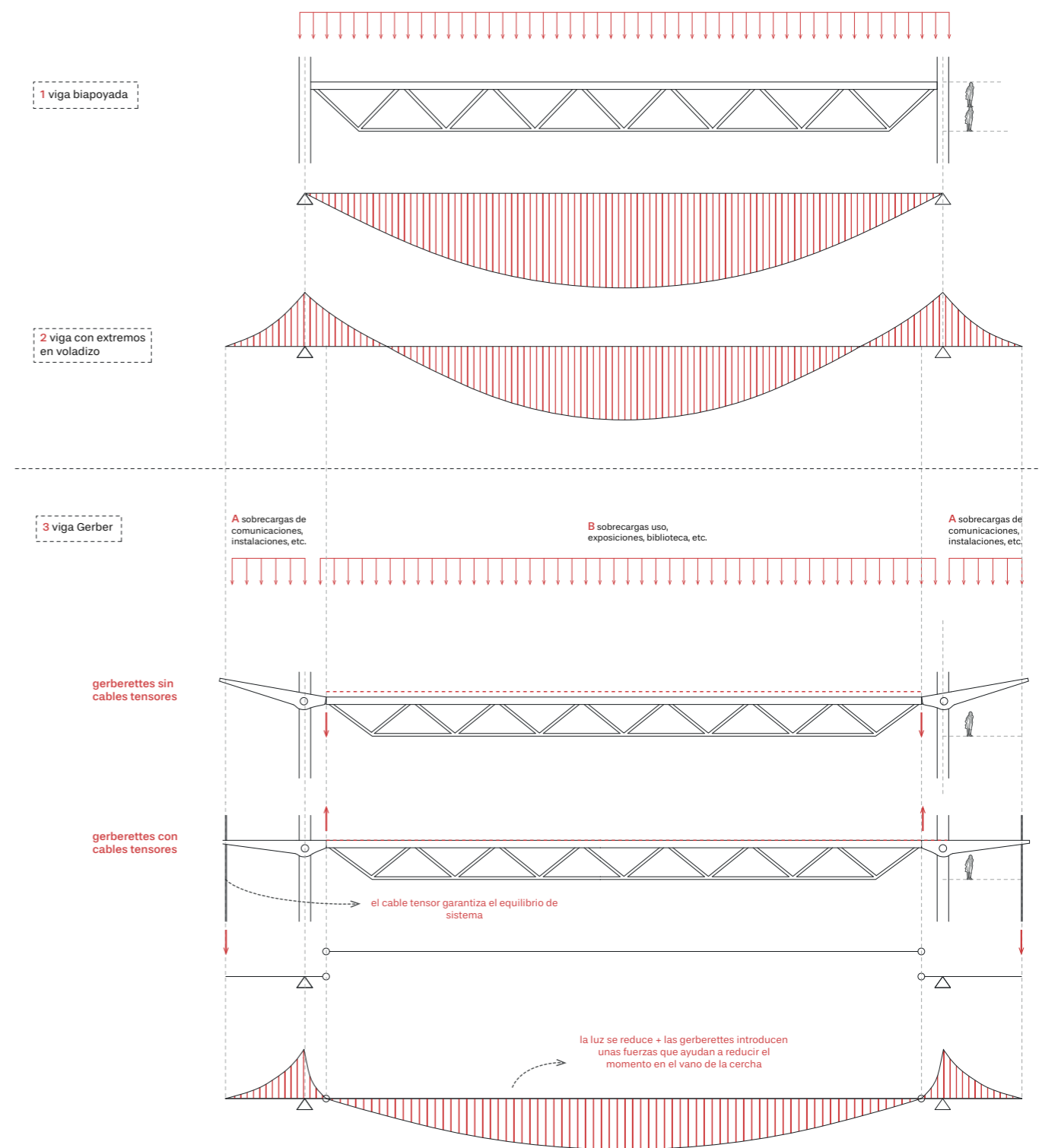


Figura 53. Funcionamiento de vigas según distintas disposiciones de apoyo. Elaboración propia.

Hay una peculiaridad de las cerchas que llama bastante la atención: **hay diagonales mucho más finas que otras**. La razón es bastante simple: hay diagonales a tracción y diagonales a compresión. Ambos esfuerzos se resisten únicamente con el área del elemento, pero la compresión tiene un efecto que la tracción no tiene, **el pandeo**. Este fenómeno, que se da sólo en elementos comprimidos, se controla mejor cuando más alejada esté el área resistente del centro de gravedad de la sección. Por eso, **las diagonales traccionadas tienen todo su área concentrada y parecen ser mucha más finas, mientras que las diagonales que pueden sufrir pandeo son tubos huecos** que tendrán aproximadamente el mismo área, pero concentrada en la zona externa, dando la impresión de que son mucho más grandes.



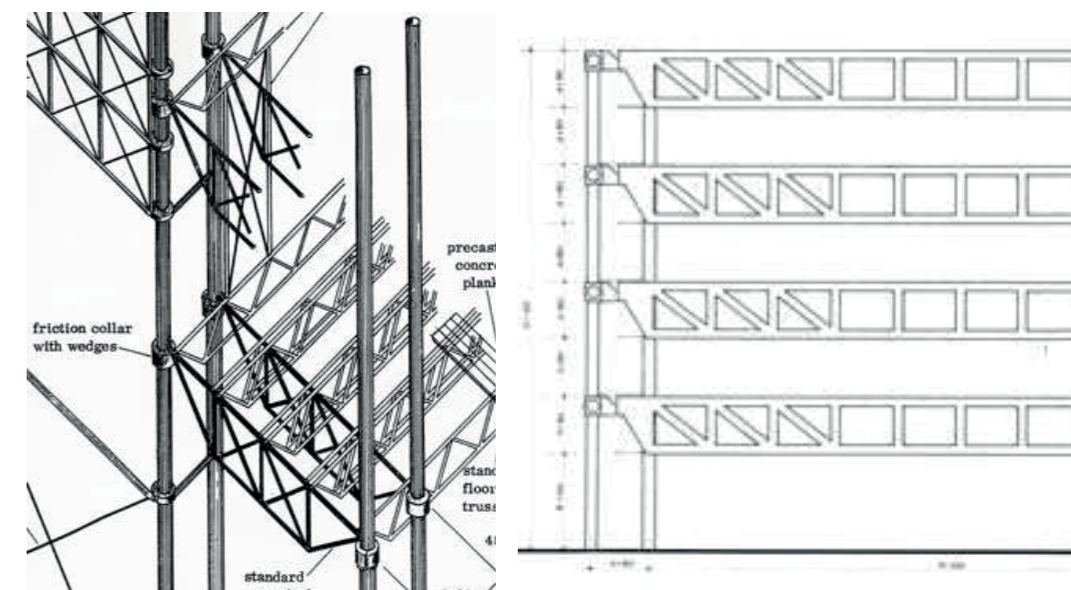
Evolución y posibilidades de la gerberette

Desde el inicio del proyecto en 1971 hasta que se comenzaron a fabricar las piezas a finales de 1973, las "gerberettes" pasaron por un proceso muy largo y complejo. Éste comenzó con los llamados "friction collars" (figura 54), unas uniones que pretendían hacer posible que se movieran los forjados en altura. La decisión de hacer toda una estructura de acero venía, entre otras cosas, de que Ted Happold, uno de los principales ingenieros, consideraba que "la solución de una estructura metálica interesaría a Jean Prouvé, uno de los miembros principales del jurado de la competición" (Hamzeian, 2018)

El proceso comenzó con dos ideas arquitectónicas principales: el hecho de que se pudiera modificar la posición de los forjados para variar la altura de cada piso, y que las fachadas fueran "paredes en 3 dimensiones". **Mientras que la arquitectura que nació de estas ideas se mantuvo prácticamente igual de principio a fin, la estructura sufrió muchos cambios.**

La primera propuesta del equipo de Structures 3, la que se presentó al concurso, se basaba en una unión móvil entre las cerchas y los pilares, que estaría hecha de fundición de acero (figura 54).

Figura 54. Fotografía original de la colocación de los forjados. Unión entre las gerberettes y el pilar. Adaptado de *Pose des planchers* [Fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f.



Tras la victoria en el concurso, se comenzaron a intercambiar ideas con la delegación establecida para la realización del entonces llamado Centre Beaubourg. Uno de los puntos principales en las reuniones fue la preocupación por la viabilidad de este sistema de forjados móviles. Fue en esta fase en la que se empezaron a incluir las instalaciones y las galerías externas. Se introdujeron entonces **"pares de vigas [parcialmente] Vierendeel"**¹² que median 51 x 4,80m [...] y que se apoyaban en unas vigas ancladas a los dos pilares ("tube struts") de la fachada ("3 dimensional wall") (Hamzeian, 2018). Esta disposición de vigas Vierendeel que necesitaba una viga especial para apoyarse complicaba mucho el detalle del "friction collar", lo que llevó a que en octubre de 1971 Rogers y Piano **renunciaran definitivamente a los forjados móviles.**

En los dibujos preparados para el anteproyecto a finales del año 71, en los que se adoptada esta solución estructural, el Centre Beaubourg había cobrado una imagen colosal y monumental, muy lejana de la ligereza con la que se ve el Pompidou a día de hoy. Peter Rice fue quien criticó el camino que se había tomado y quien impulsó que se **volviera a la idea que fue presentada a la competición**. Con esto, y con el rechazo de esta solución por la Délégation, **las cerchas Vierendeel fueron sustituidas por cerchas Warren**, que eran además más fáciles de integrar con las instalaciones.

La introducción del sistema Gerber fue propuesto por Lennart Gurt (Hamzeian, 2018), uno de los ingenieros del equipo. Con esta solución, los pilares que estaban en la línea exterior de la fachada pasaban a ser los tirantes que conocemos hoy en día. Aún así, se desarrolló una última propuesta antes de tomar la decisión de elegir el sistema Gerber, una que se basaba en cerchas tradicionales y unos voladizos tubulares que sostenían las galerías de comunicaciones (figura 56). En esta versión, la línea exterior de pilares se mantuvo únicamente para preservar el aspecto de la fachada tridimensional.

Figura 55. Detalle de los forjados incluido en los planos de la competición. Adaptado de *Structural detail of the floor slab*, B. Hamzeian, 2018.

Figura 56. Sección esquemática de la solución con vigas parcialmente Vierendeel. Adaptado de *Schematic section of the first structural solution with Vierendeel trusses*, B. Hamzeian, 2018.

.....
12 El autor las llama vigas Vierendeel, pero lo son sólo parcialmente, en la zona del centro. En los extremos, tienen diagonales, cuando las vigas Vierendeel están precisamente caracterizadas por la ausencia de ellas.

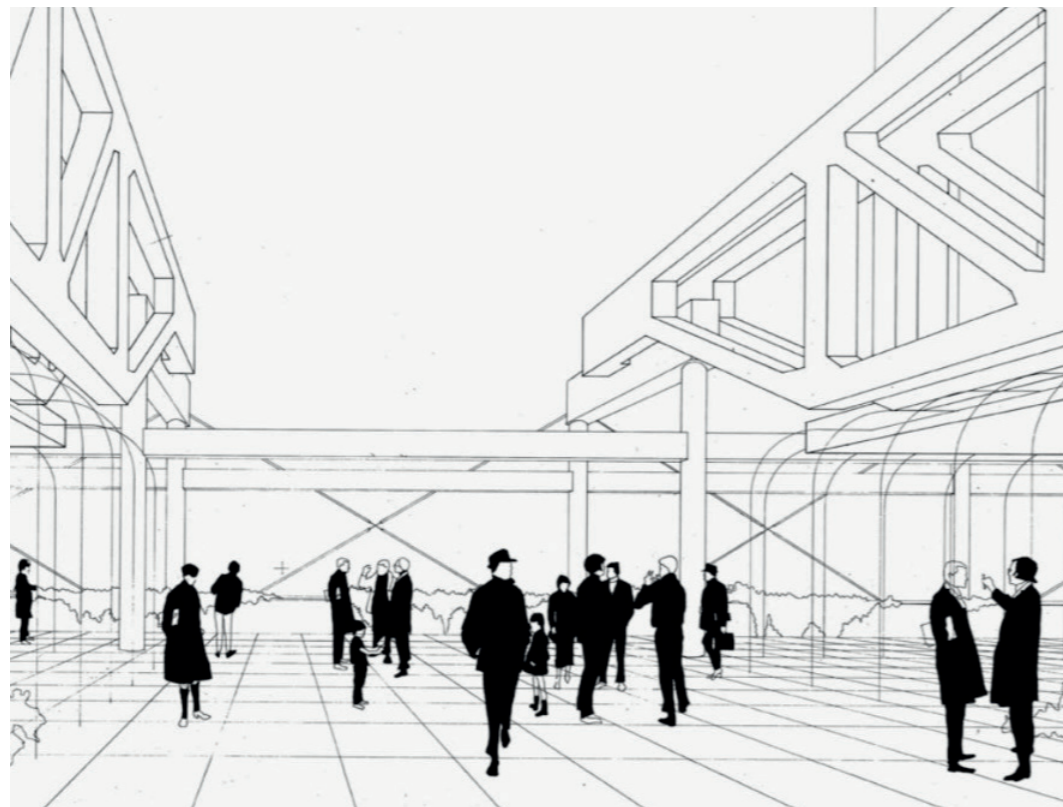
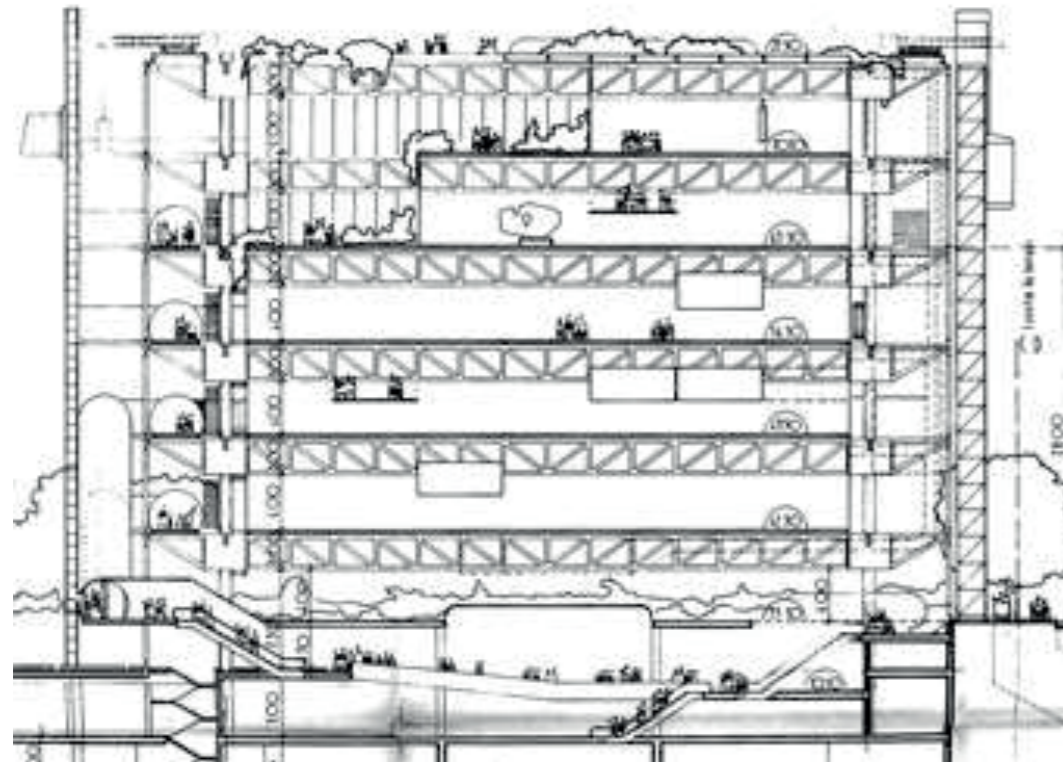


Figura 57. Sección esquemática de la solución con cerchas convencionales. Adaptado de *Structural solution based on a traditional truss and lateral brackets without the Gerber system*, por B. Hamzeian, 2018.

Figura 58. Perspectiva presentada al concurso. Adaptado de *Première mise au point du projet*, por B. Hamzeian, 2022.

En mayo de 1972, el equipo debía presentar una maqueta a escala 1:500 a la Délégation. Este fue un momento decisivo, pues fue donde verdaderamente **se introdujo la "pieza especial"** que funcionaba basada en el principio Gerber. Esta pieza, concebida como un voladizo, pero que funciona como una especie de balancín, hacía que línea de pilares en fachada se transformara de nuevo en tirantes y jugara un papel crucial en la estabilidad del conjunto. En esta primera maqueta, lo que más tarde sería la gerberette eran simplemente dos piezas rectangulares de sección constante, derivada de aquella disposición de vigas Vierendeel que intentaba resolver el anclaje de los forjados a los pilares tubulares.

A partir de ahí, el principio general de la estructura no se modificó, pero la pieza especial, ya conocida como "gerberette", sufrió muchos cambios formales basados en conseguir "la forma óptima para el molde de fundición que había estado preocupando a Rice" (Hamzeian, 2018). Así, durante más de un año (sin contar los ensayos mecánicos que llevó a cabo Krupps), muchos de los esfuerzos se dedicaron en refinar la gerberette estructural y arquitectónicamente, que se fue modificando hasta convertirse en los que muchos califican de una escultura.

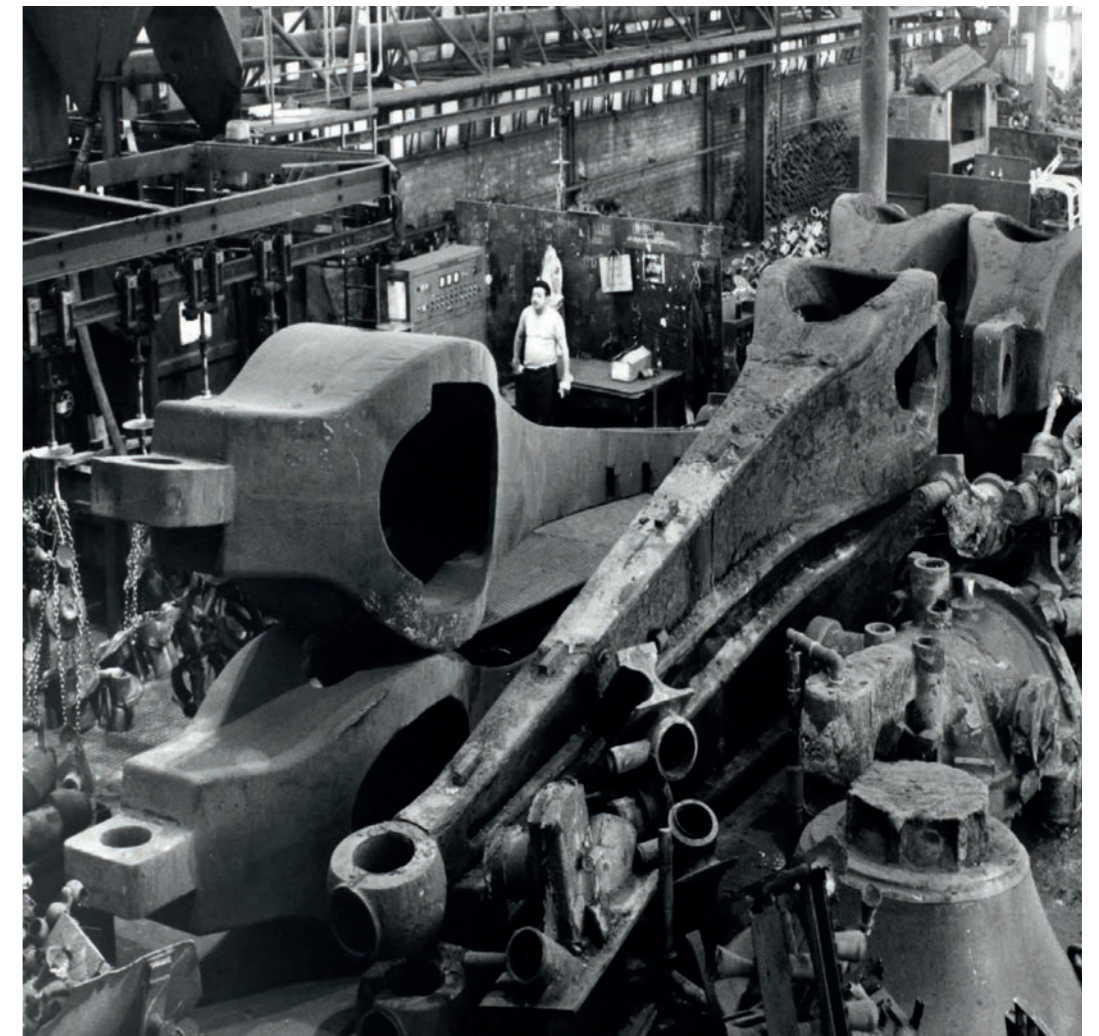


Figura 59. Fabricación de las gerberettes. Adaptado de "Centre Pompidou is high-tech architecture's inside-out landmark", por L. Crook, 2019, *Dezeen*.

Protección contra incendios en el Pompidou

Tanto el acero como la madera requieren de medidas para garantizar que la estructura resistirá el tiempo suficiente como para permitir la evacuación de los ocupantes en caso de incendio. Margaret Law, ingeniera de protección contra el fuego de Arup, que participó en las fases finales del proyecto del Pompidou, ha publicado varios artículos sobre el sistema que se eligió en este inusual proyecto. En *Design and construction of the Centre National d'Art et de Culture Georges Pompidou* (1980), explica que en el año 74, cuando se unió al equipo del proyecto, había mucha preocupación por la seguridad de los ocupantes del Pompidou, ya que se habían producido incendios recientes con víctimas mortales. Además, el edificio estaba pensado para albergar importantes obras de arte que tenían que ser protegidas. Así explica Law las medidas concretas que se tomaron para la estructura:

"Para la estructura interna, se adoptó un enfoque bastante convencional [...]: **revestimientos ignífugos**. El único problema estaba en encontrar espesores [de recubrimiento] que no taparan la forma de la estructura."

Para la estructura externa (gerberettes, tirantes, arriostramientos...), dice que:

"La exposición al fuego no era la estándar, sino una **calculada para estructuras que están fuera del edificio**, donde pueden enfriarse con el aire exterior y calentarse a la vez con el fuego y las llamas de las ventanas. [Las medidas de protección fueron variadas]: los **pilares principales tienen agua** circulando por su interior, existen rociadores de agua en algunos elementos, y las gerberettes estaban protegidas por paneles [ignífugos] en fachada. **Otra medida de protección fue la separación** [entre la fachada y la estructura exterior], siendo la distancia de casi 8m. Por la **compartimentación** del edificio, podíamos asumir que sólo un parte del edificio se calentaría, y por lo tanto se sacrificaría parte de la estructura exterior sin comprometer la estabilidad global del edificio."

En este mismo documento da a entender también que fue muy difícil que las autoridades aceptaran este tipo de medidas, pero que creía que en el futuro, la protección contra incendios permitiría muchas más posibilidades.

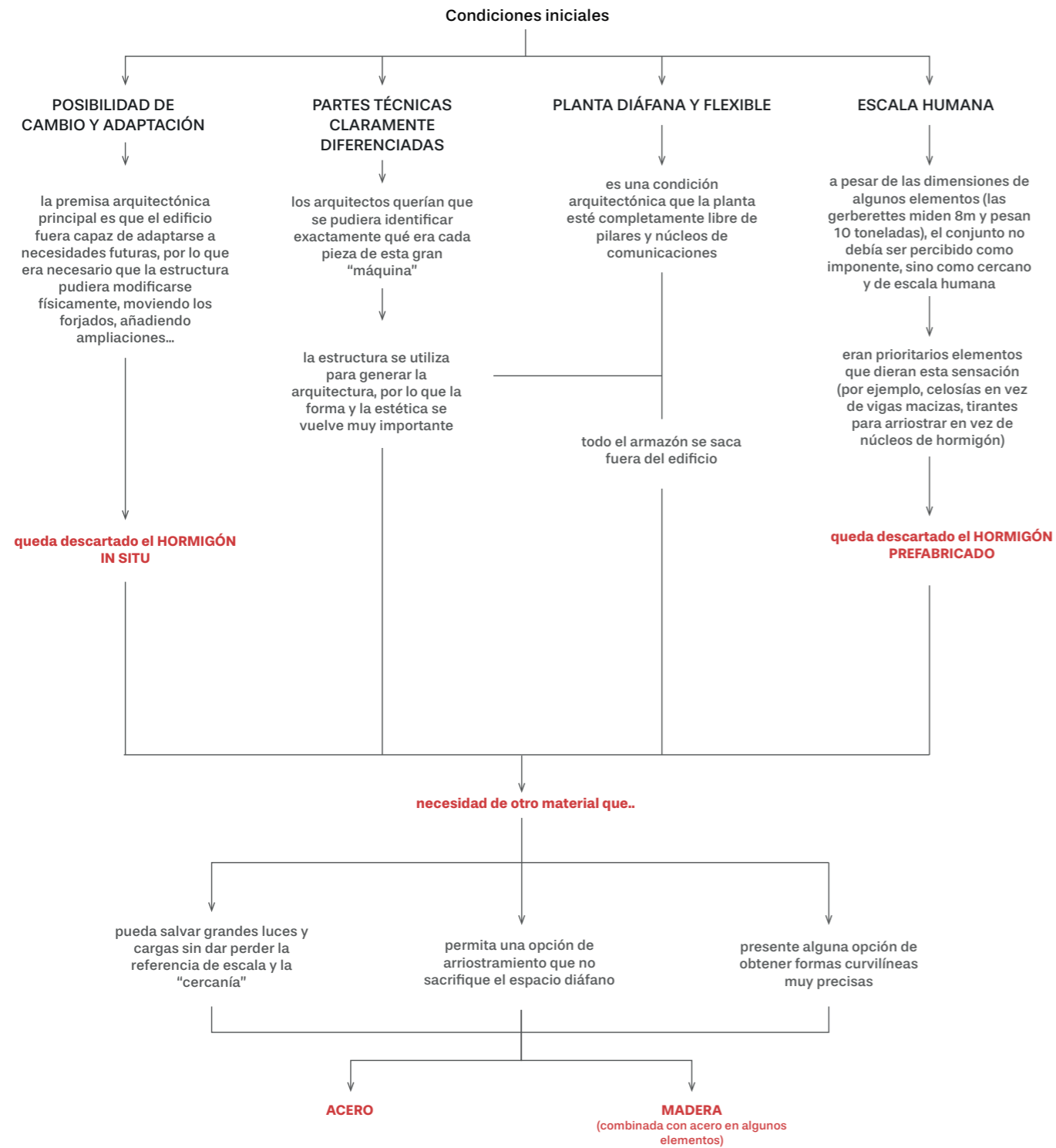
Actualmente, en España, el CTE DB-SI 6 recoge sólo soluciones para elementos interiores y soluciones convencionales. Permite utilizar otros procedimientos, como los desarrollados en la UNE-EN 1991-1-2 para determinar la resistencia al fuego de los elementos estructurales exteriores. La única referencia a este aspecto se da en el DB-SI 6: "Los elementos exteriores están, en general, sometidos a una acción térmica menos severa, por lo que su resistencia al fuego puede ser sensiblemente menor".



Figura 60. Margaret Law. Adaptado de *Margaret Law Fire Safety Awards* [Fotografía], por Arup, 2024.

El Pompidou en madera

¿Podrían Piano y Rogers haber diseñado el Pompidou con una estructura de madera, manteniendo los elementos estructurales y el funcionamiento tal y cómo están diseñados? Para responder a eso, se analizan los siguientes aspectos.



Es evidente que la madera podría haberse utilizado para construir unas cerchas muy parecidas a las existentes, pero hay otras partes de la estructura que requieren un poco más de análisis para determinar si esta habría sido una buena opción como material. En este proceso, es importante tener en cuenta que "la madera ha encontrado en el acero el complemento perfecto para multiplicar su capacidad mecánica, especialmente en uniones, donde el material puede presentar limitaciones" (Linares, 2024). Y no sólo en las uniones, también en elementos altamente traccionados, como cables para arriostramiento o, en el caso del Pompidou, los tirantes del extremo de las gerberettes. Por eso, parece que no tiene sentido pensar en un Pompidou exclusivamente de madera, sino más bien en una **combinación de acero y madera**.

El avance de la tecnología

En los años 70, cuando el edificio fue diseñado, el **GLT (glue laminated timber)** aún no se había desarrollado como material estructural. Su uso comenzó a extenderse por Europa a partir de los años 2000, así que en el momento de construcción de este edificio, no habría sido una opción. Ahora, más de 50 años después, no sólo es el CLT un material relativamente común, sino que existen además sistemas de control numérico computerizado (CNC por sus siglas en inglés) que permiten obtener geometrías personalizadas y precisas en madera. Con estos sistemas y el avance de la tecnología computacional y los modelos 3D se podrían conseguir, a día de hoy, unas piezas de madera con el mismo principio que las gerberettes.

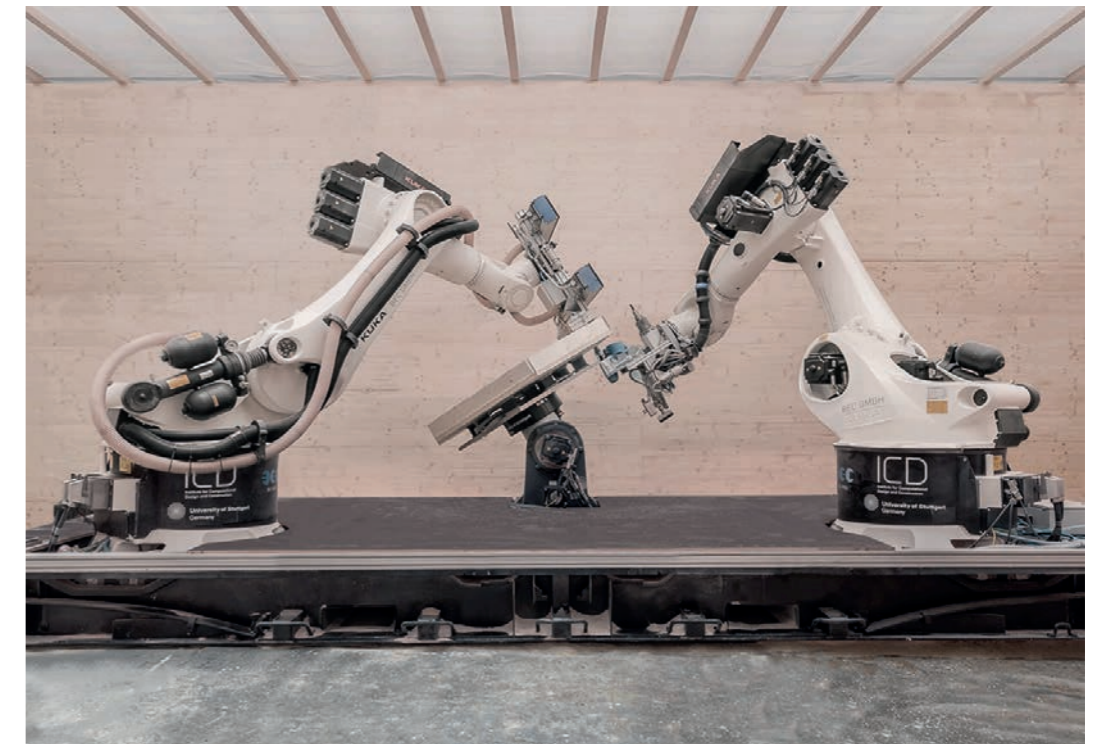


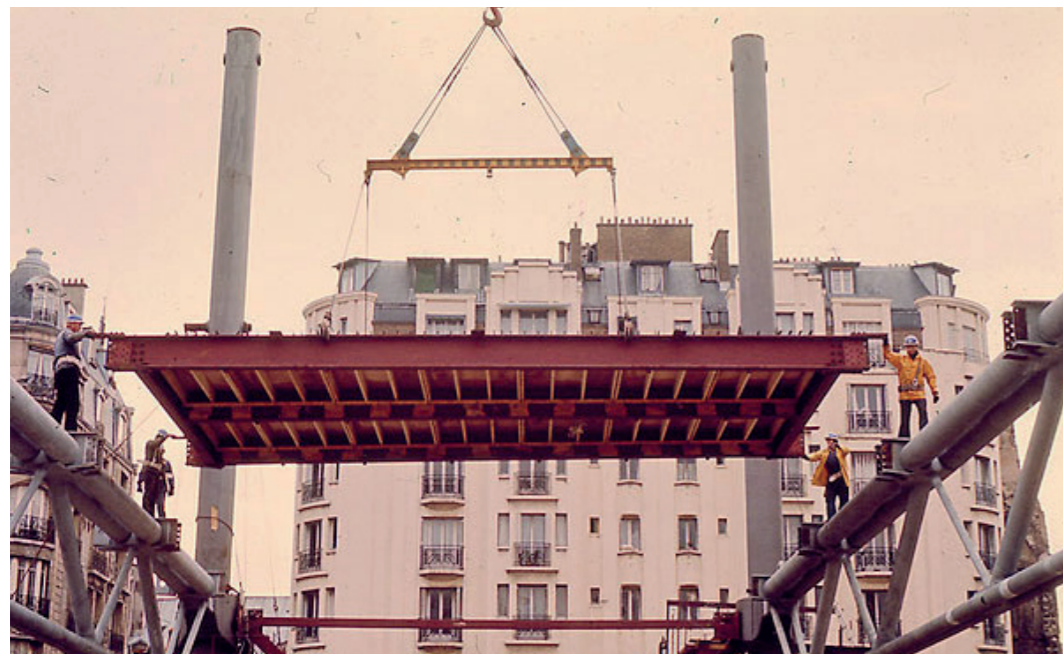
Figura 61. Brazos robóticos que fabricaron las piezas de madera laminada del BUGA Wood Pavillion, en la Universidad de Stuttgart en 2019. Adaptado de *Robotic Fabrication by ICD/ITKE, University of Stuttgart*, A. Menges, 2019.

Dimensiones

Con la tecnología actual, el Pompidou podría ser de madera, si se evalúa desde un punto de vista constructivo. ¿Permitirían las características de la madera que esta nueva estructura fuera compatible con la arquitectura? De nuevo, se llevan a cabo cálculos generales y aproximados, que permitan dar una idea general, esta vez con una peculiaridad: ¿cómo sería la estructura de madera sin protección al fuego convencional? ¿Cómo sería con ella?

Bases de cálculo

1. Áreas tributarias y entrega de cargas



Los forjados tienen una subestructura unidireccional que entrega cargas en los nudos del cordón superior de las cerchas (hay en realidad dos cordones superiores, y dos piezas de entrega, una por cordón). Se presupone que los paneles de CLT de los forjados tendrían una subestructura parecida a la existente, pero de madera. Se simplificará la geometría considerando que hay un solo cordón superior y un solo nudo al que se entrega la carga de ambos lados de la cercha, tomando cargas puntuales y no cargas distribuidas como normalmente se hace con los forjados.

La separación entre cerchas es de 12,80m y la distancia entre nudos de una misma cercha es de 6,25m. Por lo tanto, cada nudo recibirá de área tributaria:

- Nudos centrales de cerchas centrales: $12,80\text{m} \times 6,25\text{ m} = 80\text{ m}^2$
- Nudos extremos de cerchas centrales: $12,80\text{m} \times 3,125\text{ m} = 40\text{ m}^2$
- Nudos centrales de cerchas extremas: $6,40\text{m} \times 6,25\text{ m} = 40\text{ m}^2$
- Nudos extremos de cerchas extremas: $6,40\text{m} \times 3,125\text{ m} = 20\text{ m}^2$

La parte de las gerberettes, que recibe cargas de las comunicaciones, instalaciones, etc. sí se considerará con carga uniformemente distribuida, e igual en todas ellas.

Figura 62. Fotografía original de la colocación de los forjados. Adaptado de *Pose des planchers* [Fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f.

2. Acciones consideradas

- **PPO.** Peso propio de los elementos estructurales. Se realizará un predimensionado para poder tener en cuenta el peso propio, que se ajusta tras la obtención de esfuerzos en la estructura.
- **PP1.** Peso propio de los elementos constructivos. Para considerar el peso de los forjados, se utiliza un catálogo de la marca Egoïn¹³, en concreto los paneles contralaminados ECO CLT LIGHT, pensados para aligerar hasta en un 45% el peso de los forjados, y cuya luz máxima es de 14m. Se escoge en concreto el panel ECO CLT 200 A, con un peso propio de $0,6\text{ kN/m}^2$.
- **SU1.** Sobrecarga de uso correspondiente a pública concurrencia (categoría de uso C3): fijada en 5 kN/m^2 . Según el mismo documento, se podrá reducir la carga aplicada sobre elementos horizontales por un factor de 0,9 en aquellos casos en los que la superficie tributaria sea mayor o igual a 25 m^2 y de 0,8 si la superficie tributaria es mayor o igual a 50 m^2 .
- **SU2.** Sobrecarga correspondiente a las instalaciones. Aunque sea algo que está siempre presente, su aspecto cambiante (a veces las conducciones llevan más o menos agua, por ejemplo) hace que se consideren como cargas variables a falta de datos más precisos. Se consideran $2,0\text{ kN/m}^2$.
- **Vx+, Vx-, Vy+, Vy-.** Acciones de viento: por la diferencia de relación entre la altura y la longitud de ambas fachadas, se obtiene, aplicando el DB SE-AE y su Anejo D:
 - Fachada sur (corta): presión de $+1,15\text{ kN/m}^2$ en V_{x+} y succión de $-1,00\text{ kN/m}^2$ en V_{x-}
 - Fachada norte (corta): succión de $+1,00\text{ kN/m}^2$ en V_{x+} y presión de $-1,15\text{ kN/m}^2$ en V_{x-}
 - Fachada oeste (larga): presión de $+1,15\text{ kN/m}^2$ en V_{y+} y succión de $-0,70\text{ kN/m}^2$ en V_{y-}
 - Fachada este (larga): succión de $+0,70\text{ kN/m}^2$ en V_{y+} y presión de $-1,15\text{ kN/m}^2$ en V_{y-}
 Se aplica a nivel del primer forjado una carga distribuida equivalente a 14m de altura (10,5m de la planta baja y 3,5m de la superior,) a nivel del segundo, tercero, cuarto y quinto la equivalente a 7,0m y a nivel del último la equivalente a 3,5m.

Para realizar cálculos más detallados, se podrían incluir otras sobrecargas más específicas, como la correspondiente a la zona de biblioteca, o tener en cuenta el peso de los elementos en exposición, como maquetas o estatuas, si fuera necesario.

4. Combinaciones de acciones

El viento en este caso no es una carga de valor elevado (lo cual no significa que sea despreciable); las sobrecargas, sin embargo, sí lo son. Por eso, a priori, es muy difícil que las tracciones que pueda producir en viento superen a las cargas verticales producidas por los pesos propios y las sobrecargas de uso. Aún así, estas combinaciones se incluyen en el modelo de cálculo.

Al hacer este modelo, se ha tenido especial cuidado en abstraer correctamente cada elemento y su unión con el resto (que los tensores sólo tengan tracción, que se produzca una articulación entre las gerberettes y las cerchas, etc).

Se consideran las siguientes combinaciones, teniendo en cuenta que el edificio es simétrico en forma y cargas, por lo que V_{x+} producirá el mismo efecto que V_{x-} , como también será igual el efecto de V_{y+} y V_{y-} :

- **ELU 01:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot V_{x+}$
- **ELU 02:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot V_{y+}$
- **ELU 03:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU1+SU2+V_{x+})$
- **ELU 04:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU1+SU2+V_{y+})$

3. Coeficientes parciales de seguridad

Es importante mencionar que la normativa usada en Francia para las estructuras de madera es la norma UNE-EN 1995 1-1, de la que procede directamente el Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera utilizado en España. Las bases de cálculo que se recogen en ambos son idénticos, por lo que se usa indistintamente uno y otro para estos cálculos aproximados.

Obtener los coeficientes de seguridad para estructuras de madera es algo más complejo que mayorar las cargas y minorar la resistencia del material. La madera, a diferencia de otros materiales y por su condición anisótropa, tiene diferentes valores de resistencia según el esfuerzo al que esté sometida y la dirección en la que éste se dé. Además, el DB SE-M recoge diferentes resistencias según si la estructura está hecha con madera maciza, madera laminada encolada, madera microlaminada, etc. Para este caso, se escoge **madera laminada encolada (glulam) para las cerchas y los pilares, y paneles CLT para los forjados.**

El valor de cálculo de la resistencia del material para distintos esfuerzos se obtiene mediante: $X_d = k_{mod} \cdot (X_k / \gamma_M)$.

X_k corresponde al valor característico de resistencia al tipo de esfuerzo que se esté considerando

k_{mod} factor que depende de las cargas (concretamente de su clase de duración y su clase de servicio)

γ_M coeficiente parcial de seguridad que se aplica según el tipo de madera utilizado

- **k_{mod} :** los pesos propios corresponden a la clase de duración permanente, las sobrecargas de uso a la clase media y las acciones de viento a la clase corta. Para definir la clase de servicio, se tiene en cuenta que algunos de los elementos, como

los forjados, se encuentran siempre en un ambiente interior, algunas cerchas están dentro del edificio y otras fuera, y los pilares se encuentran siempre al exterior. Para mayor simplicidad, se considera que, si la madera se protege contra las acciones climáticas adecuadamente, todos los elementos se pueden considerar clase de servicio 2. Según lo anterior, el valor de k_{mod} para los pesos propios sería de 0,60, 0,80 para las sobrecargas de uso y 0,90 para el viento. Sin embargo, "si una combinación de acciones incluye acciones pertenecientes a diferentes clases de duración, el factor k_{mod} deberá elegirse como el correspondiente a la acción de más corta duración". Por lo tanto, $k_{mod}=0,9$.

- **γ_M :** para el GLT (glulam) $\gamma_M = 1,25$ y para el CLT, $\gamma_M = 1,20$

Los valores resistentes característicos de la madera laminada encolada (glulam) se toman del CTE DB SE-M, mientras que los valores del CLT se toman del catálogo del fabricante según el forjado elegido. Dadas las cargas y las luces del proyecto, se elige una madera de clase resistente 40 para los forjados y GL32h para pilares y cerchas.

Esfuerzos resultantes

Con estas condiciones de carga, los cordones de las cerchas no tienen flexión (por estar aplicada sólo cargas puntuales en los nudos, y no cargas distribuidas), siendo:

- Los esfuerzos de **tracción y compresión de los cordones 8.200 kN** en valor de cálculo.
- La **tracción y compresión de las diagonales** en el caso más desfavorable de **2.800 kN**
- La **compresión de los pilares de 18.800 kN**
- La **tracción de los tirantes de 2.500 kN**

De nuevo, como se hizo en el Leadanhall, se puede considerar que estas cargas representan un 70-80% de las cargas reales. Se harán dos dimensionados con los esfuerzos anteriores x 1,20 (aumentándolos en ese 20% restante); uno sin considerar la protección contra el fuego de las secciones, y otra considerándolas, para así poder ver qué supone proteger la madera sobredimensionando sus secciones.

Dimensionado sin protección contra incendios

Si se quiere mantener la geometría y que las barras de las cerchas y los pilares sigan siendo circulares (esta vez macizos y no huecos), se obtendrían los siguientes diámetros:

- **Cordones de las celosías:** si se quiere dividir en dos cordones superiores (como se hizo en el proyecto original para que no resultara un cordón de enormes dimensiones, sino dos más pequeños que dieran más aspecto de ligereza), **dos cordones de 0,6x0,8 m**. Los cordones del proyecto original tienen aproximadamente $\varnothing 0,5m$ (entre los dos ocupan una distancia de aproximadamente 1m).

- **Diagonales de las celosías:** en este caso, la esbeltez de las diagonales comprimidas es mucho menor, por lo que el pandeo no es un problema. La resistencia a compresión de la madera GL32h es ligeramente superior a la resistencia a tracción, por lo que las diagonales comprimidas resultarían de 0,40 x 0,55 y las comprimidas de 0,30 x 0,45m, resultando lo contrario que en las cerchas de acero. Aún así, para una diferencia tan pequeña, no habría merecido la pena hacer esta diferencia entre las secciones y sus uniones, así que habrían sido todas las diagonales iguales.
- **Pilares:** $\varnothing 1,15\text{m}$ (los originales son de $\varnothing 0,85$).

En cuanto a pesos, si se considera que la sección de los pilares tienen sección constante, uno de los pilares huecos originales de acero pesaría alrededor de 72 toneladas, mientras que el peso de los pilares macizos de madera sería de unas 20 toneladas.

Las gerberettes en madera se podrían fabricar con control numérico. Requerirían de ensayos específicos, como los requirieron en acero, pero a priori serían más grandes o, por lo menos, su forma sería algo diferente, especialmente por el cortante que deben soportar (la resistencia a cortante de la madera es muy baja por ser un material anisótropo y por la existencia de fendas).

Así que, si las secciones no se sobredimensionan para protegerlas contra el fuego, **la diferencia entre las dos estructuras en cuanto a dimensiones sería bastane poca.**

Dimensionado con protección contra incendios convencional

Existen varias maneras de proteger la madera contra el fuego, aunque algunas requerirían ocultar la estructura de madera (como recubrimiento de yeso), que no se considera una opción en este caso.

Uno de los métodos más comunes es sobredimensionar las secciones para que cuando se produzca el incendio, se "sacrifique" parte de la sección y que, pasado el tiempo exigido (90, 120, 180...) quede intacta la sección que en realidad era necesaria para resistir las solicitaciones. Por ser un edificio de pública concurrencia con una altura de evacuación mayor de 28m, la resistencia de la estructura debería ser R180 para los forjados y las cerchas que están en el interior. Como se explicaba en el apartado "Protección contra el fuego en el Pompidou", se podría llegar a justificar una resistencia menor para la estructura externa.

El procedimiento para determinar la sección se incluye en el Anejo E, aunque de manera rápida y sencilla se puede suponer que, **por ser madera laminada encolada, se necesitaría añadir 0,7mm/min, es decir 12,6 cm en cada cara expuesta al fuego.** En este caso, podría aumentar el canto de la cercha si eso no afecta a la arquitectura para reducir los esfuerzos de las diagonales (que estarán menos inclinadas) y así poder

reducir algo la sección inicial (la resistente, previa a la protección contra incendios). A continuación se muestra una comparación de dimensiones entre los elementos en acero, los elementos en madera sin protección al fuego, y los elementos en madera sobredimensionados.

Comparación acero - madera sin protección

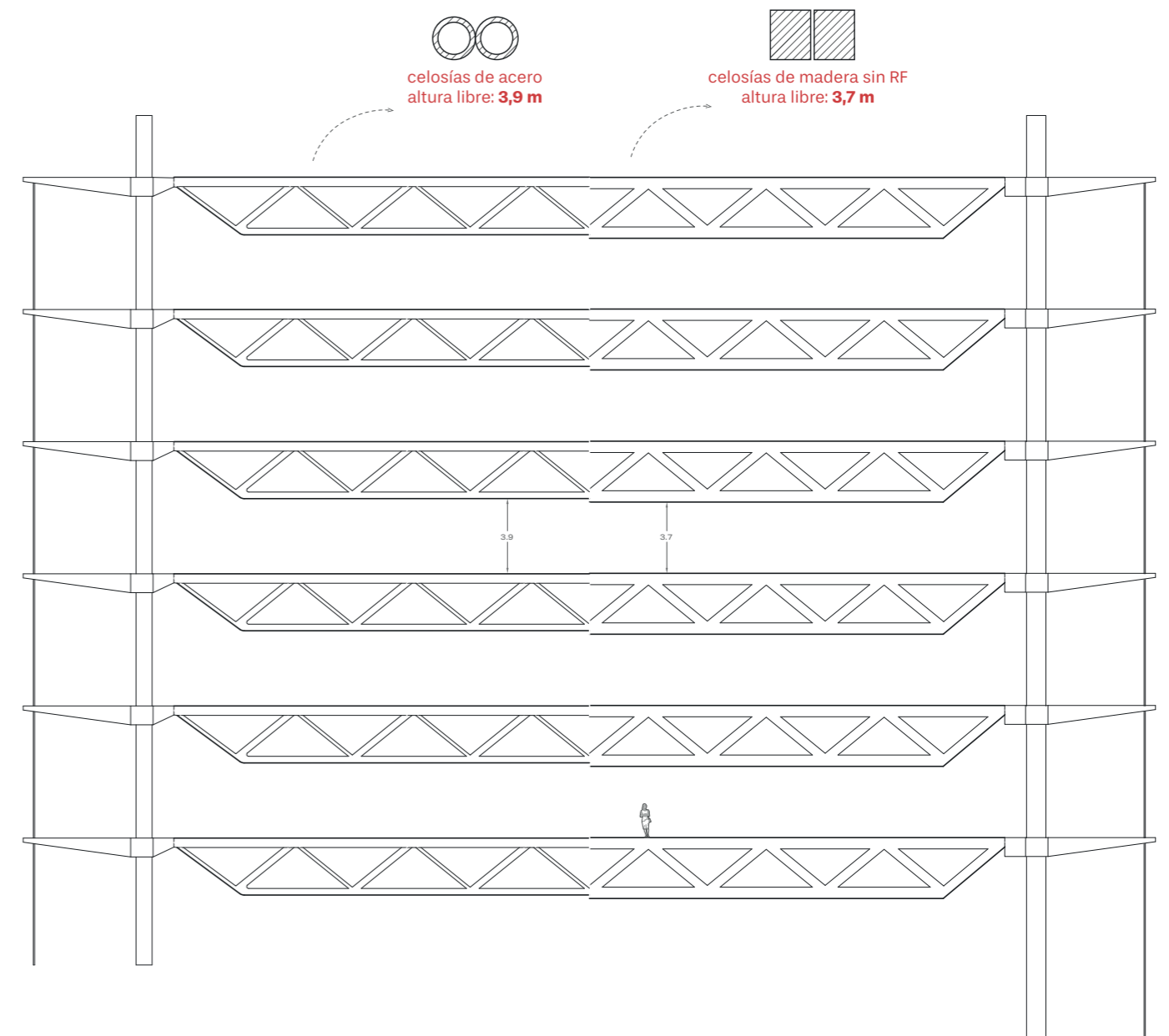
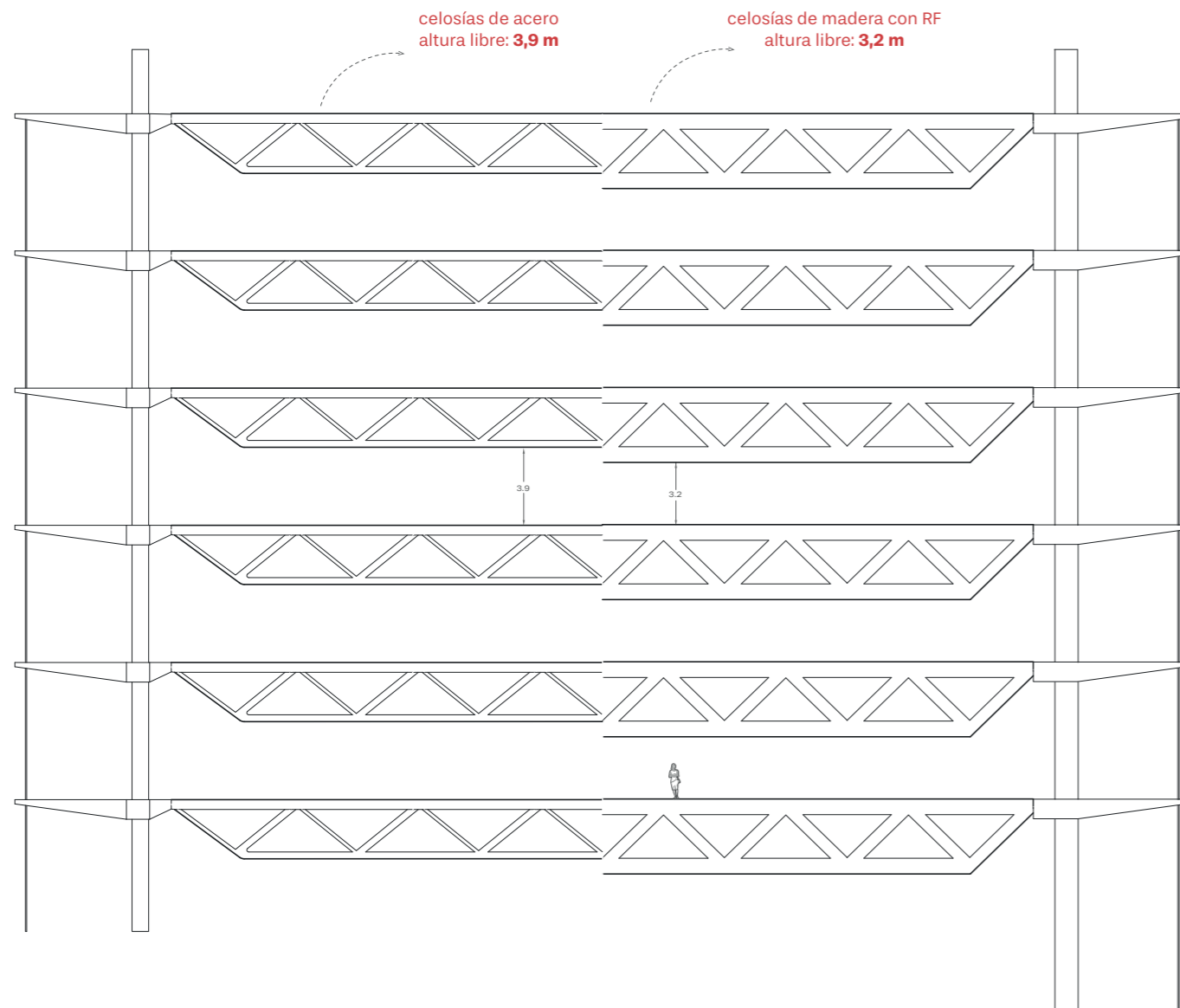


Figura 63. Comparación entre las cerchas de acero y cerchas de madera sin RF. Elaboración propia.

Comparación acero - madera con protección convencional



En todo este proceso, se está asumiendo que la madera se protege de una forma estándar, pensada para edificios genéricos. Este proyecto indudablemente no entra dentro de esa categoría así que, al igual que se tomaron **medidas calificadas de "poco convencionales"** por la propia ingeniera Law en el proyecto original, **se podrían tomar en la alternativa con madera.** Por supuesto, no podrían ser las mismas, porque algunas se aprovechan de la sección hueca de los elementos de la estructura y, además, la normativa actual es mucho más exigente que con la que se diseñó el Pompidou en un primer momento¹⁴. Hay muchos aspectos de este edificio que la normativa no recoge

¹⁴ La tercera renovación del Pompidou, que comenzó hace apenas unos meses, y que se extenderá hasta 2030, tiene como uno de los objetivos mejorar la seguridad contra incendios, según ha publicado la web oficial del Centre Pompidou.

y que podrían reducir enormemente la necesidad de protección de la madera, que es lo que en realidad hace que esta alternativa estructural comience a ser incompatible con la arquitectura. Como la normativa europea sí que se permite llevar a cabo estudios normalizados específicos para el proyecto, éste sería el camino a tomar en el caso de que se hubiera elegido la madera como material.

Conclusiones

Entonces, **¿podría existir un Pompidou de madera?** En este caso, **si se piensa en haberlo construido en los años 70, la respuesta sería no**, principalmente porque la madera estructural para un edificio con estas solicitaciones no estaba suficientemente desarrollada, y porque hacer ciertas piezas con la forma que se les dio habría sido imposible. Pero si se piensa en un Pompidou alternativo **en la actualidad:**

- Desde el punto de vista de la **construcción: sí.** Las piezas de madera habrían sido algo más grandes en sección, pero muchísimo más ligeras, y dado que la parcela no presenta ninguna dificultad que pueda suponer una limitación, llevarlas sería perfectamente viable. Además, es muy probable que las cerchas no se transportaran completas como ocurría con el acero, sino más bien con las uniones ocultas y listas para atornillar. Esto tiene una ventaja, que el transporte sería mucho más fácil, y una desventaja, que el proceso de construcción sería más lento.
- Desde el punto de vista de la **fabricación: sí.** Las piezas que presentan geometrías complejas y que hacen que el proyecto no se pudiera haber pensado en madera hace 50 años, pueden fabricarse a día de hoy mediante modelos 3D, corte láser y procesos robotizados.
- Desde el punto de vista de **las condiciones arquitectónicas iniciales: sí, con la condición de encontrar soluciones alternativas a la protección contra el fuego.** Si eso se resolviera, las premisas arquitectónicas con las que se diseñó el edificio (la "3 dimensional wall", la planta libre, la posibilidad de cambiar la estructura en el futuro...) se mantendrían con una estructura de madera. De hecho, si se toma la idea de querer hacer un edificio cercano y de escala humana, la madera habría ayudado.

Los ingenieros y arquitectos llegaron a una solución en la que la estructura generaba la arquitectura deseada. En esa época, no se pensó en ninguna otra alternativa que no fuera el acero porque no había otro material que reuniera las condiciones arquitectónicas, estructurales y constructivas pero, **a día de hoy, se podría pensar en un Pompidou alternativo de madera.**

Figura 64. Comparación entre las cerchas de acero y cerchas de madera con RF. Elaboración propia.



Figura 65. Pompidou desde dentro. Autor desconocido.



Figura 66. Fotomontaje de un Pompidou alternativo en madera. Elaboración propia.

Influencia en la percepción y la identidad

El Pompidou es uno de esos proyectos en los que la estructura, en un principio, no era una de las ideas generadoras de la arquitectura. El proyecto se basaba en la planta diáfana, en la adaptación a las necesidades futuras y en la "3 dimensional wall". El Centre Beauborg pretendía ser muchas cosas, pero que su estructura quedara grabada en la sociedad no era una de ellas. La estructura cobraba importancia dada la condición inicial de que los forjados pudieran moverse, pero no estaba previsto que generara el espacio, ni total ni parcialmente, cuando el proyecto se ideó. Y, sin embargo, a lo largo del proceso, adquirió un gran protagonismo.

En la búsqueda de la mejor solución que integrara la arquitectura y la estructura, la cara visible del Pompidou tuvo versiones que hoy en día resultan irreconocibles para los que contemplamos el edificio construido. Uno jamás podría haber identificado como el Centre Beauborg aquella imagen generada con las vigas Vierendeel, por ejemplo.

Técnicamente, como se ha visto, podría existir un Pompidou en madera, pero es innegable que la materialidad habría sido tan diferente que no sería el Pompidou que conocemos. Esto lleva a pensar que, utilizada de una manera inteligente y que se adapte al resto de las condiciones arquitectónicas, la estructura puede crear tal impacto en la sociedad como para formar parte del imaginario colectivo. La estructura del Pompidou, incluso para aquellos que ignoran completamente cómo funciona, está tan arraigada en la concepción arquitectónica del edificio que resulta muy difícil imaginarse cualquier otra alternativa.

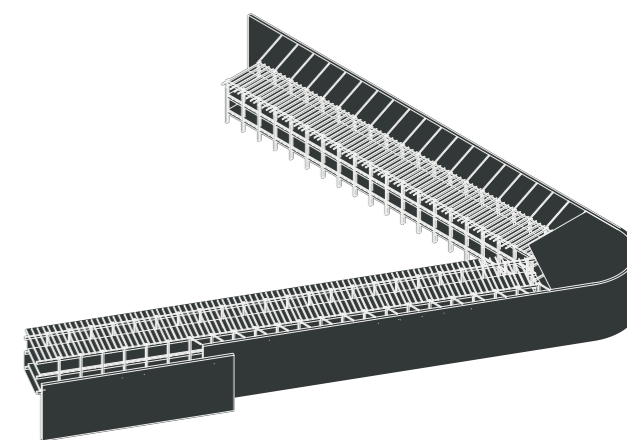
El Pompidou es un ejemplo perfecto de cómo un arquitecto interesado, que puede conocer más o menos de estructuras, pero está dispuesto a interesarse por ellas y su potencial creativo, acaba levantando uno de los edificios más emblemáticos de todos los tiempos.



Mossbourne C.A.

"A new sort of school for a new century."

Arquitectos	Rogers Stirk Harbour + Partners
Ingenieros estructurales	Whitby Bird & Partners
Lugar	Londres, Reino Unido
Año	2002-2004
Superficie interior	8.312 m²
Número de plantas	3
Altura total	18 m
Uso principal	Educativo



Diseño arquitectónico

El Mossbourne community Academy es uno de los edificios construidos en madera más grandes del Reino Unido. En planta, es una gran V, forma que viene dada por las vías férreas que rodean la parcela. El edificio se genera a partir de un módulo de aproximadamente 6 metros, dejando en la parte trasera de las aulas un espacio con cubierta traslúcida para dejar pasar la luz natural. La V encierra un patio para el recreo de los estudiantes y las actividades en común de la escuela.

Retos estructurales

¿Cuáles son los grandes retos a resolver?

Respuesta corta: no hay ninguno relevante.

El diseño se basa en un esquema reticular de pequeñas luces (las vigas con más luz no llegan a los 9,5m) y elementos estándar, sin ningún sistema estructural peculiar o innovador. Ni la altura ni las sobrecargas son de gran magnitud, al igual que la parcela no presenta problemas de accesibilidad o montaje. Que el Mossbourne sea un edificio sencillo estructuralmente hace que se puedan adoptar muchas configuraciones estructurales diferentes y se puedan priorizar en el diseño otros aspectos como la sostenibilidad, el acondicionamiento, etc.

¿Por qué se eligió la madera?

Respuesta corta: sostenibilidad y flexibilidad.

El diseño quería incorporar la posibilidad de que los muros divisorios entre aulas fueran relativamente fáciles de modificar sin que se viera alterada la actividad de la escuela. Una solución constructiva con elementos unidos por placas y pernos de acero hace posible esta flexibilidad, que era uno de los puntos claves de proyecto.

Además, se priorizó mucho el que los sistemas de climatización y el comportamiento térmico del edificio fueran sostenibles, por lo que la estructura debía encontrarse también en esta línea. La madera se obtuvo, laminó y mecanizó en Holanda, llegando a obra lista para ser montada.

Módulo 01

El conjunto se crea partiendo de un módulo de aproximadamente 6 x 9 metros. Las distintas áreas de la escuela se alojan en secciones de varios módulos, configurados como "casas adosadas" que tienen acceso desde el gran patio central.

La estructura de estos módulos es de madera laminada encolada. Dos filas de marcos en 'H' forman la estructura principal sobre la que se apoyan las vigas. De vez en cuando, se generan pasarelas externas haciendo que las vigas vuelen hacia el patio.

Vacios 02

Por la existencia de los muros en el perímetro, se crean vacíos entre ellos y las aulas que permitan iluminarlas naturalmente. Se aprovechan además para generar corrientes de aire mediante respiraderos que consiguen una climatización pasiva.

Muros "protectores" 03

La parcela está rodeada de vías de tren, por lo que las fachadas que encierran el edificio por estos lados son muros de hormigón que protegen a los alumnos y reducen el ruido en las aulas. Estos muros, a diferencia del resto de la estructura, están hechos de hormigón armado.

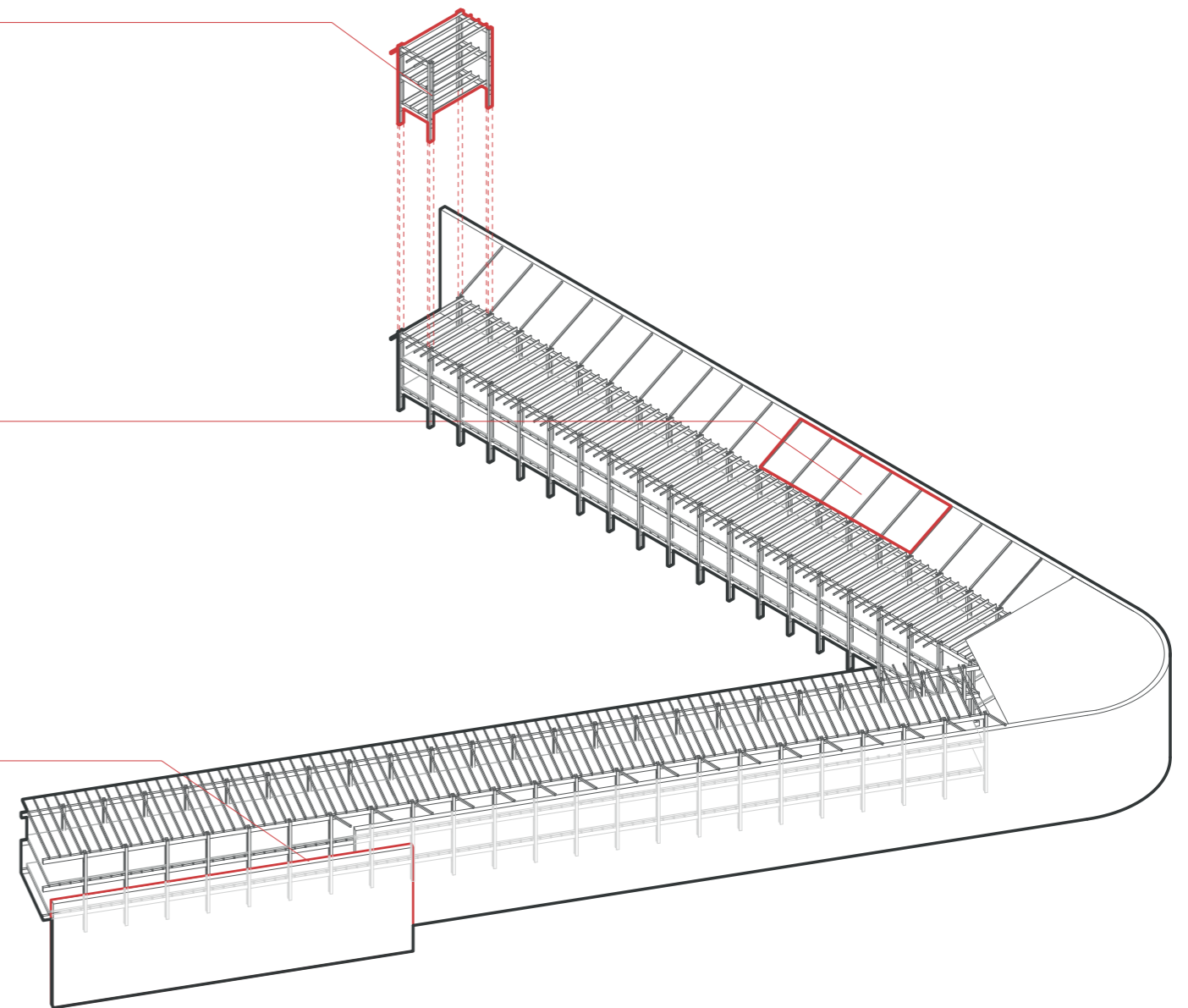


Figura 67. Mossbourne Community Academy. Adaptado de *Colonnade* [Fotografía], por RSHP, 2004.

Figura 68. Mossbourne Community Academy. Elaboración propia.

Funcionamiento general

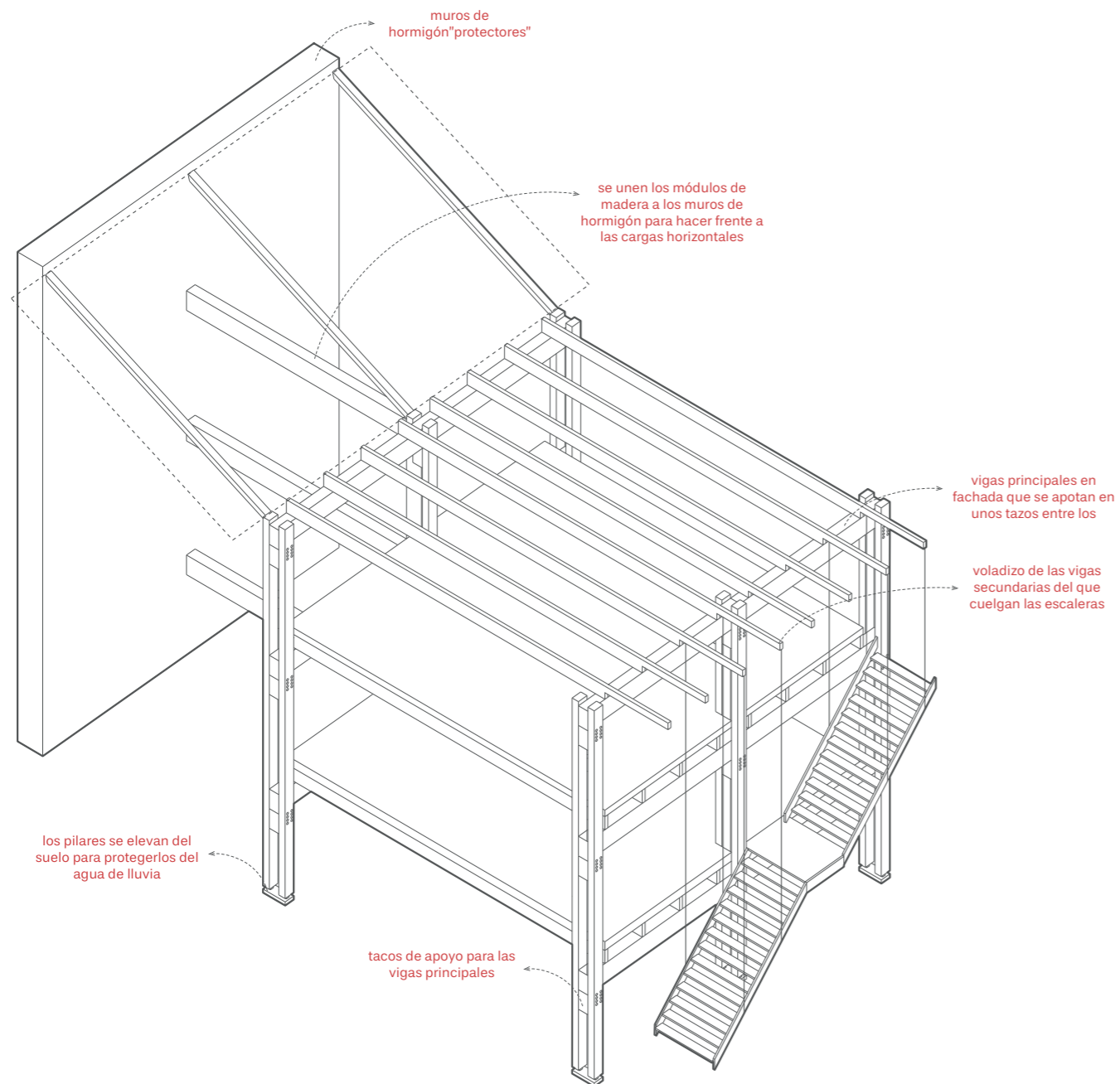
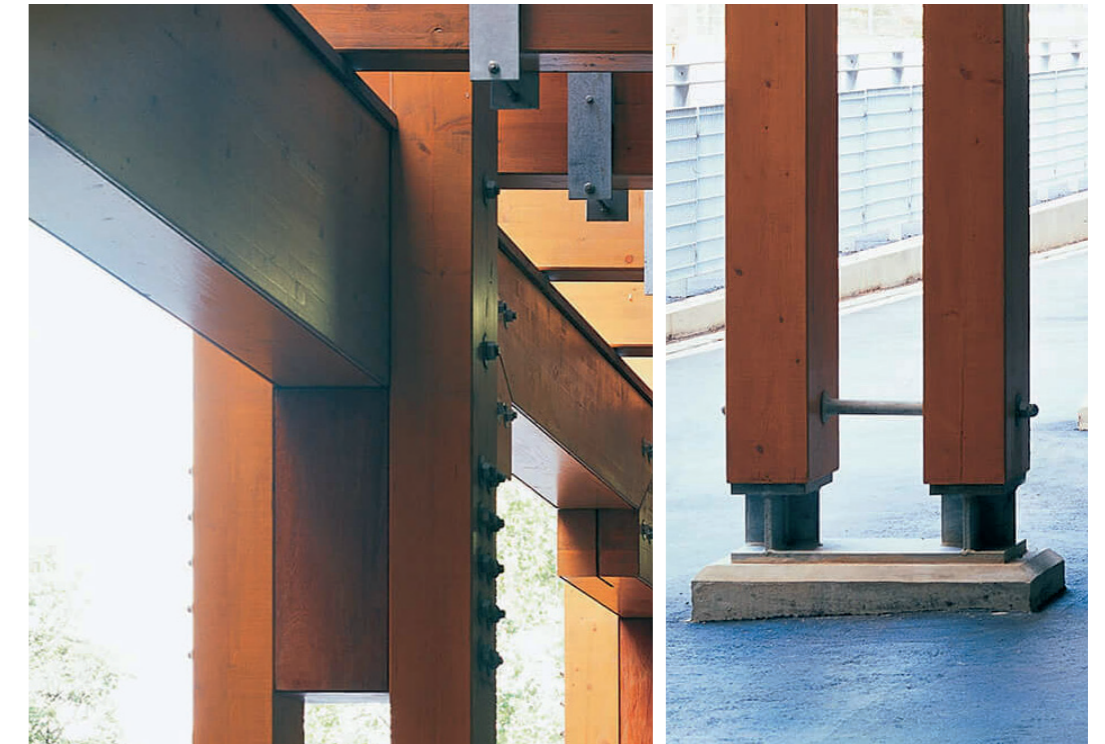


Figura 69. Módulo estructural de glulam. Elaboración propia.

Los elementos portantes principales están hechos de madera, pero la estructura funciona gracias a la **combinación de la madera con el acero y el hormigón**.

Los pilares están formados por dos secciones rectangulares de madera laminada encolada (Glulam), entre los que se colocaron tacos que permiten el apoyo de las vigas principales. Los pilares están además elevados respecto al suelo para protegerlos del agua de lluvia (Dickson y Parker, 2015).



Sobre las vigas de fachada se disponen vigas secundarias de algo más de 9 metros de luz, dispuestas cada 1,20m. En algunos puntos, estas vigas secundarias presentan unos voladizos de aproximadamente 2m para colgar de ellos las escaleras externas que dan acceso a las aulas desde el patio central. En el resto de la longitud de las vigas se apoya el sistema de los forjados, formado por una chapa metálica sobre la que se vierte hormigón para conseguir una correcta sectorización contra el fuego y un buen aislamiento acústico.

La unión de los pilares con el suelo está diseñada para permitir la carbonización de parte de la sección en caso de incendio (Dickson y Parker, 2015). Todos los elementos portantes están impregnados con una pintura ignífuga y aquellos que son exteriores tienen una capa de madera de Iroko¹⁵ y pinturas de protección contra la humedad.

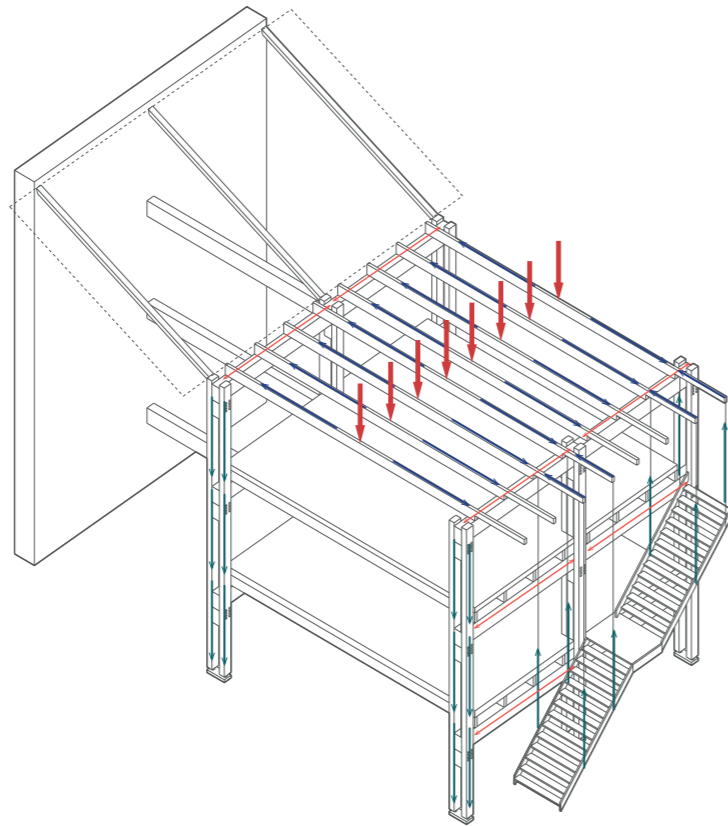
Figura 70. Apoyo de las vigas principales en fachada sobre los tacos entre pilares. Adaptado de *Colonnade* [Fotografía], por RSHP, 2004.

Figura 71. Encuentro de los pilares con el suelo. Adaptado de *Colonnade* [Fotografía], por RSHP, 2004.

.....
15 La madera Iroko es una de las maderas más resistentes a la humedad, insectos, hongos y pudrición, además de tener muy baja propensión a deformarse o agrietarse cuando se dan cambios de clima, lo que la hace ideal para utilizarla en elementos expuestos a la interperie.

Transmisión de cargas

Verticales



Horizontales

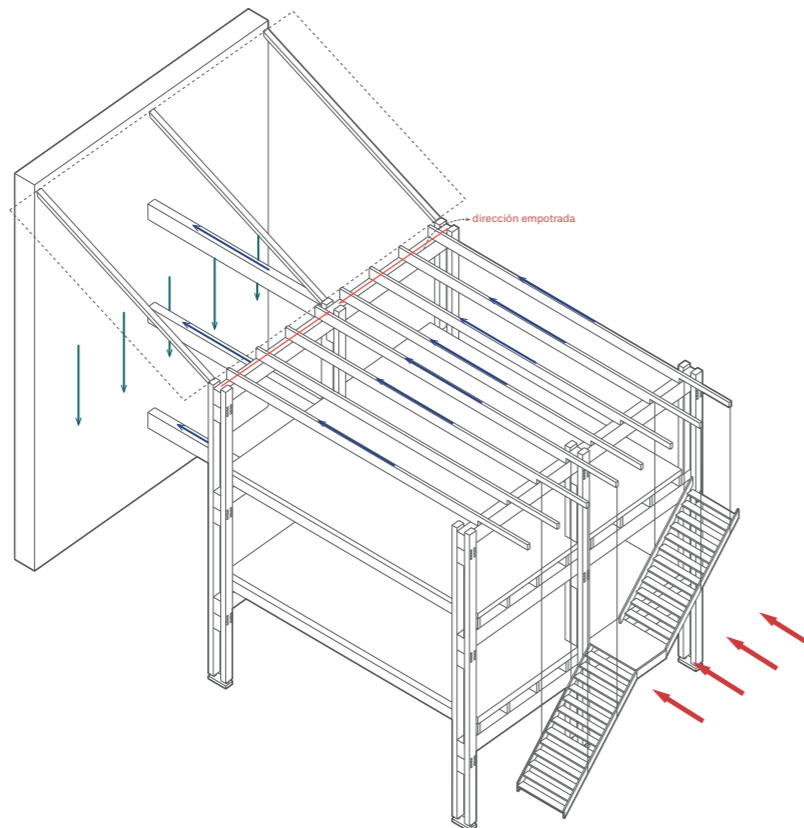


Figura 72. Transmisión de cargas verticales y horizontales. Elaboración propia.

En las fotografías y los planos del proyecto **no aparece ningún elemento que sea claramente un arriostramiento**, como cruces de san andrés o núcleos de hormigón. Sí hay, sin embargo, dos fotografías que llevan a pensar que el conjunto de los pórticos está empotrado en una de las direcciones y sujeto con los muros de hormigón en la otra.

Durante la fase de construcción, los módulos necesitaron apeos en el sentido transversal. Eso, junto a una fotografía en la que se ven unas "vigas" desde la estructura de madera hasta los muros de hormigón armado en esa misma dirección, lleva a pensar que el arriostramiento en el sentido transversal no es otro que dichas vigas (figura 60). En el sentido longitudinal no existe ningún tipo de elemento que pueda hacer esta función, y tampoco se colocaron en la construcción apeos que sujetaran la estructura en su eje longitudinal.



Por eso, se supone que los **pórticos están empotrados en el sentido longitudinal** (suposición que parecen apoyar las uniones entre las vigas, que son pasantes, y los pilares), **y arriostrados mediante esas "vigas puntales" con el muro de hormigón en el sentido transversal.**¹⁶

Figura 73. Módulos durante el proceso de construcción. Adaptado de *Construction* [Fotografía], por RSHP, 2004.

Figura 74. Vacío entre los módulos y los muros de hormigón durante el proceso de construcción. Adaptado de *Construction* [Fotografía], por RSHP, 2004.

Figura 75. Uniones entre vigas y pilares, y entre distintos tramos de vigas. Adaptado de *Construction* [Fotografía], por RSHP, 2004.



¹⁶ Existe otra opción y es que, al estar los muros de hormigón en V, estén actuando como arriostramiento en ambas direcciones uniéndose al forjado superior de los módulos. En ese caso, las vigas puntales servirían solo para sujetar algunas comunicaciones que hay en el patio interior. En la primera opción, los pilares deben soportar momento, lo que es más desfavorable para el cálculo. La comparación se hará considerando esta primera situación.

El Mossbourne en acero

¿Podría haberse construido el Mossbourne Community Academy en acero, manteniendo los elementos estructurales y el funcionamiento tal y cómo están diseñados? Para responder a eso, se analizan los siguientes aspectos. Este edificio presenta pocas condiciones iniciales que sean limitantes a la hora de considerar uno u otro material estructural, por lo que permite muchas disposiciones diferentes.

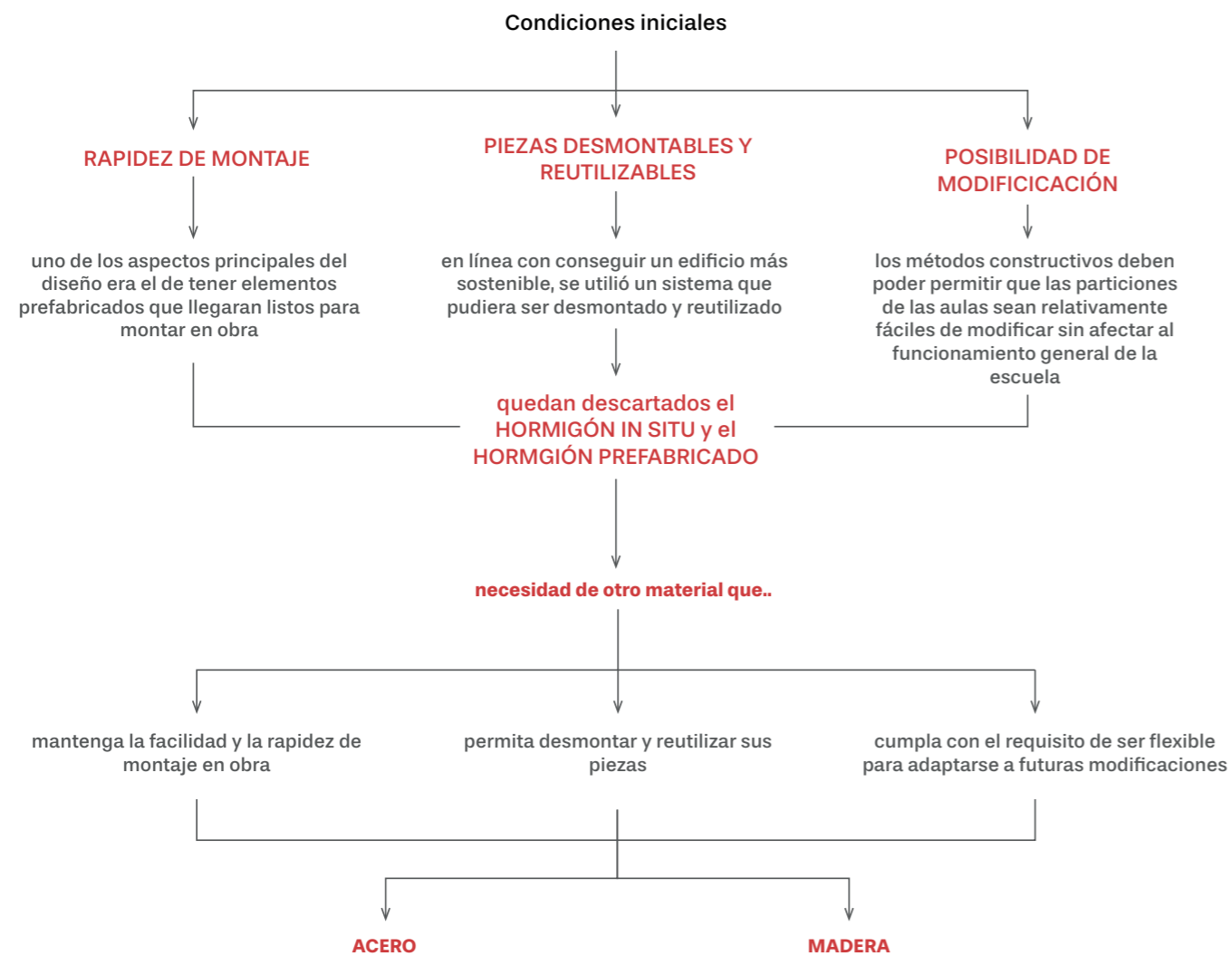


Figura 76. Condiciones iniciales del edificio. Elaboración propia.

Bases de cálculo

1. Áreas tributarias y entrega de cargas

Se aplicará a las vigas secundarias un ancho tributario de 1,20m, la separación entre ellas. Estas vigas entregarán la carga de manera puntual a las vigas principales de fachada, que son continuas y están empotradas con el pilar.

2. Acciones consideradas

PPO. Peso propio de los elementos estructurales. Se realiza un predimensionado para considerar este peso, comprobando las secciones una vez obtenidos los esfuerzos.

PP1. Peso propio de los elementos constructivos. Se considera una losa de grosor 0,1m (por las secciones constructivas de los arquitectos), que suponen 2,50 kN/m².

SU. Sobrecarga de uso. En Reino Unido se utiliza El Eurocódigo 1-1 la aplicación de sobrecargas de uso y pesos propios. Este documento, en el que se basa en CTE DB SE-A (estableciendo exactamente las mismas categorías y valores), define que las escuelas pertenecen a la categoría C1, siendo su valor de sobrecarga de uso 3,00 kN/m².

Vx+, Vx-, Vy+, Vy-. Acciones de viento. Al calcular un solo módulo sin tener en cuenta su posición, se considera que podría afectarle el viento en tres de sus fachadas (en la más cercana al muro, dirección Vy-, no puede soplar el viento porque hay un muro de hormigón continuo que supera la altura del módulo). Para la relación entre altura y largo del edificio, sí se considera el total del edificio, aunque se calcule un solo módulo.

- Fachada corta (norte): presión de 0,55 kN/m² en Vx+ y succión de 0,35 kN/m² en Vx-
- Fachada corta (sur): succión de 0,35 kN/m² en Vx+ y presión de 0,55 en kN/m² en Vx-
- Fachada larga oeste (larga): presión de +0,50 kN/m² en Vy+
- Fachada larga (este): succión de 0,20 kN/m² en Vy-

En base a esto, se consideran las siguientes combinaciones de acciones:

- **ELU 01:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot Vx+$
- **ELU 02:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot Vy+$
- **ELU 03:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU + Vx+)$
- **ELU 04:** $1,35 \cdot (PPO+PP1) + 1,50 \cdot (SU + Vy+)$

3. Coeficientes parciales de seguridad

- **Acciones permanentes:** para PPO y PP1 se aplica $\alpha = 1,35$.
- **Acciones variables:** para SU y V se aplica $\alpha = 1,5$. En algunas circunstancias, se puede considerar una de las acción como acción variable base y reducir el resto en base a un coeficiente de simultaneidad establecido en la tabla 4.2. del DB-SE. No se aplica en este caso porque no se consideran más que dos acciones variables.

Esfuerzos resultantes

En este caso, se prevé que los pilares sean esbeltos debido a la alta resistencia del acero, las cargas actuantes y la altura del módulo. Por eso, será importante considerar el pandeo de los pilares, para lo que se examinan los esfuerzos concomitantes del pilar más cargado en tres situaciones: aquella en la que se produzca el mayor axil, aquella en la que se da el mayor momento en el sentido de la menor inercia y aquella en la que se da el mayor momento en el sentido de mayor inercia. Con esto, se pretende dimensionar el pilar para la situación más desfavorable de las tres.

- Axil en los pilares de 550 kN, con un momento de 0 kNm, y un axil de 350 kN con un momento de 150 kNm.
- Vigas secundarias: momento máximo de 100 kNm
- Vigas principales: momento máximo positivo de 70 kNm y momento máximo negativo de 120 kNm.

Dimensionado: pilares

De acuerdo con el Código Estructural, el procedimiento para dimensionar los pilares teniendo en cuenta el pandeo es el siguiente:

Si podrían elegir tubos huecos cuadrados para los pilares, intentado mantener la disposición de dos pilares y una viga pasante¹⁷. Aún así, **es necesario reflexionar sobre el hecho de esta decisión de "desdoblar" el pilar y hacer una viga pasante viene de la decisión de elegir la madera** y tener que empotrar los módulos en el sentido longitudinal. Esta unión en acero habría sido mucho más sencilla, pero también **le habría restado al edificio gran parte de su expresión formal**.

Esos perfiles huecos pertenecerían a secciones Clase 1 o 2 (dependiendo de la relación entre su espesor y el ancho de la placa comprimida). Es necesario considerar también que, al existir un empotramiento en una de las direcciones, habrá también un momento.

En primer lugar se calculará la resistencia a compresión, que se considera reducida por el fenómeno del pandeo. Se comprobará que el valor de cálculo del esfuerzo axil a compresión es menor que la resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido ($N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$). La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ viene definida por la expresión:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M_1}} = \chi \cdot A \cdot f_{y,d}$$

siendo χ el coeficiente de reducción del modo de pandeo correspondiente, f_y el límite elástico del acero y M_1 el coeficiente parcial de seguridad aplicado cuando se

¹⁷ Tener dos pilares en lugar de uno hace que el axil se reparta y los elementos sean más esbeltos, lo que los hace más susceptibles a sufrir pandeo.

comprueban elementos a inestabilidad.

Para obtener el valor del coeficiente de reducción χ es necesario saber:

- A qué curva de pandeo corresponde la sección elegida. En este caso, la curva correspondiente a secciones huecas acabadas en caliente es la 'a'.
- La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$, calculada con la expresión:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}},$$

donde N_{cr} es la fuerza crítica elástica para el modo de pandeo considerado basado en la propiedad de la sección bruta. Para obtener N_{cr} se toma la fórmula de Euler para pandeo, considerando la inercia en ambos ejes de la sección (que, en el caso de perfiles cuadrados, es la misma).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E \cdot I}{L^2}$$

En el caso de que N_{cr} fuera diferente en cada eje, se tomaría la menor. N_{cr} determinará la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$, ésta a su vez el coeficiente de reducción χ , permitiendo este último obtener la resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$. La longitud de pandeo L se considera como la altura entre forjados, por estar el pilar atado por las vigas en fachada en una dirección y por los forjados en la otra.

Con estas bases de cálculo se podrían dimensionar los pilares para la primera situación de axil 550 kN sin momento, que podrían ser dos tubos cuadrados de 90mm de lado y 5mm de espesor.

Para la segunda situación, habría que considerar la interacción entre los dos esfuerzos, aplicando para secciones de Clase 1, 2 o 3:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

En este caso, $N_{Ed} = 175$ kN (en la disposición de dos pilares), $M_{y,Ed} = 0$ kNm, $M_{z,Ed} = 150$ kNm y N_{Rd} se ha obtenido en los apartados anteriores resultando N_{Rd} para un tubo de 90mm y 5mm de espesor $N_{Rd} = 389$ kN. De manera simplificada, se considera que el axil se reparte equitativamente entre los dos pilares y que el momento que genera la viga en ambos es igual a tener un solo pilar (aunque en realidad, al cambiar la sección por llevarse menos axil, cambia también la inercia del elemento y, por lo tanto, el momento que se lleva).

Para poder comprobar la resistencia, es necesario obtener ahora $M_{z,Ed}$, aplicando para clases 1 y 2:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

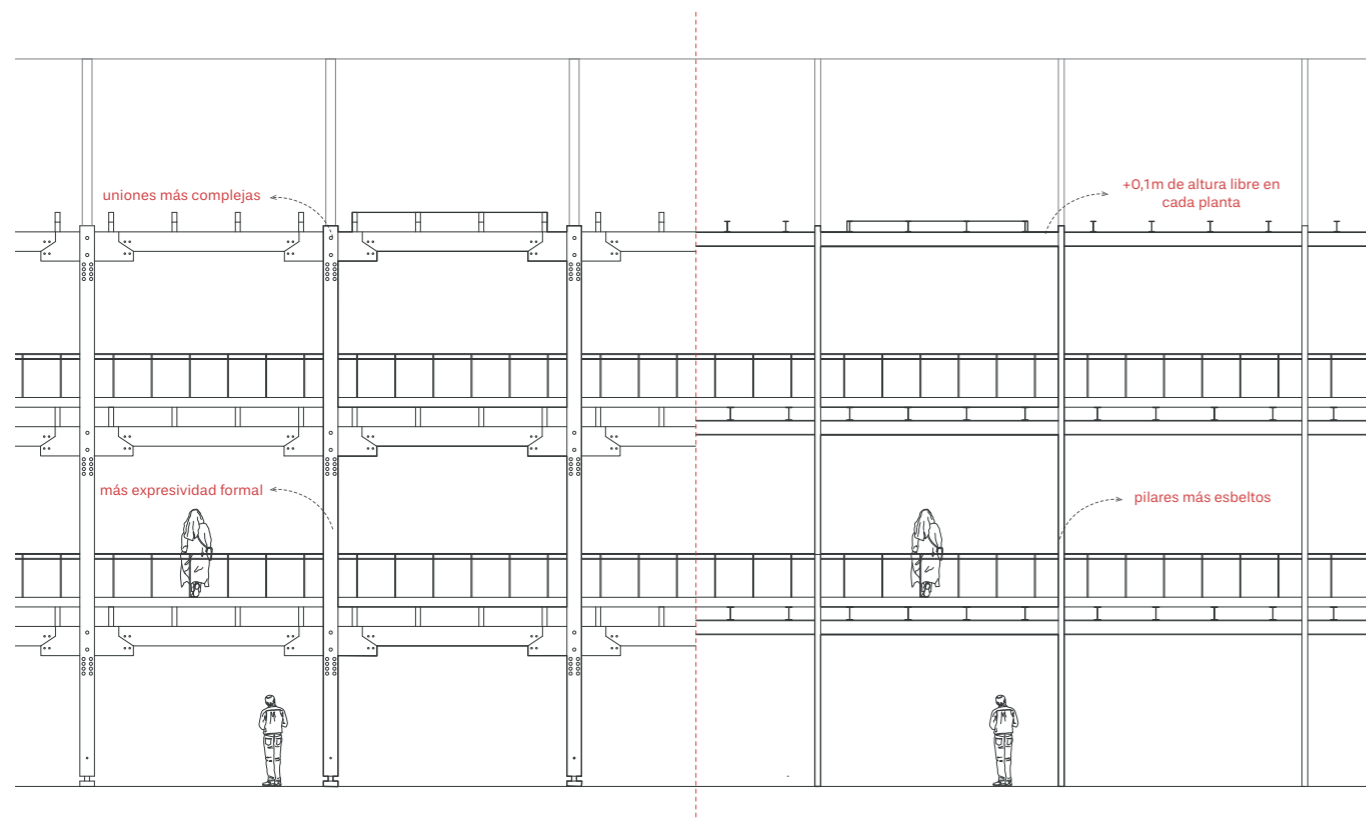
A partir de esto, se obtiene que $M_{pl,Rd} = 84 \text{ kNm}$, por lo que es necesario aumentar la sección, hasta que $M_{pl,Rd} > 150 \text{ kNm}$. **Los pilares tendrán ser entonces 120 mm de lado y 8 mm de espesor.**

Dimensionado: vigas

Las vigas se dimensionan a momento con la misma expresión, pero esta vez teniendo perfiles IPE. Las vigas secundarias se dimensionan para un momento máximo de 100 kNm y las vigas principales para uno de 120 kNm. Un IPE270 bastaría para las vigas secundarias, y para las principales un IPE300.

Comparación

Incluso con la estructura de acero, introducir arriostramientos en las particiones de las aulas afectaría a la condición de que éstas fueran fácilmente modificables. Por eso, se mantiene el pórtico empotrado en la dirección longitudinal y las "vigas puntal" hasta los muros de hormigón.



En cuanto a pesos, un pilar de madera de las dimensiones existentes pesa alrededor de 430kg (tomando unos 400 kg/m^3 como densidad característica). Los tubos huecos de 120mm de lado y 8mm de espesor pesarían 505 kg aproximadamente, un 17% más.

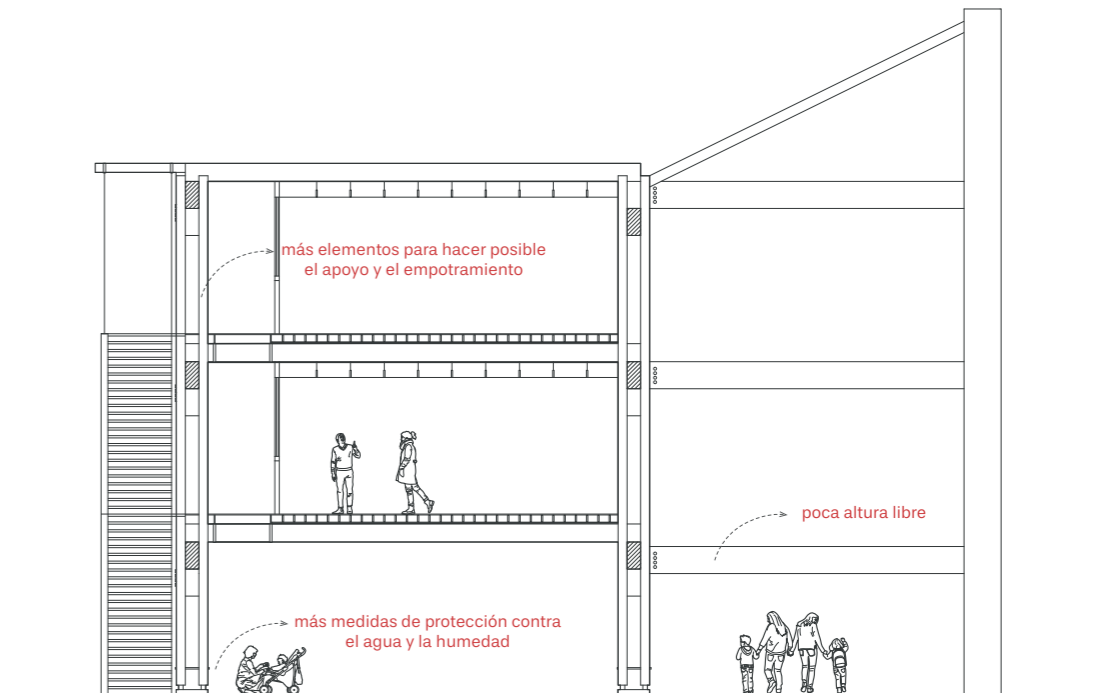
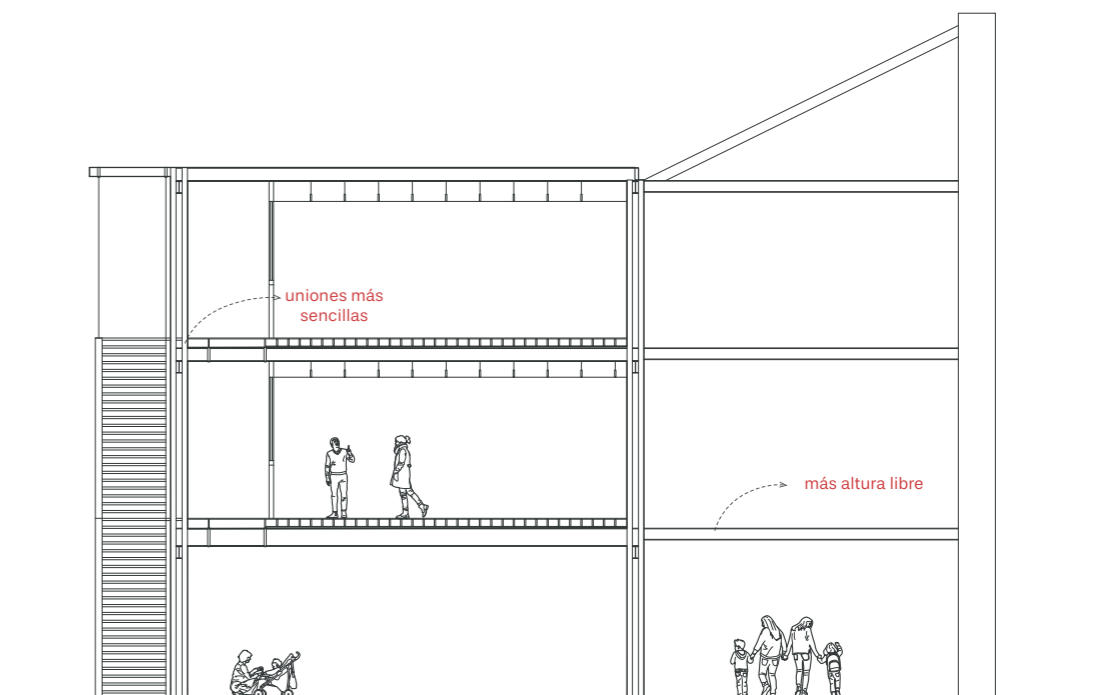


Figura 77. (Izquierda) Comparación entre las dimensiones de una estructura de madera y una de acero (alzado). Elaboración propia.

Figura 78. Comparación entre las dimensiones de una estructura de madera y una de acero (sección transversal). Elaboración propia.





Conclusiones

Entonces, ¿podría haber sido el Mossbourne Community Academy de acero? La respuesta corta es que sí.

- Desde el punto de vista de la **construcción: sí**. El proyecto no presentaba ninguna limitación en cuanto a la parcela, el transporte, la fabricación o la puesta en obra. El acero habría sido igual de rápido de montar y, aunque ligeramente más pesado, igual de fácil de transportar.
- Desde el punto de vista de los **esfuerzos: sí**. Las cargas no son demasiado grandes y, aunque la madera presenta mucha limitación a cortante (lo que hace que se introduzca en el diseño el taco de apoyo de la viga, además de por un tema de uniones), no es la suficiente como para que no sirva como material en este proyecto. Ambos materiales necesitan de medidas adicionales para su protección contra el agua y el fuego (la madera además contra agentes biológicos), pero este un ejemplo de que los retos, bien resueltos, dejan de afectar a la arquitectura.
- Desde el punto de vista de la **las condiciones arquitectónicas iniciales: sí**. Las dimensiones no son un problema, ya que la resistencia del acero es muy superior a la de la madera y por tanto "ocupa menos espacio". Sin embargo, gran parte de la expresividad del Mossbourne C.A. viene de la elección de la madera, que lleva a ciertas disposiciones derivadas de las prestaciones del material (las vigas pasantes,

Figura 79. Vista desde el patio interior de la V. Adaptado de *Mossbourne Community Academy* [Fotografía], por RSHP, 2004.

las uniones, el apoyar las vigas secundarias en vez de unir las al "alma" de las vigas principales, etc.).

Influencia en la percepción y la identidad

Siendo un proyecto mucho más sencillo y de muchos menos retos que el Pompidou, **la estructura juega un papel fundamental en la percepción espacial del edificio**, y en la cercanía con la que los alumnos perciben su escuela.

Técnicamente, como se ha visto, una estructura de acero habría cumplido las condiciones que generaron el proyecto, pero su percepción, que está en gran medida basada en el material, habría hecho de **la Mossbourne Community Academy en acero un proyecto de mucha menos calidez**, y probablemente habría sido menos adecuada para una escuela.

Figura 80. Fotomontaje de una Mossbourne Community Academy alternativo en acero. Adaptado de *Mossbourne Community Academy*, por RSHP, 2004.

Conclusiones

El análisis realizado ha permitido profundizar en la concepción actual que se tiene sobre el papel de las estructuras en el proyecto arquitectónico. Una observación clave es que, a menudo, las estructuras **no son vistas como una oportunidad creativa, sino como una restricción técnica**. Aunque existen arquitectos que se caracterizan precisamente por generar arquitectura con las estructuras, esto representa más una señal de identidad que un enfoque generalizado.

En la mayoría de casos en los que la estructura se tiene en cuenta en el proceso creativo, se hace por una limitación constructiva o técnica más que por una decisión voluntaria del arquitecto. Incluso cuando existen retos estructurales asociados a elementos que necesitan una gran reserva geométrica (como, por ejemplo, espacios de grandes luces), se dan ejemplos que no consideran su resolución en el diseño, lo que resulta sorprendente.

En cuanto a los materiales, los datos arrojan conclusiones relevantes y asombrosas. Incluso en un panorama de emergencia climática, **la madera es uno de los materiales menos comunes**. Este material se reserva normalmente para aquellos proyectos en los que la estructura se utiliza activa y conscientemente para generar el espacio, que suelen ser proyectos de pequeñas dimensiones, siendo siempre el denominador común dejar la estructura completamente vista. En general, y aunque no sea un planteamiento extendido, en los proyectos en los que se incorpora el aspecto resistente desde las primeras fases del diseño, la estructura acaba participando en el espacio como algo positivo que añade valor arquitectónico. Acerca del **hormigón, que es el material más extendido**, se extraen dos conclusiones relevantes: la primera es que es el material más utilizado en **problemáticas de gran altura**, algo imprevisto dada la diferencia de resistencia entre él y el acero; la segunda es que es la opción **más común cuando la estructura del proyecto se resuelve a posteriori**, seguido de cerca por el acero.

En cuanto a la comparación de los posibles enfoques estructurales que se pueden tomar, el avance de la tecnología computacional y el desarrollo de los materiales permite que prácticamente cualquier solución sea viable técnicamente, pero eso no significa que todas sean adecuadas desde el punto de vista arquitectónico. Es imposible establecer una norma general asociada a cada material, pues las capacidades de cada uno dependen enormemente de su uso y configuración, e incluso de su complementación con otros materiales y sistemas. Sin embargo, decantarse por una u otra solución siempre incluye aspectos que van más allá de las funciones resistentes, como la fabricación, la versatilidad, la escala, la sostenibilidad y, por encima de todo, **la compatibilidad con la arquitectura**.

Los casos de estudio analizados muestran cómo el esqueleto resistente puede adquirir tal importancia que defina la identidad de una obra y su percepción en el imaginario

colectivo. Incluso en aquellos casos en los que la estructura no es una de las ideas generadoras del proyecto, o incluso aunque el proyecto sea sencillo, considerar la estructura en el proceso de diseño desde etapas muy tempranas puede transformar las restricciones en oportunidades.

Los arquitectos entendemos los problemas como una interacción entre muchas variables. Por eso, si interpretamos las estructuras como **una variable más que sabemos controlar, nuestros proyectos dependerán mucho más de nosotros** y mucho menos de otros. Este trabajo pretende abrir nuevas vías de desarrollo y reflexión sobre el papel de las estructuras y la colaboración interdisciplinar desde etapas tempranas del diseño.

En conclusión, y volviendo a la frase con la que se iniciaba la investigación, no es necesario que los arquitectos sepamos cómo se dimensiona cada mínimo detalle de la estructura, pero sí que sepamos, a grandes rasgos, diseñarla. Si la estructura cambia, hay muchos proyectos que dejarían de ser lo que son. Y decidir qué son está en nuestras manos.

Bibliografía

Addis, B. (1994) *The Art of the Structural Engineer*. Artemis London Limited.

Ahm, P.B., Clarke, F.G., Grut, E.L. y Rice, P. (1980) *Design and construction of the Centre National d'Art et de Culture Georges Pompidou* [Archivo PDF]. Institution of Civil Engineers. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/iicep.1979.2637>

Aroca, R. (2024) *Comprender las estructuras*. Ediciones asimétricas.

Arup (1985) *Ove Arup's 90th Birthday Issue*. The Arup Journal Spring 1985. <https://www.arup.com/globalassets/downloads/arup-journal/the-arup-journal-1985-issue-1.pdf>

Arup (2018) *Some selected Papers by Margaret Law* [Archivo PDF]. <https://www.arup.com/globalassets/downloads/insights/e/engineering-fire-safety-some-selected-papers-from-margaret-law/margaret-law-some-selected-papers-engineering-fire-safety.pdf>

Balmond, C. con Smith, J. (2002) *Informal*. Prestel.

Bernabeu Larena, A. (2007) *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf

Carrasco, A., Couso, J.R. y Sardans, C. (2005) *Nueva Torre de Control del Aeropuerto de Barcelona* [Archivo PDF] <http://www.e-ache.com/modules/ache/ficheros/Realizaciones/Obra72.pdf>

Zastavani, D. y Wittevrongel, B. (2014) *In discussion with Jürg Conzett*. Louvain.

Dickson, M. y Parker, D. (2015) *Sustainable Timber Design*. Routledge.

Ezquerro Equizábal, A. (2016) *Vigas Gerber: Comportamiento estructural y estudio de la tipología arquitectónica* [Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/68059>

Gameiro, M. (2017) *Pompidou Centre: The structure of art- the art of the structure* [Archivo PDF]. https://issuu.com/gravidade-eng/docs/art-beaubourg_cmm45_en_

García Meseguer, Á. (Ed. y Trad.). (2009) *Un ingeniero imagina*. Cinter Divulgación Técnica S.L.

Gordon, J.E. (1978) *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*. Penguin Books.

Hamzeian, B. (2018) *The evolution of the cast node of the Pompidou Centre: from the "friction collar" to the "gerberette"* [Archivo PDF]. https://www.researchgate.net/publication/333955917_The_evolution_of_the_cast_node_of_the_Pompidou_Centre_From_the_'friction_collar'_to_the_'gerberette'

Jackson, M. (2014) *Super skyscrapers: Season 1, Episode 2* [Documental]. Blink Films.

Macdonald A. J. (2001) *Structure & Architecture*. Taylor & Francis.

Procedencia de las imágenes

[1] Adaptado de *Traversinersteg* [Fotografía], por Kruh, 2023. <https://kruh.info/en/lecture/jurg-conzett/>

[2] Adaptado de "a + u: Cecil Balmond", por N. Yoshida, 2020, *Architecture and Urbanism Magazine*.

[4] Adaptado de "a + u: Cecil Balmond", por N. Yoshida, 2020, *Architecture and Urbanism Magazine*.

[5] Adaptado de *XRay* [Dibujo], por Sehr Yaqoob, 2015. <https://sehryaqoob.com/analysis-casa-da-musica>

[6] Adaptado de *CCTV*, por OMA, 2003. <https://cdn.sanity.io/files/5azy6oei/production/20b86f6e45d8b3995de10556849cf0e3ed929ff9.pdf>

[7] Adaptado de *V&A Spiral Extension* [Fotografía], por Balmond Studio, 1996. <https://balmondstudio.com/work/va-spiral-extension.php>

[8] Adaptado de "Anthony Hunt is the high-tech architect's engineer", por JJ. Atsbury, 2019, *Dezeen*. <https://www.dezeen.com/2019/11/20/anthony-hunt-high-tech-architecture-engineer/>

[9] Adaptado de "Las conchas de hormigón de Félix Candela: una arquitectura diseñada para México y Chicago", por P. Cuesta, 2018, *Metalocus*. <https://www.metalocus.es/es/noticias/las-conchas-de-hormigon-de-felix-candela-una-arquitectura-disenada-para-mexico-y-chicago>

[10] Adaptado de *Casa 1736* [Fotografía], por H Arquitectes, 2017. <https://www.harquitectes.com/es/proyectos/casa-1736/>

[11] Adaptado de *Habitatges Socials 2104* [Fotografía], por H Arquitectes, 2021. <https://www.harquitectes.com/proyectos/ibavi-2104/>

[12] Adaptado de *433 MKM Museum Küppersmühle Extension* [fotografía], por Herzog & de Meuron, 2017. <https://www.herzogdemeuron.com/projects/433-mkm-museum-kuppersmuhle-extension/>

[13] Adaptado de *Centro de Conferencias en Shenzhen* [Fotografía], por Arquitectura Viva, 2020. <https://arquitecturaviva.com/obras/oma-centro-de-conferencias-en-shenzhen-china-fto15>

[14] Adaptada de "Audrey Irmes Pavillion / OMA", por J.O. Rear, 2021, *Archdaily*. <https://www.archdaily.com/967889/audrey-irmes-pavilion-oma>

[15] Adaptado de *Taipei Performing Arts Centre* [Fotografía], por OMA, 2022. <https://www.oma.com/projects/taipei-performing-arts-center>

[16] Adaptado de *461 Powerhouse Arts* [Fotografía], por Herzog & de Meuron, 2023. <https://www.herzogdemeuron.com/projects/461-powerhouse-arts/>

[29] Adaptado de "Madera estructural", por Ó. Linares, 2024, *AV Proyectos*.

[30] Adaptada de "New photographs show Rogers' Leadenhall Building nearing completion", A. Frearson, 2014, *Dezeen*. <https://www.dezeen.com/tag/the-leadenhall-building/>

[33] Adaptado de *In Progress: The Leadenhall Building* [Fotografía], por Rogers Stirk Harbour + Partners, 2013. <https://www.archdaily.com/392494/in-progress-the-leadenhall-building-rogers-stirk-harbour-partners>

[34] Adaptado de *Node 6 at Level 19*, por D. Krolikowski, 2016, Megaframe [Archivo PDF]. https://bartlettdesignresearchfolios.com/media/folio_docs/Krolikowski_01_Megaframe_SO4_UPDATE_ISSN.pdf

[35] Adaptado de *The Leadenhall Building* [Fotografía], por Australian Steel Institute, 2018. https://www.steel.org.au/ASI/media/Australian-Steel-Institute/steel%20Australia%20articles/Leadenhall-Bldg_stAust_Jun18_p18-19.pdf

[37] Adaptado de "Nueva torre de Control del Aeropuerto de Barcelona", por A. Carrasco, 2005, *III Congreso Ache*.

[38] Adaptado de *In Progress: The Leadenhall Building* [Fotografía], por Rogers Stirk Harbour + Partners, 2013. <https://www.archdaily.com/392494/in-progress-the-leadenhall-building-rogers-stirk-harbour-partners>

[44] Adaptado de *Welcome to the Leadenhall Building* [Fotografía], por The Leadenhall Building City of London, s.f. <https://theleadenhallbuilding.com/>

[46] Adaptado de "Paris Architectural Masterpiece, Center Pompidou by Richard Rogers and Renzo Piano", por JJ. Barba, 2021, *Metalocus*. <https://www.metalocus.es/en/news/paris-architectural-masterpiece-center-pompidou-renzo-piano-and-richard-rogers>

[49] Adaptado de "46 años del Centre Pompidou", por B. Gómez-Pimienta, 2023, *Arquine*. <https://arquine.com/el-primer-museo-contemporaneo-cumple-40-anos/>

[50] Adaptado de "Paris Architectural Masterpiece, Center Pompidou by Richard Rogers and Renzo Piano", por J.J. Barba, 2021, *Metalocus*. <https://www.metalocus.es/en/news/paris-architectural-masterpiece-center-pompidou-renzo-piano-and-richard-rogers>

[51] Adaptado de *Fixation d'une poutre à une gerberette* [Fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f. https://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-architecture-Centre-Pompidou/comment_ca_fonctionne/p3_img9.htm

[52] Adaptado de *Le noued poteau - poutre - gerbrette - tirant*, [Fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f. https://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-architecture-Centre-Pompidou/comment_ca_fonctionne/p2_img1.htm

[54] Adaptado de *Pose des planchers* [fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f. https://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-architecture-Centre-Pompidou/comment_ca_fonctionne/p3_img11.htm

[55] Adaptado de *Structural detail of the floor slab* [Dibujo], por B. Hamzeian, 2018, *The evolution of the cast node of the Pompidou Centre: from the "friction collar" to the "gerberette"*.

[56] Adaptado de *Schematic section of the Vierendeel trusses*, [Dibujo], por B. Hamzeian, 2018, *The evolution of the cast node of the Pompidou Centre: from the "friction collar" to the "gerberette"*.

[56] Adaptado de *Structural solution based on a traditional truss and laterla brackets without the Gerber system* [Dibujo], por B. Hamzeian, 2018, *The evolution of the cast node of the Pompidou Centre: from the "friction collar" to the "gerberette"*.

[58] Adaptado de *Première mise au point du project*, por B. Hamzeian, 2018, *Le Défi Du Total Design*. <https://www.calameo.com/books/0035879850acf6d07f4e1>

[59] Adaptado de "Centre Pompidou is high-tech architecture's inside-out landmark", por L. Crook, 2019, *Dezeen*. <https://www.dezeen.com/2019/11/05/centre-pompidou-piano-rogers-high-tech-architecture/>

[60] Adaptado de *Margaret Law Fire Safety Awards* [Fotografía], por Arup, 2024. <https://www.arup.com/globalassets/downloads/news/2024-5-may/arup-margaret-law-award---student-application-pack>.

[61] Adaptado de *Robotic Fabrication by ICD/ITKE, Univeristy of Stuttgart*, por A. Menghes, 2019. <http://www.achimmenges.net/?p=20987>

[62] Adaptado de *Pose des planchers* [fotografía], por Mediation Centre Pompidou, s.f. https://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-architecture-Centre-Pompidou/comment_ca_fonctionne/p3_img11.htm

[67] Adaptado de *Colonnade*, [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

[70] Adaptado de *Colonnade*, [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

[71] Adaptado de *Colonnade*, [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

[73] Adaptado de *Construction*, [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

[74] Adaptado de *Construction*, [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

[75] Adaptado de *Construction*, [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

[79] Adaptado de *Mossbourne Community Academy* [Fotografía], por RSHP, 2024. <https://rshp.com/projects/education/mossbourne-community-academy/>

¿Y SI...?
IMAGINANDO LAS ESTRUCTURAS
QUE PODRÍAN HABER SIDO (O NO)

