Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Camino, Canales y Puertos

Optimización de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales

Tesis Doctoral

Alfonso Barba Pérez

Máster en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales
Ingeniero Civil

Madrid, 2019

Alfonso Barba Pérez

Madrid, 2019

ISBN:

Departamento de Ingeniería Civil - Construcción

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

Optimización de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales

Tesis Doctoral

por

Alfonso Barba Pérez

Máster en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales
Ingeniero Civil

Directores de Tesis:

Jaime Fernández Gómez

Paula Villanueva Llauradó

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Doctor Arquitecto

Madrid, 2019

POLITÉCNICA

Tesis Doctoral

Optimización de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la
Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2019.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día..... de
..... de 2019 en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos de la U.P.M.

Calificación:.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A mis padres

A todos los maestros que nos enseñaron a pensar

*Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.*

Antonio Machado

Agradecimientos

No es un trabajo sencillo agradecer el apoyo incondicional, el ánimo, el buen consejo, la enorme paciencia, el cariño infinito, el entusiasmo y el amor recibido durante estos años dedicados a construir este trabajo.

En primer lugar, quiero expresar un profundo y sincero agradecimiento a mis directores Jaime Fernández Gómez y Paula Villanueva Llauro por darme la oportunidad de realizar esta tesis doctoral, por sus aportaciones, ayuda y dedicación, sin ellos no habría sido posible.

Al profesor David Usero, por su inestimable ayuda en el aprendizaje del programa GeoGebra y por su visión de conjunto.

Indudablemente esta tesis doctoral no habría nacido sin los años de trabajo en empresas en las que he desarrollado mi labor profesional: Preteresa-Prenavisa Estructuras de Hormigón y Prefabricados Castelo, y sin los compañeros encontrados.

El apoyo a todas las propiedades, ingenierías, despachos de arquitectura y constructoras, con los que he colaborado en mi vida profesional, que han sido igualmente imprescindibles para llegar hasta aquí .

Deseo también agradecer al Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, y a la Comisión de Doctorado, por su asesoramiento para la culminación de esta tesis.

A los desarrolladores de los programas de software libre, Therm y GeoGebra, determinantes en el desarrollo de la tesis, por fomentar el intercambio de conocimiento y la participación de forma equitativa.

A los divulgadores de conocimiento, Eduardo Torroja, Jose Antonio Fernández Ordoñez, Tihamér Koncz, Manuel Burón, FIB (FIP-CEB), ACHE (ATEP-GEHO), ANDECE, IECA, Gustavo Gili, CINTER y tantos otros reseñados en el estado del arte.

A mis compañeros de estudios de máster y de doctorado, por compartir el camino, Catalina, Cristian, Stanislav, Ana y tantos otros.

A mi familia, encabezada por mis padres Ildefonso y Transi, mis hermanos Roberto y Yoli, sobrinos, Gonzalo, Carlos, Carmen, Lucía y Diego, que siempre han estado ahí, corazones grandes, aportando alegría, y que siempre me han apoyado. A mis primos y tíos, Ismael, Juli, Emilia y Jose Luis, siempre tan cercanos y presentes. Gracias familia, sois un refugio contra la tormenta.

Al primo Jose, ingeniero de título e ingeniero de ingenio, ejemplo de pensar, probar y ejecutar, el que me metió el veneno de estudiar ingeniería y a mis primas Susana, Sainara, Soraya y Yessica, unos corazones andantes.

A mis abuelos Casiano, Manuela, Emilio y Amelia, que con su ejemplo de vida me ayudaron a ser mejor persona y me animaron a estudiar.

A mis amigos, Carlos, Moreira, Pati, Baz, Isidoro, Rosalía, Manolo, Jani, Olguita, Rober, Teresa, Julián, Txusa, Luis Santos, Mikel Mendizábal, Pedro Iza y tantos otros, por hacer que la vida sea una experiencia maravillosa, por dejarme estar en vuestro equipo.

A los maestros que pasaron por mi vida dejando huella y vocación docente; Ildefonso Barba, Transito Pérez, Vicente Pérez, Antonio García, Toñi, Esteban, Modesto, Paz Curbera, Jaime Fernández, Paula Villanueva, Claudio Olalla, Luis Ortuño, David Cendón, Francisco González, brillantes, de educación panorámica, cuyas lecciones en palabras de Ortega, son una peripecia.

A los maestros, que me enseñaron a darme permiso para pensar y crear.

A Iñaki Ochoa de Olza, himalayista, por ser un ejemplo de vida y por escribir las reglas de oro de cualquier expedición al Himalaya, y por extensión a las montañas de la vida: *Volver todos, volver amigos, hacer cumbre. Y en ese orden.*

A los hermanos Iñurrategi, himalayistas, por su forma humilde de acercarse a las montañas y por describir el valor de la cordada en la montaña y en la vida: *En la montaña, uno es medio y dos son dos y medio (En la montaña, uno, apenas es uno. Dos son más de dos).*

A María, compañera, corazón sin fronteras, por su generosidad, por apoyarme siempre, por reírnos juntos, por cuidarme, por darme la fuerza y alegría para terminar este trabajo . Gracias por estar ahí.

A todos los que olvido y con los que compartimos momentos de vida, viajes, jornadas de trabajo, poesías, comidas, sesiones de cine, estudios, salidas al monte, gracias por compartir, por hacer los días más amables.

A los que me enseñaron el valor del compañero de cordada, de la hermandad, de que por poco que tengas siempre tienes algo que compartir, a ellos que me hicieron sentir que otro mundo es posible.

No dejemos que pase mucho tiempo, sin que hablemos o nos veamos, para seguir compartiendo y avanzando juntos.

Mis más sinceras gracias a todos vosotros.

Resumen

La construcción de edificios industriales con elementos prefabricados de hormigón ha tenido un gran desarrollo desde la segunda mitad del siglo XX y muy especialmente en los últimos 40 años.

Las estructuras de hormigón prefabricado, son muy utilizadas en la actualidad para la construcción de edificios industriales, por las ventajas que representan respecto a otras soluciones estructurales: rapidez de ejecución, ventajas intrínsecas del material en cuanto a resistencia al fuego, mayor control de costes y plazos, estética y posibilidades de acabados, seguridad laboral, eficiencia, durabilidad y posibilidad de reciclado del material.

Las estructuras prefabricadas podemos clasificarlas, atendiendo a su uso y elementos utilizados, en dos tipologías básicas: Estructuras de pórticos o cubiertas ligeras y estructuras de entramados o forjados. La elección de la tipología más apropiada a cada proyecto, dependerá de que el uso preferente sea como cubrición, o de que sobre la estructura se necesite estar o almacenar cosas. En esta tesis, nos centraremos en los edificios industriales de planta única, resueltos con grandes luces con estructuras de cubierta ligera, que intervienen en gran parte de los proyectos y que definen el perímetro de estudio.

En un alto porcentaje de casos, las estructuras de edificación industrial están ejecutadas con soluciones prefabricadas de cubierta ligera y fachadas de paneles de hormigón. En este sentido, es destacable la poca presencia de bibliografía técnica actualizada para apoyar al proyectista en la fase de diseño. Los estudios de optimización suponen una considerable ayuda al proyecto; y por ello, se ha planteado una investigación para identificar y analizar los parámetros más influyentes en los proyectos de estructuras prefabricadas para cubiertas ligeras y fachadas, con objeto de proponer criterios de optimización, de cara a una primera aproximación al análisis dimensional, que sirva en las fases iniciales de proyectos con dichas tipologías.

El estudio se centra en cómo afectan las distintas variables a la optimización de estructuras de hormigón prefabricado, teniendo en cuenta el consumo de materiales; hormigón y acero, relativo de cada elemento estructural.

Se analizan las estructuras de cubierta, definidas como estructuras de pórticos compuesta por pilares, vigas principales de cubierta y vigas secundarias, correas o viguetas, y los paneles de fachada intervinientes en la generalidad de los proyectos.

Para desarrollar la tesis se han identificado varias fases de la investigación. En la primera fase, se ha investigado sobre el estado del arte, atendiendo a lo publicado, para poder ver de dónde venimos, donde estamos y hacia dónde vamos, en cuanto a formas de trabajo, tipologías, secciones y medidas.

En una segunda fase se identifican las distintas tipologías estructurales y las variables de diseño y geométricas a tener en cuenta en el diseño de cada una de las tipologías estructurales presentes en las edificaciones industriales. Posteriormente, se conforma una base de datos de 122 proyectos de diferentes edificaciones de naves con estructura prefabricada, para lo que se ha realizado una ficha por proyecto, con los datos geométricos y de diseño. El criterio de selección de los proyectos es que presenten algunos aspectos comunes de forma

que se facilite su comparación, tales como: normativa (EHE-08 y CTE), similares resistencias característica del hormigón en las distintas obras para cada elemento estructural, estabilidad al fuego similar, riesgo sísmico nulo o bajo y estructuras de tipo isostático.

Sobre los datos analizados, se ha aplicado un tratamiento estadístico, obteniendo tablas de medidas de posición; media, la mediana, moda, desviación típica y el coeficiente de variación, para las cargas y variables geométricas incluyendo: longitud de vigas principales, longitud de correas, separación de correas, longitud de pilares y canto de vigas principales y de correas.

Para los análisis de optimización, la variable de gasto elegida, es el volumen de hormigón homogeneizado por tipo de elemento y tipo de armado, empleado en la estructura considerada, medido en m^3 , mediante el método de reducción a un sistema de variable única.

De cara a los análisis, se ha definido la cuadrícula básica de la estructura Cu, como la superficie de estructura construida, confinada por dos vigas principales paralelas y contiguas separadas la longitud de correa. Los elementos que la componen serán: cuatro pilares, dos vigas y las correas correspondientes al reparto sobre las vigas en función de su interese.

Se analizan los gastos de las cuadrículas básicas, unificadas por rangos de altura libre, para ver las soluciones de longitud de viga y longitud de correa que nos dan menores consumos.

Posteriormente se ha realizado un tratamiento de datos con análisis estadístico, para relacionar mediante regresión las longitudes de vigas, correas, y pilares con el consumo de hormigón homogeneizado, llevado a cabo siguiendo el método de ajuste por mínimos cuadrados.

Llegados a este punto estaremos en disposición de desarrollar la ecuación de optimización o ecuación general de gasto por cuadrícula básica construida, que relacione cada uno de los elementos estructurales que componen la estructura con el gasto, partiendo para ello del esquema de la estructura de una cuadrícula básica.

En base a los resultados estadísticos de la base de datos, se proponen diferentes ecuaciones de optimización en función de los datos de cargas del proyecto, para mejorar la exactitud de los análisis. La ecuación de optimización se ha realizado complementando el desarrollo teórico con la herramienta matemática GeoGebra. La herramienta se ha seleccionado porque permite fijar variables y simplificar el análisis gráfico.

Con GeoGebra, se ha realizado un primer análisis para buscar la solución óptima, definida como el mínimo de la función de gasto. Este análisis se vio que daba valores de correas fuera del rango de uso habitual.

En un segundo análisis, programando una ecuación en la que dejamos como variable la longitud de viga y colocamos deslizadores, variables acotadas, que permiten variar la longitud de correa, la separación de correas y la altura libre del edificio definido en GeoGebra, buscaremos el mínimo de esta función, definida como Acota (L_v).

La programación de la ecuación de gasto en el programa GeoGebra ha permitido obtener un modelo ideal de comprobación de los resultados de la base de datos, así como poder visualizar las longitudes de viga teórica propuesta para obtener el mínimo consumo y las tendencias de las curvas de la función de gasto, para diferentes valores de las variables acotadas de altura libre, longitud de correa e intereje de correa.

En el trabajo se han obtenido herramientas de predimensionado y modelos optimizados, para ayudar al proyectista en la fase de diseño. La metodología propuesta podría aplicarse a otros estudios similares de optimización de soluciones estructurales en edificación y obra civil.

Para completar el estudio, se han incluido dos capítulos, uno referente a los paneles de fachada de hormigón prefabricado. Estos elementos están sujetos a constantes innovaciones para optimizar sus propiedades. Junto con la resistencia a fuego, las propiedades acústicas y posibilidades de acabado, recientemente ha crecido el interés por mejorar la transmitancia térmicas, fruto de una creciente versatilidad de usos en edificios industriales. Como consecuencia de este interés, se han creado sistemas que consiguen mejorar las prestaciones térmicas pero que pueden ir en detrimento de las propiedades mecánicas. Analizando los factores que entran en juego en el comportamiento termoacústico y de resistencia al fuego de los paneles, se han propuesto unos paneles teóricos optimizados, procurándose tres vías de optimización: la primera el uso de un núcleo aislante de más baja conductividad, la segunda en una mejora del ratio de macizados y la tercera una combinación de las dos anteriores

Y finalmente otro capítulo, analizado la forma de trasladar los resultados en cuadrículas simples, a naves de diferentes geometrías mediante los coeficientes de forma, y hemos podido contrastar la gran relevancia que tiene la forma y dimensiones elegidas para el edificio en el gasto total. En este análisis hemos visto la influencia que la forma elegida para el edificio tiene en el gasto a nivel de estructura y a nivel de los cerramientos de fachada.

Las conclusiones alcanzadas tras los análisis efectuados, se presentan ordenadas según los capítulos de la tesis y con unas conclusiones finales que sirvan al proyectista de soporte a la hora de afrontar el predimensionado de estas estructuras.

Para terminar, se plantean unas futuras líneas de investigación, en el camino de profundizar y ampliar el conocimiento de los edificios industriales contruidos con estructuras prefabricadas de hormigón.

Abstract

Industrial buildings with structures and façades made of precast concrete has experienced a great development in recent times, and particularly in the last 40 years.

Precast concrete structures are broadly employed nowadays for industrial buildings, due to the advantages they present when compared with other structural solutions: construction speed, fire behaviour, cost and timing control, aesthetic properties and texture and colour versatility, work safety, durability and possibility of recycling its components.

Such structures are classified according to their use. We distinguish between one-storey structures with deck roofs, and multi-storey buildings. One of these typologies will be chosen depending on the specificities of each project, namely the planned use for the building. Most frequently, industrial buildings consist of one-storey rooms with deck roofs, and this is the typology that had been studied in these thesis.

Most industrial buildings in current times are built with precast concrete structures and façades. It is noteworthy that, in spite of this, there is a lack of technical updated literature that can assist the designer, specially in the early steps of the project. Research on cost-optimization are of considerable help in these early stages; for this reason, the investigation herein is intended to identify and analyse the most influential parameters on precast concrete structures and

façades for industrial buildings with deck roofs. The aim is to formulate a series of criteria for optimising such projects.

This research focuses on the influence of the different variables determining the cost-optimization of precast concrete elements taking into account the amount of material required for each element (both concrete and steel).

The typology of one-storey buildings with deck roofs consists of pillars, beams and purlins. In addition, in most cases we will have the façades also conformed with concrete massive or sandwich panels.

The following stages can be identified in the development of the research herein. The first stage comprises the documentation with specialised literature, guidelines and technical documents, in order to determine the development of the precast concrete technology from its early times to the present; such evolution includes the changes in the structural conception, typologies and cross-sections. The second part includes the research itself. First, structural configurations and design and geometrical parameters affecting design of industrial buildings were identified. With these parameters, a database consisting of 122 projects for one-storey industrial buildings was collected. For each project, the data are collected in the database and the extended data are presented in the annex 1. Elements included in the database were selected according to general criteria that assist in the comparison between projects: code of application (Spanish EHE-08 and CTE), similar concrete strength and dosage for each type of element; fire behaviour; no seismicity of the location where the project stands, similar sort of foundation, and statically determined structure.

A statistical analysis was performed on the database, and the results of this analysis are collected in a series of tables. The parameters include the loading scheme, geometrical parameters including beam span, purlin span, purlin spacing, length of pillars, height of beams, beam type and height of purlins.

The optimisation process required a series of hypothesis and simplifications to be applied. Therefore, a cost-parameter was chosen, related to the volume of concrete homogenised for each type of element and steel reinforcement ratio, in m^3 . This was done to obtain a single variable for the optimisation.

For all analysis, the structural unit was defined as the surface conformed as the result of multiplying the beam length and the purlin length (in horizontal projection). Such unit comprises four pillars, two beams and the corresponding number of purlins depending on their spacing.

The equation for optimization or general cost equation for structural unit puts in relation the different structural elements that conform the structure and the cost in their construction. This was done for different ranges of building height.

In the literature review we observed that it was common to consider lengths of beams no greater than 25,00 m, and purlins no greater than 10,00 m. In this research, we obtained that the optimum was found within the range of 15,00 to 30,00 m for beams and in the range of 10,00 to 12,00 for beams, resulting in structural units ranging from 150 to 360 m^2 . The average of the most optimised elements from the database results, for the most common height of buildings, in an structural unit of 27,00 x 11,40 m and 25,33 x 12,13 m, depending on the type of beam.

A series of optimization equations were developed from the statistical analysis, in order to better fit the accuracy of the analysis. This was made with the mathematical free software GeoGebra. We chose this software because of its ease of use and powerful graphical capacity.

A first attempt of analysis was done with GeoGebra defining the minimum value of the cost-function. This equation defines the meeting point of the partial derivate of cost with respect to the beam span and that of the purlin span. This analysis casted purlin lengths out of the common range of manufacture.

In a deeper analysis, the purlin length was set to the manufacturing common ranges, searching for the optimum length of beam for a series of purlin spacing and building height. In this second phase of the optimisation, the function “Acota” from GeoGebra was used. The analysis developed with GeoGebra allowed us finding an ideal model for comparison of the degree of optimisation of different particular projects, and so it was compared with the database. The model was discussed for a range of values of purlin length and spacing, and pillar length.

This work presents a series of design tools for early stages in projects of industrial buildings with precast concrete structure. The methodology presented herein can also be applied to other structural optimization in both buildings and civil works. With this in mind, this research could be included in a further investigation on applied mathematics for big data analysis.

The research was completed with an optimisation in the field of façade panels, which are subjected to permanent innovation to optimise their properties. Together with fire behaviour, acoustic properties, and other properties, recently it has been raised an interest on thermal performance, due to the increasing versatility of use of industrial buildings. As a consequence, systems such as sandwich panels and technologies “without thermal bridges” allow improving the thermal performance but may affect the mechanical properties. Two optimising approaches were considered: improving the thermal insulating material, and reducing the thermal bridges but minimising impact upon mechanical properties.

The last chapter of research extends the results from structural units to whole buildings, including a shape coefficient, observing the relevance this has (together with the total area of the building) on the the costs. This analysis shows, too, the prominent influence of façades on the total costs of industrial buildings.

Final conclusions of research are presented with the aim of serving as a tool at the early stages of structural design. Conclusions are presented together with future research lines, which will to deepen and broaden the knowledge on industrial buildings made of precast concrete.

Índice

Agradecimientos	IX
Resumen	XIII
Abstract	XIX
Índice de figuras.....	XXXIII
Índice de tablas	XLIX
Notación.....	LVII

Capítulo 1. Introducción	1
1.1.- Justificación de la tesis doctoral.....	1
1.2.- Objetivos	3
1.3.- Esquema general de la tesis	9

Capítulo 2. Estado actual del conocimiento.....	13
2.1.- Introducción	13
2.2.- Historia de la prefabricación en España. Realizaciones, evolución y comparativa.	32
2.2.1.- Realizaciones	32
2.2.1.1.- Década 1940-1950	37
2.2.1.2.- Década 1950-1960	42
2.2.1.3.- Década 1960-1970	55
2.2.1.4.- Década 1970-1980	77
2.2.1.5.- A partir de 1980	100
2.2.2.- Evolución y comparativa	118

2.3.- Publicaciones precedentes	125
2.3.1.- Normativa, guías de diseño y buenas prácticas	127
2.3.1.1.- Optimización en prefabricación industrial.....	129
2.3.2.- Investigaciones precedentes	148
2.3.2.1.- Criterios de optimización en general.....	148
2.3.2.2.- Prefabricación industrial: desarrollo y optimización.....	156

Capítulo 3. Plan de investigación: Análisis de tipologías, variables de diseño y geométricas. Fichas de estructuras y base de datos207

3.1.- Introducción	207
3.2.- Clasificación general de sistemas estructurales en edificios prefabricados en función de la tipología de los elementos y del tipo de uniones	209
3.2.1.- Clasificación general de tipologías por elementos constructivos	210
3.2.2.- Clasificación general de tipologías por conexiones de los sistemas constructivos	212
3.3.- Clasificación de las tipologías de estructuras de hormigón prefabricado en edificación industrial objeto de investigación	214
3.3.1.- Hipótesis de diseño del modelo estructural	216
3.3.2.- Tipología de pórticos - cubiertas ligeras	217
3.3.2.1 Principales usos y características de edificios con la tipología de pórticos- cubierta ligera.....	218
3.3.2.2 Piezas prefabricadas en la tipología de pórticos-cubierta ligera..	219
3.3.3.- Tipología de cerramientos de fachada. Paneles prefabricados de hormigón	227
3.3.3.1. Principales usos y características de edificios con cerramientos de fachada con paneles prefabricados	228
3.3.3.2. Piezas prefabricadas en la tipología de cerramientos de fachada con paneles prefabricados	229
3.4. Justificación del modelo y de las tipologías a analizar en este estudio	231
3.5 Condiciones de contorno para el diseño del edificio	234

3.5.1.- Uso	234
3.5.2.- Cargas	235
3.5.3.- Estabilidad al fuego	235
3.5.4- Distribución externa e interna	236
3.5.5.- Definición de la retícula, celda o cuadrícula básica.....	236
3.5.6.- Pórtico simple o pórtico múltiple	237
3.5.7.- Ambiente. Clases específicas de exposición ambiental.....	237
3.5.8.- Superficie en planta	237
3.5.9.- Altura libre.....	238
3.5.10.- Ubicación	239
3.5.10.1.- Carga de nieve	239
3.5.10.2.- Carga de viento	240
3.5.10.3.- Sismo	240
3.5.10.4.- Ambiente. Clases generales de exposición ambiental.....	241
3.5.11.- Medianeras con otros edificios.....	241
3.5.12.- Dimensiones del terreno	242
3.5.13.- Fachadas	242
3.5.13.1.- Paneles de hormigón prefabricado	243
3.5.14.- Divisiones	244
3.6.- Definición de los parámetros y variables por tipología de estudio	244
3.6.1.- Estructuras de pórticos – cubierta ligera	244
3.6.1.1.- Carga sobre correas (Qc)	244
3.6.1.2.- Carga de viento (Qv)	247
3.6.1.3.- Longitud de viga principal (Lv)	248
3.6.1.4.- Longitud de vigas secundarias o correas (Lc)	248
3.6.1.5.- Longitud total de pilar (Lp)	249
3.6.1.6.- Separación o intereje de correas (iec / ie / Sepc)	251

3.6.1.7.- Pendiente de la cubierta (Pte)	251
3.6.1.8.- Superficie y volumen de cuadrícula básica (SCu y VCu)	252
3.6.1.9.- Superficie y volumen total construido (St y Vt)	253
3.6.2.- Paneles de fachada	254
3.6.2.1.- Carga de viento en fachada (Qv)	254
3.6.2.2.- Longitud del panel (Lpa)	255
3.6.2.3.- Altura del cerramiento o de paneles (Hpa)	255
3.6.2.4.- Ancho de panel (Apa)	255
3.6.2.5.- Espesor de panel (Epa)	256
3.6.2.6.- Posición de colocación de paneles (Pospa)	256
3.7.- Esquemas de cada tipología	258
3.7.1 Esquema de pórticos - cubierta ligera	258
3.7.2 Esquema de paneles de hormigón prefabricados de fachada en posición horizontal	259
3.8.- Plan de investigación. Análisis de proyectos: fichas de estructuras y base de datos	260
3.8.1.- Introducción	260
3.8.2.- Descripción y análisis de los proyectos constructivos	261
3.8.2.1.- Criterios de uniformidad de la base de datos	263
3.8.2.1.1.- Condiciones de contorno: modelo estructural y tipología	263
3.8.2.1.2- Materiales	264
3.8.2.1.3.- Normativa	265
3.8.2.1.4.- Acciones sobre la estructura, coeficientes parciales de seguridad, ambiente y vida útil	265
3.8.2.1.5.- Criterios para simplificar la forma en planta y sección del edificio	266
3.8.2.1.6.- Simplificación de pórticos de hastial y pórticos interiores	268

3.8.2.1.7.- Simplificación de secciones de vigas, correas y pilares	269
3.8.2.2.- Fichas y esquemas de proyectos	269
3.8.3.- Definición de la variable de gasto - optimización	270
3.8.3.1.- Costes unitarios de fabricación. Materiales	272
3.8.3.2.- Coeficientes de homogeneización (K)	274
3.8.3.2.1.- Coeficiente de homogeneización de pilares.....	275
3.8.3.2.2.- Coeficiente de homogeneización en vigas.....	276
3.8.3.2.3.- Coeficiente de homogeneización en correas	278
3.8.3.2.4.- Tabla resumen de coeficientes de homogeneización de materiales por tipología de elemento, hormigón empleado y tipo de armado.....	279
3.8.4.- Base de datos	279
 Capítulo 4. Análisis estadístico y optimización. Discusión de resultados en cuadrículas	 293
4.1.- Introducción	293
4.2.- Estudio estadístico	297
4.2.1.- Explotación descriptiva-cuantitativa	297
4.2.2.- Tablas de medidas de posición de los parámetros estudiados	299
4.2.2.1.-Medidas de posición de correas	301
4.2.2.2.-Medidas de posición de vigas.....	302
4.2.2.3.-Medidas de posición de pilares. Datos de cuadrícula básica y de edificio completo.....	303
4.2.3.- Tablas y gráficos de frecuencias por parámetro	304
4.2.3.1.- Carga sobre correas	306
4.2.3.2.- Longitud de correas.....	307
4.2.3.3.- Intereje o separación de correas	308
4.2.3.4.- Canto de correas	309
4.2.3.5.- Vigas deltas	310

4.2.3.5.1.- Pendiente del faldón de cubierta en vigas deltas	310
4.2.3.5.2.- Longitud de vigas deltas.....	311
4.2.3.5.3.- Cantos de vigas deltas	312
4.2.3.6.- Vigas I de sección constante	313
4.2.3.6.1.- Pendiente del faldón de cubierta en vigas I.....	313
4.2.3.6.2.- Longitud de vigas I	314
4.2.3.6.3.- Canto de vigas I	315
4.2.3.7.- Carga de viento en paramentos verticales.....	316
4.2.3.8.- Altura libre de pilar	317
4.2.3.9.- Longitud total de pilar.....	318
4.2.3.10.- Dimensión máxima de la sección del pilar (Dmaxp).....	319
4.2.3.11.- Dimensión mínima de la sección de pilar (Dminp)	320
4.2.3.12.- Superficie de cuadrícula básica construida (Scu)	321
4.2.3.13.- Volumen de cuadrícula básica construido (Vcu)	322
4.2.3.14.- Superficie total construida en la estructura (St).....	323
4.2.3.15.- Volumen total construido en la estructura (Vt)	324
4.2.4.- Resumen de relaciones luz/canto de vigas y correas.....	325
4.2.5.- Tablas de predimensionado para vigas y correas	326
4.3.- Interpretación de resultados. Optimización	329
4.3.1.- Análisis de gasto mínimo por cuadrícula en la base de datos	330
4.3.1.1.- Análisis global con todas las vigas, por rangos de alturas unificados	332
4.3.1.2.- Análisis en vigas Delta, por rangos de alturas unificados	335
4.3.1.3.- Análisis en vigas I, por rangos de alturas unificados.....	337
4.3.1.4.- Interpretación de resultados de gasto mínimo en cuadrículas de la base de datos	339
4.3.2.- Líneas de tendencia. Análisis de las relaciones entre las longitudes de los elementos estructurales y las secciones de hormigón homogeneizadas	347

4.3.2.1.- Líneas de tendencia en correas	348
4.3.2.2.- Líneas de tendencia en vigas	351
4.3.2.3.- Líneas de tendencia en vigas deltas.....	354
4.3.2.4.- Líneas de tendencia en vigas I	357
4.3.2.5.- Líneas de tendencia en pilares	360
4.3.2.6.- Tablas resumen de líneas de tendencia	366
4.3.2.7.- Relación en altura libre y longitud de pilar	371
4.3.3.- Desarrollo de ecuación general de optimización en cuadrículas o ecuación de gasto	375
4.3.4.- Análisis con GeoGebra	381
4.3.4.1.- Análisis de mínimos absolutos. Cuadrícula básica óptima	383
4.3.4.1.1.- Estudio 1: Análisis con ecuaciones generales, independientemente de las cargas y de la longitud de vigas en pilares. Dato: la longitud de pilar (L_p)	386
4.3.4.1.2.- Estudio 2: Análisis con ecuaciones generales, independientemente de las cargas y de la longitud de vigas en pilares. Dato: la altura libre de pilar (Hlp)	390
4.3.4.2.- Análisis con la función Acota $f(x)$. Mínimo de la función acota .	395
4.3.4.2.1.- Estudio 3: Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto. Dato L_p . Análisis con ecuaciones generales	397
4.3.4.2.2.- Estudio 4: Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto. Dato Hlp . Análisis con ecuaciones generales	400
4.3.4.2.3.- Estudio 5. Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto. Variación de la Hlp	402
4.3.4.2.4.- Estudio 6. Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto. Variación de interese de correas	409
4.3.4.2.5.- Estudio 7. Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto. Variación de la longitud de correas	415
4.3.4.2.6.- Tabla resumen de resultados de longitudes óptimas de vigas y gastos mínimos por metro cuadrado de cuadrícula construida	424

4.3.5.- Criterios para la optimización. Conclusiones.....	435
Capítulo 5. Paneles prefabricados de hormigón en fachadas	439
5.1.- Introducción	439
5.2.- Criterios básicos de dimensionado de paneles.....	441
5.3.- Resistencia al fuego y propiedades termoacústicas	444
5.3.1.- Comportamiento en caso de incendio	444
5.3.2.- Propiedades acústicas	446
5.3.3.- Propiedades térmicas.....	447
5.4.- Análisis de los paneles de la base de datos	451
5.5.- Optimización de propiedades y recomendaciones de diseño	453
5.6.- Conclusiones locales en paneles	460
5.7.- Análisis y optimización del comportamiento térmico de edificios industriales de hormigón prefabricado	461
5.7.1.- Demanda del edificio.....	462
5.7.2.- Definición de los edificios	464
5.7.2.1.- Definición del edificio 1 – planta rectangular	464
5.7.2.2.- Definición del edificio 2 – planta cuadrada	465
5.7.3.- Propiedades de los paneles	466
5.7.4.- Modelización de los edificios	467
5.7.5.- Análisis de resultados en edificios globales	470
5.7.6.- Conclusiones respecto a fachadas en edificios completos.....	473
Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados en estructuras completas	475
6.1.- Introducción	475
6.2.- Desarrollo de los coeficientes de forma	476

6.2.1.- Planteamiento del modelo	476
6.2.2.- Número de elementos estructurales en la estructura completa	479
6.2.3.- Coeficientes de forma en estructura y paneles	481
6.2.3.1.- Coeficientes de forma para estructuras de vigas principales	482
6.2.3.2.- Coeficientes de forma para testeros o hastiales	483
6.2.3.3.- Coeficientes de forma en función de la tipología de cubierta. Influencia de la pendiente y faldones en la tipología de vigas I ...	486
6.2.3.4.- Coeficientes de forma en fachadas	487
6.2.4.- Ratio de fachada por superficie construida	489
6.2.4.1.- Superficie mínima de fachada.....	489
6.2.4.2.- Influencia del tamaño del edificio en el gasto de fachada.....	492
6.2.5.- Cinco ejemplos de edificios teóricos, analizados mediante coeficientes de forma y el ratio de fachada por superficie construida	502
6.3.- Análisis de estructura de edificios completos. Aplicación de los coeficientes de forma a la base de datos general.....	515
6.3.1.- Verificación del método de los coeficientes de forma	515
6.3.2.- Análisis global con todas las vigas, por rango de alturas unificado..	517
6.3.3.- Análisis para vigas Delta, por rango de alturas unificado.....	520
6.3.4.- Análisis para vigas I, por rangos de alturas unificado	521
6.3.5.- Interpretación de resultados de gastos mínimos en estructuras completas de la base de datos.....	523
6.3.6.- Incorporación de las fachadas al análisis de estructuras en edificios completos.....	531
6.3.7.- El transporte y montaje de estructura y paneles	542
 Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	555
7.1.- Introducción	555
7.2.- Conclusiones	557
7.2.1.- Respecto al estado del arte	557

7.2.2.- Respecto a la base de datos de la tesis	558
7.2.3.-Respecto al análisis de la cuadrícula básica con GeoGebra.....	562
7.2.4.- Respecto a los cerramientos de fachada	564
7.2.5.- Respecto a los edificios completos	566
7.2.6.- Conclusiones finales	570
7.3.- Futuras líneas de investigación	573
 Bibliografía.....	575
 Anexos	601

Índice de figuras

Capítulo 1. Introducción

Figura 1.1. Gráfico Coste-Tiempo en un proyecto de construcción. Efecto de los costes y costes acumulados. Reproducción de Kuprenas, J. el al. (2016)	5
Figura 1.2. Etapas previas. Proceso de gestación de una estructura. Fuentes: Rui-Wamba, J (1998) y Rice, P. (2009)	6
Figura 1.3. Etapas previas. Camino del folio en blanco a la propuesta optimizada	7

Capítulo 2. Estado actual del conocimiento

Figura 2.1. Viga de ensayo de Frankfurt por E. Freyssinet. Maqueta a escala 1/3 (20 m) 1933-1936. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A., (1978)	18
Figura 2.2. Colocación de vainas. Pasarela de peatones de Bully- Grenay por E. Freyssinet. 1944. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A., (1978)	18
Figura 2.3. Viga prefabricada pretensada de 63 m en Brest por E. Freyssinet en 1947. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1978)	19
Figura 2.4. Estructuras de Eduardo Torroja. Acueducto de Tempul 1925, Mercado de Algeciras 1935, Acueducto de Alloz 1939. Reproducidas de Torroja, E. (1999)	19
Figura 2.5. Portada de las revistas de la Asociación Española del hormigón Pretensado del IETcc, en 1961 y 1962. Reproducidas de Asociación técnica del hormigón pretensado. Boletín nº 61 y nº 62. IETcc	20
Figura 2.6. Piezas huecas pretensadas. Vigas Hueso. Fisac, M. (1970)	22
Figura 2.7. Logotipo de viguetas Freyssi década de 1940, ensayo de las vigas del primer puente pretensado en España en 1951, forjado de cubierta realizado con viguetas pretensadas en la década de 1950, cubierta con elementos prefabricados pretensados década 1950, cercha con pares-tirantes y viguetas pretensadas, década 1950, naves rurales década 1960. Reproducidas de Burón, M. (1995)	24
Figura 2.8. Primeros edificios totalmente prefabricados, finales década 1960, Almacén Corte Ingles Valdemoro, década 1970, cubierta de gran superficie con deltas, década 1970, vigas especiales Centro comercial Alcampo Valencia, década 1980, piezas de muro curvas en edificio Azca, década 1980, centro comercial Aluche, década de 1990. Reproducidas de Burón, M. (1995)	25
Figura 2.9. Modulación y líneas de coordinación en planta o malla de posicionamiento. Ejemplos de composición. Reproducida de Koncz, T. (1962) y esquemas estructurales con diferentes módulos y retículas reproducido de Ching, F.D.K. (2014)	27
Figura 2.10. Dibujo de Jørn Utzon. Reproducida de Campo, A. (2008)	31
Figura 2.11. Mercado de Algeciras, 1935. E. Torroja. Esquema y detalle de zuncho-anillo postesado antes de hormigonar. Tomadas de Torroja, E. (1976) y Torroja, E. (1999)	38
Figura 2.12. Estación de trolebuses de Madrid. 1950. Reproducida de Archivo Carlos Fernández Casado. FC-088. CEHOPU-CEDEX e Koncz, T. (1968)	39
Figura 2.13. Realizaciones Carlos Fernández Casado. Escuela de Ing. Montes (1942), IMENASA (1943), talleres Huarte (1948) y taller INTA (1946). Reproducidas de Huarte y Cía. (1960) y del archivo Carlos Fernández Casado. CEHOPU-CEDEX	41
Figura 2.14. Detalles del sistema de pretensado Barredo (patente). Reproducidas de ATEP (1970)	42
Figura 2.15. Para la factoría de ENSIDESA en Avilés, en 1954. Proyecto de Huarte y Cía, con Fernández Casado. Reproducida de Koncz, T. (1968)	43

Figura 2.16. Nave Metalúrgica Santa Ana en Linares, en 1956. Reproducida de Archivo Carlos Fernández Casado. FC-093. CEHOPU-CEDEX.....	45
Figura 2.17. Vigas por dovelas para la cubierta de la Central Hidroeléctrica de Saltos del Cortijo. 1955. Reproducidas de ATEP (1970)	46
Figura 2.18. Cubierta Garaje SAICA en Valencia, 1954. Reproducidas de ATEP (1970)	46
Figura 2.19. Cubierta nave Valenciana de Cementos, 1954. Reproducidas de ATEP (1970)	47
Figura 2.20. Cubierta Mercado de Ruzafa, Valencia. 1959. Reproducidas de ATEP (1970)	47
Figura 2.21. Edificio CLESA. 1957. Alejandro de la Sota y J.A. Fernández Ordóñez. Reproducidas del archivo digital Fundación Alejandro de la Sota	48
Figura 2.22. Cubierta ENDASA en Avilés, de 1957. Reproducida de Koncz, T. (1968)	49
Figura 2.23. Proyecto de Fernández Casado, construido por Huarte & Cia. Para INASA en Irurzun. Estimado 1960. Para luces de 21 m. Cercha biarticulada y con tirante, fabricada en dos piezas. Reproducida de Koncz, T. (1968)	50
Figura 2.24. Cubierta nave Siemens. 1959. Reproducidas de ATEP (1970)	50
Figura 2.25. Molde de madera para cercha. Sin datar (década 1950). Reproducidas de Vilagut, F., 1975	51
Figura 2.26. Sección viga Preflex. Reproducidas de Baes, L. (1958)	51
Figura 2.27. Cubiertas laminares plegadas. Universidad laboral de Tarragona. 1956. Reproducidas de ATEP (1970)	52
Figura 2.28. Viga compuesta de tres elementos, armadura continua y fijación con tornillos, de longitud total 22,50 m y viga pretensada de 24 m de longitud. Reproducida de Michailow, W.W. (1958)	53
Figura 2.29. Fábrica de elementos de hormigón prefabricados de Kiefersfelden (Rusia). Reproducida de Michailow, W.W. (1958)	53
Figura 2.30. Fábrica de Matthews y Mumby cerca de Manchester. Arriba en construcción y abajo en funcionamiento para la fabricación de elementos prefabricados. Anterior a 1961. Reproducidas de Brocard, R. (1961)	54
Figura 2.31. Cubierta en diente de sierra para Cimianto – Alicante y Factoría General del Caucho – Torrelavega, 1962. Reproducida de ATEP (1970)	55
Figura 2.32. Cubierta celulosas de Motril, 1962. Reproducida de ATEP (1970)	55
Figura 2.33. Nave para Hytasa - Sevilla. Planos y modelo reducido, 1961. Reproducida de Archivo Carlos Fernández Casado. FC-098. CEHOPU-CEDEX	56
Figura 2.34. Centro de Estudios Hidrográficos, 1963. Reproducida de ATEP (1970)	57
Figura 2.35. Posición relativa y molde para las vigas pretesas de 24 m. Centro de estudios hidrográficos-Madrid. Reproducida de Montaner, J. (1997)	57
Figura 2.36. Cubierta cocheras Talgo en Aravaca, 1963 y sección de viga de Estambrera Riojana, 1965. Reproducidas de ATEP (1970)	58
Figura 2.37. Cubiertas almacenes Fertiberia, 1964-1965. Reproducidas de ATEP (1970)	59
Figura 2.38. Cubierta Intelhorce. 1965. Reproducida de ATEP (1970)	59
Figura 2.39. Cerchas de cubierta cuartel San Lamberto en Zaragoza. 1965. Reproducida de ATEP (1970)	60
Figura 2.40. Terraza volada en chalet Barredo en San Fernando de Henares en 1966. Reproducidas de ATEP (1970)	60
Figura 2.41. Casa Lucio de Fernando Higuera. 1963. Reproducida de Jurado, J. (1996) y fernandohiguera.org/casa-lucio	61

Figura 2.42. Casa la Macarrona de Fernando Higuera. 1971. Reproducida de Jurado, J. (1996) y fernandohiguera.org/casa-la-macarrona	61
Figura 2.43. Paneles alveolares para forjados de piso. Anterior a 1962. Reproducida de AEHP (1962)	62
Figura 2.44. Aparcamiento Plaza de España de Madrid. Anterior a 1970. Tomada de Calavera, J. et al., (1970)	62
Figura 2.45. Vigas postesadas a pie de obra. Puente río Fluvia en Olot en 1967. Reproducidas de ATEP (1970)	63
Figura 2.46. Vigas prefabricadas por dovelas en carretera elevada de Caldetas – Barcelona. 1967. Reproducidas de ATEP (1970)	64
Figura 2.47. Montaje de estructuras prefabricadas con grúas móviles. Reproducidas de ATEP (1970)	64
Figura 2.48. Montaje de estructuras prefabricadas con torres de elevación. Reproducidas de ATEP (1970)	65
Figura 2.49. Realizaciones de cubiertas en hormigón con cerchas de celosía, vigas de alma llena y láminas en hiperboloide. Décadas 1950-1960 y década 1960-1970. Reproducidas de ATEP (1970) de CAMARA, CADE, ALBAJAR Y CIDESA	66
Figura 2.50. Edificio Trema, Madrid 1964. Vigas construidas in situ sobre cimbra. Reproducidas de ATEP (1970)	67
Figura 2.51. Frontón Jai-Alai en Guernica, 1962. Reproducida de ATEP (1970)	68
Figura 2.52. Palacio de los deportes de Oviedo. 1962. Reproducidas de Sánchez del Río, I., (1977), Jurado, J., (1996) y Cassinello, P., (2013)	69
Figura 2.53. Picadero Club de Campo, 1968. Tomadas de ATEP (1970)	70
Figura 2.54. Realizaciones con Cerchas, viga de alma calada, cubierta en arco y lucernario, Vigas Vierendeel. Anteriores a 1975. Reproducidas de Vilagut, F. (1975)	71
Figura 2.55. Celosía parabólica formada por elementos sueltos en Yugoslavia. Anterior a 1968. Reproducida de Koncz, T. (1968)	72
Figura 2.56. Celosía pretensada de cordones paralelos fabricada por L. Rostan, e instalada en Metzingen. Hormigonadas en una sola pieza de 32,30 m, siendo las más largas conocidas de este estilo en la época. Anterior a 1968. Reproducida de Koncz, T. (1968)	72
Figura 2.57. Edificios aeropuerto de Phoenix (Arizona), con elementos en T. Longitud total 45 m, con vuelos por los dos extremos. Anterior a 1968. Reproducida de Koncz, T. (1968)	73
Figura 2.58. Trazado curvo de cables de pretensado. Anterior a 1963. Reproducida de Goffin, G.R. (1963)	73
Figura 2.59. Movimiento de grandes cargas en taller. Reproducida de Payá, M., (1968)	74
Figura 2.60. Edificio Capp Towers Motor Hotel. Construcción y colocación de losas prefabricadas. Anterior a 1964. Reproducida de Bryan, R.H. (1964)	75
Figura 2.61. Moldes metálicos de base reforzada para anclaje de armaduras. Dispositivos de apertura y retirada. Anterior a 1970. Reproducida de FIP, 1970	75
Figura 2.62. Detalle y foto de fachada de los paneles del almacén Pott-Rum y detalle de piezas de fachada en C, para la central telefónica del Oeste en Amsterdam. Anterior a 1968. Reproducidas de Gatz, K., 1968	76
Figura 2.63. Fábrica de curtidos en Montmelo y de Colomer Munmani en Vich, 1970, con vigas “hueso”. Reproducidas de ATEP	77
Figura 2.64. Estudio-taller de M. Fisac y Bodegas Garvey, 1971, con vigas ‘hueso’. Reproducida de ATEP (1974)	78

Figura 2.65. Transporte de viga I-90 de 18 m. Autopista Villalba – Villacastín y Elevación de viga de 26 m para estación Norte en Vilanova. Montaje sobre camión en fábrica para transporte. CADE. Anterior a 1972. Reproducidas de CADE (1972)	79
Figura 2.66. Transporte en Dolly y montaje de vigas I-110, en el enlace de Molins de Rey y montaje de vigas I-110 en el Puente de Puigreig sobre el río Llobregat. CADE. Anterior a 1972. Reproducidas de CADE (1972)	80
Figura 2.67. Ensayo a esfuerzo cortante de vigas TT-100 en los Laboratorios de INTEMAC. Anterior a 1972. Reproducida de CADE (1972)	81
Figura 2.68. Esquema, rangos de uso y realizaciones de tableros de puente con secciones doble T, de PACADAR. Anterior a 1974. Reproducida de ATEP, 1974	82
Figura 2.69. Viga serie I en fábrica. Tipificación de uso de vigas I, T-150 y TT, de CADE. Anterior a 1974. Reproducida de ATEP, 1974	83
Figura 2.70. Tipificación de uso de vigas P, PL y N, de ALVISA. Anterior a 1974. Reproducida de ATEP, 1974	84
Figura 2.71. Transporte de grandes vigas serie N, de ALVISA. Anterior a 1974. Reproducida de ATEP, 1974	85
Figura 2.72. Nueva factoría Michelín en Valladolid, 1972. Montaje, croquis de tipología de vigas y viguetas y anuncio de la obra. Reproducida de ATEP (1974), Del Campo, F. (1973) y Hormigón y Acero nº 107-108	86
Figura 2.73. Nave almacén para El Corte Ingles, 1973. Ejemplo de prefabricación total. Reproducida de ATEP (1974)	88
Figura 2.74. Detalles de jácenas, pilares, vigas canalones, correas y uniones de la nave almacén para El Corte Ingles, 1973. Reproducida de ATEP (1974)	89
Figura 2.75. Naves en polígono Las Mercedes, Barajas (Madrid), 1972. Vigas Doble T de luz 20 m y correas V macizas de 8,4 m. Ejemplo de prefabricación total. Reproducida de ATEP (1974) .	90
Figura 2.76. Makro en Barajas y Barcelona, 1972. Vigas doble T de 14 m, separadas 10 m. Ejemplo de prefabricación total incluyendo paneles de fachada. Reproducida de ATEP (1974)	90
Figura 2.77. Esquema de Dolly de transporte de grandes piezas y camión cargado en fábrica para transporte de paneles prefabricados. Anterior a 1974. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974)	91
Figura 2.78. Montaje de paneles en obra con una auto grúa y pórticos automotor sobre neumáticos para carga de piezas TT en fábrica. Anterior a 1974. Reproducidas de Fernández Ordóñez, J.A. (1974)	92
Figura 2.79. Club Las Lomas. Deltas de 25 m. 1977. Reproducida de ATEP (1978)	93
Figura 2.80. Edificio comercial en Fuenlabrada. Deltas de 20 m. 1975. Reproducida de ATEP (1978)	94
Figura 2.81. Nave industrial INDAS, en San Fernando de Henares. 1977. Deltas (Vigas peraltadas) aligeradas por motivos estéticos, de canto variable de ALVISA de 25 m. Reproducida de ATEP (1978)	94
Figura 2.82. Cubierta pabellón del Ministerio de Agricultura, 1973. Reproducida de ATEP (1974)	95
Figura 2.83. Cubierta pista de hielo del Club de Fútbol Barcelona en 1971. Reproducida de ATEP, 1974	96
Figura 2.84. Pabellón del INI en la Feria de Muestras de Barcelona en 1972. Reproducida de ATEP, 1974	96
Figura 2.85. Banco Bilbao en Palma de Mallorca. 1975. Vigas Preflex de Rubiera de 18,50 m de luz y canto 1,0 m. Reproducida de ATEP, 1978	97

Figura 2.86. Tinglado del Puerto de Algeciras. Vigas Preflex de Rubiera. 1976. Reproducida de ATEP, 1978.....	97
Figura 2.87. Realizaciones con Placas HP para cubiertas (sistema Silberkuhl). Anteriores a 1975. Reproducidas de Vilagut, F. (1975)	98
Figura 2.88. Estructura de naves prefabricadas desmontables de hormigón pretensado (Sistema Guiraudie y Auffeve). Anteriores a 1975. Reproducidas de Vilagut, F., 1975	99
Figura 2.89. Fabricación de paneles en instalaciones fijas, acopio y transporte. Anteriores a 1976. Reproducida de Bender, R., (1976).....	100
Figura 2.90. CASA en Getafe. Anteriores a 1988. Reproducidas de Lleyda, J.L., 1988	101
Figura 2.91. Paneles verticales nervados. Longitud de 17,60 m, y esbeltez de 1/35 en hormigón armado. CASA en Getafe. Anteriores a 1988. Reproducidas de Lleyda, J.L., 1988	102
Figura 2.92. Estructura muelle de Levante (Valencia) con un pórtico biarticulado de tres piezas, separación de pórticos 15,00 m y altura libre 8,50 m. Perspectiva, vista exterior, pórticos en montaje, volteo de pilar, vista exterior. Anteriores a 1989. Reproducidas de Atienza, J.R., 1989	103
Figura 2.93. Vigas de 70 m para la Fira de Barcelona. 1997. Reproducidas de Fira de Barcelona, (1998 y Mateos, J.J. (1997)	104
Figura 2.94. Procedimiento constructivo de Vigas Fira de Barcelona. 1997. Reproducidas de Fira de Barcelona (1998) y Mateos, J.J. (1997).....	105
Figura 2.95. Perspectiva y fase de montaje de estructura prefabricada con nudos rígidos en edificios de varias plantas. Comercial Continente en Aluche-Madrid. 1992-1993. Reproducida de Burón, M. & et al., 2000 y Burón, M. & et al., 1995.....	106
Figura 2.96. Paneles de fachada de sección nervada y paneles de fachada cara lisa. Anterior a 1995. Reproducida de Burón, M., 1995	106
Figura 2.97. Nave industrial prefabricada. Sistema isostático. Anterior a 1995. Reproducida de Burón, M., 1995	107
Figura 2.98. Montaje de vigas artesas de 51 m, a 50 m de altura con grúas automóvil de 400 y 800 t. y montaje nocturno en la M-30 de Madrid. Anterior a 1995. Reproducida de Lleida, J.L., 1995	107
Figura 2.99. Montaje de vigas artesas sobre pilas prefabricadas, auto grúa de 800 t, artesa de 25 m y sección de 6 m ² , y transporte de vigas de 40 m de longitud y 2 m de canto. Anterior a 1995. Reproducida de Lleida, J.L., 1995	108
Figura 2.100. Solución de cubierta a dos aguas de P.M.PLANAS y Sistema TTY de Pujol. Anterior a 1996. Reproducidas de Mateu, J. (1996).....	109
Figura 2.101. Solución con vigas TITANO de PRAINSA y Deltas con placas TTT de TRUMES. Anterior a 1996. Reproducidas de Mateu, J. (1996).....	109
Figura 2.102. Viga YPSILON y VARIANT de Hormipresa, Ondal de PRAINSA. Anterior a 1996. Reproducidas de Mateu, J. (1996).....	110
Figura 2.103. Sistema de vigas GABIANO y vigas FUTURA. Pretersa-Prenavisa. Anterior a 1996. Reproducidas de Mateu, J. (1996).....	110
Figura 2.104. Palacio Congreso y Exposiciones Santiago de Compostela. Alberto Noguerol y Pilar Díez de Prefabricados CASTELO y paneles lisos y nervados de TRUMES. Anterior a 1996. Reproducidas de Mateu, J. (1996).....	111
Figura 2.105. Panel de hormigón chocado en Torre Mapfre en Barcelona de Iñigo Ortíz y Enrique León y panel con función estructural en Edificio Beatriz en Madrid del Arq. Eleuterio Población fabricado por Schokbeton. Celosía autoportante en Pabellón Deportivo y Cultural en Moraleja de Enmedio-Madrid de los Arq. Fernando Espuelas y Pilar Alonso, fabricado por INDAGSA. Anterior a 1996. Reproducidas de Mateu, J. (1996).....	112

Figura 2.106. Montaje de cubierta de vigas deltas en edificio industrial. Reproducida de FIP-ATEP (1996)	113
Figura 2.107. Montaje de paneles nervados TT en fachada. Anterior a 1996. Reproducida de FIP-ATEP (1996)	113
Figura 2.108. Soluciones de estructura de cubierta ligera en edificios industriales. Anteriores a 2001. Reproducida de Burón, M, et al. (2001)	114
Figura 2.109. Soluciones prefabricadas de centros escolares. Anteriores a 2007. Reproducida de Xercavins, E, et al. (2007)	115
Figura 2.110. Diferentes realizaciones con vigas deltas y jácenas I en Europa. Transporte y montaje de vigas deltas de 52 m. en Salamanca. Anteriores a 2014. Reproducida de FIB (2014)	116
Figura 2.111. Otras tipologías de cubierta. Laminas, placas TT, vigas canal, Y o V. Anteriores a 2014. Reproducida de FIB (2014)	117
Figura 2.112. Cubierta con vigas de sección constante y cubierta con vigas delta o peraltadas. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	130
Figura 2.113. Tipología de correas. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	131
Figura 2.114. Detalles de cubrición de cubiertas. Reproducida de IECA-ANDECE., 1996	132
Figura 2.115. Secciones de vigas y secciones de vigas especiales para evacuación de agua. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	132
Figura 2.116. Tipología de paneles por geometría y por composición. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	133
Figura 2.117. Valores habituales de características de paneles. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	133
Figura 2.118. Valores habituales de conductividad térmica de diferentes materiales para la fabricación de paneles prefabricados. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	134
Figura 2.119. Valores orientativos de requisitos de edificios industriales según el tipo de instalación. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	134
Figura 2.120. Sistemas estructurales de hormigón prefabricado. Reproducida de FIP-ATEP, 1996	136
Figura 2.121. Cubiertas de edificios con vigas de canto variable y placas en TT de canto constante y variable en cubiertas sobre vigas rectas. FIP-ATEP, 1996	137
Figura 2.122. Esquema de elementos estructurales y elementos (losas, casetones, placa alveolar, placas de gran luz) para forjados y cubiertas. Reproducida de FIP-ATEP, 1996	137
Figura 2.123. Elementos prefabricados para edificios de grandes luces (pilares y vigas de cubierta). Reproducida de FIP-ATEP, 1996	138
Figura 2.124. Tipologías de paneles de fachadas autoportantes. Reproducida de FIP-ATEP, 1996	138
Figura 2.125. Planteamientos estructurales, deformadas y estabilidad y detalle de conexión pilar-viga articulado. Reproducida: FIP-ATEP, 1996	139
Figura 2.126. Soluciones con estructuras de pórticos 2) y 3). Reproducida de FIP-ATEP, 1996	140
Figura 2.127. Recomendaciones para estructuras de pórticos 2) y 3). Reproducida de FIP-ATEP, 1996	140
Figura 2.128. Longitudes recomendadas para cubiertas con placas de gran luz sobre pórticos longitudinales. Fotografía de placa de gran luz. Reproducida de FIP-ATEP, 1996	141
Figura 2.129. Otros ejemplos de cubiertas con pórticos prefabricados. Reproducida de FIP-ATEP, 1996	141

Figura 2.130. Mínimo espesor de panel (mm), en función de su longitud (m) Reproducida de FIP-ATEP, 1996.....	142
Figura 2.131. Cantos de diferentes tipos de forjado para una luz máxima dada y una sobrecarga de 4 kN/m ² . Reproducida de AIDEPLA M-04 (2004)	143
Figura 2.132. Esquema de trabajo de pilares en ménsula con vigas simplemente apoyadas. FIB, 2014.....	144
Figura 2.133. Sistema de pórticos con pilares y vigas y sistema de placas sobre vigas paralelas. Reproducida de FIB (2014).....	144
Figura 2.134. Sistemas estructurales en hormigón prefabricado. Reproducida de FIB (2014) ...	145
Figura 2.135. Directrices de medidas en estructuras de esqueleto. Reproducida de FIB (2014).....	146
Figura 2.136. Proceso de desarrollo de los sistemas constructivos. Reproducida de Kontz, T. (1977).....	148
Figura 2.137. Tareas para resolución de un modelo de optimización estructural a partir de las condiciones iniciales. Reproducida de Entrenas, J.A. (1987).....	149
Figura 2.138. Modelo de estructura de acero para edificio de una sola planta Kravanjaa, (2013)	151
Figura 2.139. Modelo de estructura de acero para edificio de una sola planta. Diseño óptimo del edificio industrial de única planta realizado con pórticos de perfiles HEA e IPE. Reproducida de Kravanjaa, (2010)	152
Figura 2.140. Diseño más económico para un marco de 13 m de paso libre, mediante técnicas heurísticas. Reproducido de Perea, C., (2008).....	153
Figura 2.141. Planteamiento del diseño óptimo de forjados mixtos. Reproducida de Alcalá, J, et al. (2014).....	153
Figura 2.142. Análisis del incremento de coste con la variación de precios de hormigón y acero. Reproducida de Martí, J.V., et al. (2014)	154
Figura 2.143. Diagrama de extracción y difusión del conocimiento. Reproducida de Yepes, V., et al. (2014).....	155
Figura 2.144. Relación luz-coste en forjado de losa postesada. Reproducida de Alcalá, J., et al. (2014).....	155
Figura 2.145. Tipologías de correas para cubiertas. Reproducida de Koncz, T., 1968.....	157
Figura 2.146. Valores de placas de cubierta. Reproducida de Koncz, T., 1968.....	158
Figura 2.147. Elementos de cubierta para grandes luces. Reproducida de Koncz, T., 1968.....	159
Figura 2.148. Sistema de esqueleto con elementos lineales, sistemas de esqueleto con piezas porticadas (centro), sistema de pórtico rígido. Reproducida de Koncz, T., 1968	160
Figura 2.149. Nave única. Serie tipificada de IMBAU GmbH. Desde 12,50 a 25,00 m, con 7,50 m entre pórticos y 5,00 m de altura libre. Reproducida de Koncz, T. (1968).....	161
Figura 2.150. Tabla de la Stahlton AG de Zurich para jácenas a dos aguas, en función de la carga útil admisible. Reproducida de Koncz, T. (1968)	161
Figura 2.151. Esquema de cubierta de naves con elementos lineales, con unión en nudo A, apoyada o empotrada / semiempotrada. Ejemplo de Nave múltiple. Serie tipificada de IMBAU GmbH. 2x17,50 m. Reproducida de Koncz, T. (1968)	162
Figura 2.152. Sistemas portantes de cubiertas con elementos lineales. Reproducida de Koncz, T. (1968).....	163
Figura 2.153. Sistema de cubiertas con pórticos. Reproducida de Koncz, T. (1968).....	164
Figura 2.154. Sistema de cubiertas. Reproducida de Koncz, T. (1968)	165

Figura 2.155. Sistemas de celosías. Reproducida de Koncz, T. (1968)	166
Figura 2.156. Soluciones de estructuras de celosía con jácena articulada hasta 60 m y con uniones rígidas hasta 30 m. Pórticos rígidos de celosía hasta 20 m y triarticulados hasta 30 m. Estructuras volumétricas de celosía hasta 50 m. Koncz, 1968	166
Figura 2.157. Sistema de pilares empotrado y jácena/arco articulado en cabeza de pilar. a1 y a2) arcos bi o triarticulados con tirante, b1 y b2) pórticos bi o triarticulados con tirante, c1) arco de tres cordones, c2) arco con estructura romboidal de celosía. Reproducida de Koncz, T. (1968)	167
Figura 2.158. Sistemas de placas portantes en forma de vigas. Reproducida de Koncz, T. (1968)	168
Figura 2.159. Placas portantes superficiales con elementos de vigas huecas. Tipos: perforaciones múltiples, cajas huecas procedentes de estructura plegada, cajas huecas con alas voladas. Reproducida de Koncz, T. (1968)	168
Figura 2.160. Estructuras plegadas en U. Sistema Koncz. Reproducida de Koncz, T. (1968)...	169
Figura 2.161. Estructura tipo cáscara. Tonel, ondulada y con refuerzo de vigueta inferior. Reproducida de Koncz, T. (1968)	169
Figura 2.162. Capacidad de rendimiento de secciones de hormigón pretensado. Reproducida de Koncz, T. (1968).....	170
Figura 2.163. Explicación de eficiencia de vigas sometidas a flexión. Reproducida de Kuprenas, J. et al. (2016)	171
Figura 2.164. Detalle de cercha desmontable de hormigón. Reproducida de Payá, M., (1968)	172
Figura 2.165. Camino hacia el 'metaproyecto' constructivo, según Oliveri, G.M. Reproducida de Oliveri, G.M. (1972)	173
Figura 2.166. Niveles de prefabricación, según Tatum C.B. Reproducida de Tatum C.B. et al. (1987)	174
Figura 2.167. Tipologías estructurales predominantes, según encuesta FIP en 1971. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).....	175
Figura 2.168. Tabla de uniones según encuesta FIP, en 1971. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974)	176
Figura 2.169. Esquema de las naves de mayor futuro, según encuesta FIP en 1971. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).....	177
Figura 2.170. Soluciones de sistemas de pórticos más universales (1/3). Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).....	178
Figura 2.171. Soluciones de sistemas de pórticos más universales (2/3). Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).....	179
Figura 2.172. Soluciones de sistemas de pórticos más universales (3/3). Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).....	180
Figura 2.173. Tablas de pesos máximos en toneladas del transporte en diferentes países europeos. Reproducidas de Fernández Ordóñez, J.A. (1974)	181
Figura 2.174. Tablas de largo y ancho, para el transporte en diferentes países europeos. Reproducidas de Fernández Ordóñez, J.A. (1974)	182
Figura 2.175. Realizaciones de nave con vigas peraltadas y paneles con nervios. Reproducida de Lozano G. (1979)	183
Figura 2.176. Foto y esquema de empotramiento de pilares en cáliz en cimentación. Reproducida de Lozano G. (1979)	183
Figura 2.177. Esquema de uniones húmedas pilar-viga y continuidad de correas. Reproducida de Lozano G. (1979)	184

Figura 2.178. Montaje de pilares y vigas. Reproducida de Lozano G. (1979).....	184
Figura 2.179. Instalaciones estandarizadas de la firma danesa Hojgaard y Schultz, módulos de crecimiento de las naves 2,4 m y 4,8 m. Reproducida de Nissen, H., 1976.....	186
Figura 2.180. Relaciones luz/canto en vigas T pretensadas, en el rango de 10-20 m. Reproducida de Röhm, W., 1977	187
Figura 2.181. Definición de pilares prefabricados propuesta por Morán, F. Reproducida de Morán, F. (1994)	188
Figura 2.182. Detalle constructivo de la unión viga-columna por encastre seca y unión por encastre modificada.....	189
Figura 2.183. Detalle constructivo de la unión viga-columna unión simplemente apoyada propuesta por Angelo Mangiarotti en los años 60 para un edificio industrial en Milán. Reproducida de Araujo, R. (1996).....	190
Figura 2.184. Detalle constructivo de tipos de uniones pilar-viga propuesta por Koncz, T., 1975. Reproducida de Araujo, R. (1996)	191
Figura 2.185. Esquema de naves con vigas peraltadas y con vigas de sección constante y placas TT. Nave de pórticos con vigas de sección constante y peraltadas de PACADAR. Reproducida de Calavera, J. et al., 1999	193
Figura 2.186. Esquema cubierta con cerchas y pares y tirantes. Foto de cerchas de PACADAR, arcos de CADE y esquema en dientes de sierra. Esquema de cubiertas laminares. Reproducida de Calavera, J. et al., 1999	194
Figura 2.187. Soluciones de vigas de cubierta. Reproducida de Bachmann, H., 2011	195
Figura 2.188. Secciones de vigas de cubierta I y T. Reproducida de Bachmann, H., 2011	196
Figura 2.189. Secciones de pilares. Reproducida de Bachmann, H., 2011	197
Figura 2.190. Factores climáticos y funciones del cerramiento de fachada. Reproducida de Bachmann, H., 2011	197
Figura 2.191. Esquema de diferentes configuraciones del cerramiento de fachada. Reproducida de Bachmann, H., 2011	198
Figura 2.192. Dos enfoques para integrar la estandarización del diseño con la modularización. Reproducida de O'Connor, J.T., 2015.....	199
Figura 2.193. Modularización versus estandarización: niveles aproximados del sector actual. Reproducida de O'Connor, J.T. (2015)	200
Figura 2.194. Costes y beneficios del enfoque modular estandarizado de plantas (MSP). Reproducida de O'Connor, J.T. (2015)	200
Figura 2.195. Estructuras de grandes luces. Reproducida de Ching, F.D.K. (2014)	202
Figura 2.196. Planteamientos de retícula estructural. Reproducida de Ching, F.D.K. (2014)	203
Figura 2.197. Sistemas de estructuras. Reproducida de Engel, H. (2018)	204

Capítulo 3. Plan de investigación: Análisis de tipologías, variables de diseño y geométricas. Fichas de estructuras y base de datos

Figura 3.1. Perspectiva del interior de una estructura de pórticos para cubierta ligera.....	217
Figura 3.2. Montaje de pilares en edificio industrial.....	221
Figura 3.3. Estructura de pórticos - cubierta ligera terminada la fase de montaje.....	223
Figura 3.4. Detalle de estructura con viga delta en cubierta	223
Figura 3.5. Foto de acopio y transporte de correas pretensadas	226

Figura 3.6. Perspectiva interior y exterior de estructura de pórticos con correas de entrevigado	226
Figura 3.7. Hueco para ventana en fachada proyectada con paneles prefabricados de hormigón	227
Figura 3.8. Ventanales corridos proyectados en fachada con paneles prefabricados de hormigón y fachadas ciegas en edificio industrial.....	228
Figura 3.9. Foto de paneles prefabricados de hormigón para fachada: con acabado exterior en árido blanco Macael y lisos con ventanales verticales pintados en blanco y matriz texturizada en zona inferior	231
Figura 3.10. Detalle de Tabla 3.1 CTE DB SE-AE	245
Figura 3.11. Coeficientes de presión exterior en paramentos verticales. Reproducida de CTE DB SE-AE (Anejo D)	247
Figura 3.12. Foto de vista interior en estructura de pórticos-cubierta ligera	252
Figura 3.13. Geometría, elementos y parámetros básicos de estudio en cuadrículas de estructuras de cubiertas ligeras. Con S_{epc} igual a i_{ec} y H_t igual a L_p	253
Figura 3.14. Tabla D.1, de coeficientes de presión exterior en paramentos verticales. Reproducida de Anejo D del CTE DB SE-A.E.....	254
Figura 3.15. Paneles horizontales con matriz Reckli y montaje de paneles horizontales de fachada en acabado liso	256
Figura 3.16. Paneles verticales y horizontales.....	257
Figura 3.17. Fachada con paneles encarrilados entre pilares, a cara exterior de pilar	257
Figura 3.18. Esquema de pórticos – cubiertas ligeras	258
Figura 3.19. Esquema de paneles de hormigón prefabricados de fachada en posición horizontal	259
Figura 3.20. Esquema de planta y cuadrícula básica de edificio rectangular, con el número de vanos de correas en el eje Y y el número de vigas por pórtico en el eje X. Esquema tridimensional de edificio y cuadrícula básica rectangular, con el número de vanos de correas (m) en el eje Y y el número de vigas por pórtico (n) en el eje X. Representados pilares y vigas	268

Capítulo 4. Análisis estadístico y optimización. Discusión de resultados en cuadrículas

Figura 4.1. Primera aproximación al esquema de cuadrícula básica con los valores medios de la base de datos.....	296
Figura 4.2. Gráfico de frecuencias de Q_c	306
Figura 4.3. Gráfico de frecuencias de L_c	307
Figura 4.4. Gráfico de frecuencias de i_{ec}	308
Figura 4.5. Gráfico de frecuencias de C_c	309
Figura 4.6. Gráfico de frecuencias de P_{tevD}	310
Figura 4.7. Gráfico de frecuencias de L_vD	311
Figura 4.8. Gráfico de frecuencias de C_vD	312
Figura 4.9. Gráfico de frecuencias de P_{tevl}	313
Figura 4.10. Tabla de valores y tabla y gráfico de frecuencias de L_vl	314
Figura 4.11. Gráfico de frecuencias de C_vl	315
Figura 4.12. Tabla de valores y tabla y gráfico de frecuencias de Q_v	316

Figura 4.13. Gráfico de frecuencias de Hlp	317
Figura 4.14. Gráfico de frecuencias de Lp.....	318
Figura 4.15. Gráfico de frecuencias de Dmaxp	319
Figura 4.16. Gráfico de frecuencias de Dminp	320
Figura 4.17. Tabla de valores y tabla y gráfico de frecuencias de Scu	321
Figura 4.18. Gráfico de frecuencias de Vcu.....	322
Figura 4.19. Gráfico de frecuencias de St	323
Figura 4.20. Gráfico de frecuencias de Vt	324
Figura 4.21. Gasto medio óptimo por m2 construido de cuadrícula básica en función de la altura libre unificada.....	342
Figura 4.22. Correas. Relación global entre SHhc y Lc.....	348
Figura 4.23. Correas para carga Qlc1. Relación entre Lc y SHhc.....	349
Figura 4.24. Correas para carga Qlc2. Relación entre Lc y SHhc.....	350
Figura 4.25. Correas para carga Qlc3. Relación entre Lc y SHhc.....	350
Figura 4.26. Vigas. Relación global entre SHhv y Lv	351
Figura 4.27. Vigas para carga Qlv1. Relación global entre Lv y SHhv	352
Figura 4.28. Vigas para carga Qlv2. Relación global entre Lv y SHhv	353
Figura 4.29. Vigas para carga Qlv3. Relación global entre Lv y SHhv	353
Figura 4.30. Vigas deltas. Relación global entre LvD y SHhvD	354
Figura 4.31. Vigas deltas para carga QlvD1. Relación entre LvD y SHhvD	355
Figura 4.32. Vigas deltas para QlvD2. Relación entre LvD y SHhvD	355
Figura 4.33. Vigas deltas para carga QlvD3. Relación entre LvD y SHhvD	356
Figura 4.34. Vigas deltas para carga QlvD3 corregido. Relación entre LvD y SHhvD	357
Figura 4.35. Jácenas I. Relación global entre Lvl y SHhvl	358
Figura 4.36. Jácenas I para carga QlvI1. Relación entre Lvl y SHhvl	358
Figura 4.37. Jácenas I para carga QlvI2. Relación entre Lvl y SHhvl	359
Figura 4.38. Jácenas I para carga QlvI3. Relación entre Lvl y SHhvl	359
Figura 4.39. Pilares. Relación global entre Hlp y SHhp.....	360
Figura 4.40. Pilares. Relación global entre Lp y SHhp	361
Figura 4.41. Pilares para longitud de vigas L1. Relación entre Hlp y SHhp	362
Figura 4.42. Pilares para longitud de vigas L1. Relación entre Lp y SHhp	362
Figura 4.43. Pilares para longitud de vigas L2. Relación entre Hlp y SHhp	363
Figura 4.44. Pilares para longitud de vigas L2. Relación entre Lp y SHhp	363
Figura 4.45. Pilares para longitud de vigas L3. Relación entre Hlp y SHhp	364
Figura 4.46. Pilares para longitud de vigas L3. Relación entre Lp y SHhp	364
Figura 4.47. Pilares para longitud de vigas L4. Relación entre Hlp y SHhp	365
Figura 4.48. Pilares para longitud de vigas L4. Relación entre Lp y SHhp	365
Figura 4.49. Pilares. Gráficas de relación global entre Hlp y Lp.....	371

Figura 4.50. Pilares. Gráficas de relación entre Hlp y Lp. Para vigas de longitud Lv1 (8,00-20,00 m)	372
Figura 4.51. Pilares. Gráficas de relación entre Hlp y Lp. Para vigas de longitud Lv2 (20,00-30,00 m)	372
Figura 4.52. Pilares. Gráficas de relación entre Hlp y Lp. Para vigas de longitud Lv3 (30,00-40,00 m)	373
Figura 4.53. Pilares. Gráficas de relación entre Hlp y Lp. Para vigas de longitud Lv4 (40,00-52,00 m)	373
Figura 4.54. Esquema general de estructura. Lv en eje X y Lc en el eje Y	376
Figura 4.55. Esquema de estructura mínima denominada cuadrícula básica Con Sepc igual a iec y Ht igual a Lp.	378
Figura 4.56. Ejemplo de representación de la función de gasto F1 en GeoGebra. Mínimo 1, intersección de los ceros de la derivada parcial respecto a la longitud de viga (curva verde) y de los ceros de la derivada parcial respecto a la longitud de correa (curva roja)	384
Figura 4.57. Función de gasto F1 en GeoGebra. Zona regida por el comportamiento de los términos racionales.....	384
Figura 4.58. La derivada de la función de gasto F1 respecto de x (Lv) e y (Lc)	385
Figura 4.59. El corte de las dos curvas de ceros da el mínimo "Mínimo 1", de la función F1.....	385
Figura 4.60. Estudio 1: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos con las ecuaciones generales y con Lp. Vigas delta	387
Figura 4.61. Estudio 1: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos con las ecuaciones generales y con Lp. Vigas I.....	387
Figura 4.62. Estudio 1.1: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Lp. Rastreo: iec 1,0 - 3,0 m. Viga delta	388
Figura 4.63. Estudio 1.1: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Lp. Rastreo: iec 1,0 - 3,0 m. Viga I	388
Figura 4.64. Estudio 1.2: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Lp. Rastreo Lp 7,8-20,8 m. Viga delta	389
Figura 4.65. Estudio 1.2: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Lp. Rastreo Lp 7,8-20,8 m. Viga I.....	389
Figura 4.66. Estudio 2: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Viga delta	391
Figura 4.67. Estudio 2: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Jácena I...	391
Figura 4.68. Estudio 2.1: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Hlp. Rastreo iec 1,0-3,0 m. Viga delta	392
Figura 4.69. Estudio 2.1: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Hlp. Rastreo iec 1,0-3,0 m. Viga I.....	392
Figura 4.70. Estudio 2.2: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Hlp. Rastreo Hlp 6,0-16,0 m. Viga delta	393
Figura 4.71. Estudio 2.2: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Hlp. Rastreo Hlp 6,0-16,0 m. Viga I	393
Figura 4.72. Estudio 2.3: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Hlp. Diagramas de rastreos desde iec 1,0 hasta 3,0 m y Hlp 6,0 hasta 16,0 m. Viga delta	394
Figura 4.73. Estudio 2.3: Resultados con GeoGebra: Estudio de mínimos absolutos. Ecuaciones generales. Dato Hlp. Diagramas de rastreos desde iec 1,0 hasta 3,0 m y Hlp 6,0 hasta 16,0 m. Viga I	394

Figura 4.74. Ejemplo de representación de la función Acota (Lv). Con longitud de viga (m) en eje x y gasto en eje y (m^3Hh/m^2Cu)	396
Figura 4.75. Estudio 3: Resultados con GeoGebra: Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto (consumo de hormigón homogeneizado por superficie construida de cuadrícula). Viga delta	398
Figura 4.76. Estudio 3: Resultados con GeoGebra: Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto (consumo de hormigón homogeneizado por superficie construida de cuadrícula). Viga I	398
Figura 4.77. Estudio 4: Resultados con GeoGebra: Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto (consumo de hormigón homogeneizado por superficie construida de cuadrícula). Viga delta	401
Figura 4.78. Estudio 4: Resultados con GeoGebra: Estudio de longitud de viga óptima para el mínimo gasto (consumo de hormigón homogeneizado por superficie construida de cuadrícula). Viga I	401
Figura 4.79. Estudio 5.1: Variación de Hlp, para $iec=1,0m$ y Lc fijas. Vigas D	402
Figura 4.80. Estudio 5.1: Variación de Hlp, para $iec=1,0m$ y Lc fijas. Vigas I	402
Figura 4.81. Estudio 5.2: Variación de Hlp, para $iec=2,0 m$ y Lc fijas. Vigas D	403
Figura 4.82. Estudio 5.2: Variación de Hlp, para $iec=2,0 m$ y Lc fijas. Vigas I	403
Figura 4.83. Estudio 5.3: Variación de Hlp, para $iec=3,0 m$ y Lc fijas. Vigas D	404
Figura 4.84. Estudio 5.3: Variación de Hlp, para $iec=3,00 m$ y Lc fijas. Vigas I	404
Figura 4.85. Estudio 5.4: Variación de Hlp, para iec fijas y Lc 6,0 m. Vigas D	405
Figura 4.86. Estudio 5.4: Variación de Hlp, para iec fijas y Lc 6,0 m. Vigas I	405
Figura 4.87. Estudio 5.5: Variación de Hlp, para iec fijas y Lc 8,00 m. Vigas D	406
Figura 4.88. Estudio 5.5: Variación de Hlp, para iec fijas y Lc 8,00 m. Vigas I	406
Figura 4.89. Estudio 5.6: Variación de Hlp, iec fijas y Lc 10,0 m. Vigas D	407
Figura 4.90. Estudio 5.6: Variación de Hlp, iec fijas y Lc 10,0 m. Vigas I	407
Figura 4.91. Estudio 5.7: Variación de Hlp, iec fijas y Lc 12,0 m. Vigas D	408
Figura 4.92. Estudio 5.7: Variación de Hlp, iec fijas y Lc 12,0 m. Vigas I	408
Figura 4.93. Estudio 6.1: Variación de iec , para $Hlp=6 m$ y Lc fijas. Viga D	409
Figura 4.94. Estudio 6.1: Variación de iec , para $Hlp=6 m$ y Lc fijas. Viga I	409
Figura 4.95. Estudio 6.2: Variación de iec , para $Hlp=8 m$ y Lc fijas. Viga D	410
Figura 4.96. Estudio 6.2: Variación de iec , para $Hlp=8 m$ y Lc fijas. Viga I	410
Figura 4.97. Estudio 6.3: Variación de iec , para $Hlp=10 m$ y Lc fijas. Viga D	411
Figura 4.98. Estudio 6.3: Variación de iec , para $Hlp=10 m$ y Lc fijas. Viga I	411
Figura 4.99. Estudio 6.4: Variación de iec , para $Hlp=12 m$ y Lc fijas. Viga D	412
Figura 4.100. Estudio 6.4: Variación de iec , para $Hlp=12 m$ y Lc fijas. Viga I	412
Figura 4.101. Estudio 6.5: Variación de iec , para $Hlp=14 m$ y Lc fijas. Viga D	413
Figura 4.102. Estudio 6.5: Variación de iec , para $Hlp=14 m$ y Lc fijas. Viga I	413
Figura 4.103. Estudio 6.6: Variación de iec , para $Hlp=16 m$ y Lc fijas. Viga D	414
Figura 4.104. Estudio 6.6: Variación de iec , para $Hlp=16 m$ y Lc fijas. Viga I	414
Figura 4.105. Estudio 7.1: Variación de Lc, para $iec=1,00$ y Hlp fija en 10,00 m. Viga D	415

Figura 4.106. Estudio 7.1: Variación de Lc, para $ie_c=1,00$ y Hlp fija en 10,00 m. Viga I	415
Figura 4.107. Estudio 7.2: Variación de Lc, para $ie_c=2,00$ y Hlp fija en 10,00 m. Viga D	416
Figura 4.108. Estudio 7.2: Variación de Lc, para $ie_c=2,00$ y Hlp fija en 10,00 m. Viga I	416
Figura 4.109. Estudio 7.3: Variación de Lc, para $ie_c=3,00$ y Hlp fija en 10,00 m. Viga D	417
Figura 4.110. Estudio 7.3: Variación de Lc, para $ie_c=3,00$ y Hlp fija en 10,00 m. Viga I	417
Figura 4.111. Estudio 7.4: Variación de Lc, para $Hlp=6,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga D	418
Figura 4.112. Estudio 7.4: Variación de Lc, para $Hlp=6,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga I	418
Figura 4.113. Estudio 7.5: Variación de Lc, para $Hlp=8,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga D	419
Figura 4.114. Estudio 7.5: Variación de Lc, para $Hlp=8,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga I	419
Figura 4.115. Estudio 7.6: Variación de Lc, para $Hlp=10,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga D	420
Figura 4.116. Estudio 7.6: Variación de Lc, para $Hlp=10,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga I	420
Figura 4.117. Estudio 7.7: Variación de Lc, para $Hlp=12,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga D	421
Figura 4.118. Estudio 7.7: Variación de Lc, para $Hlp=12,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga I	421
Figura 4.119. Estudio 7.8: Variación de Lc, para $Hlp=14,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga D	422
Figura 4.120. Estudio 7.8: Variación de Lc, para $Hlp=14,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga I	422
Figura 4.121. Estudio 7.10: Variación de Lc, para $Hlp=16,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga D	423
Figura 4.122. Estudio 7.10: Variación de Lc, para $Hlp=16,00$ y ie_c fija en 3,00 m. Viga I	423
Figura 4.123. Estudio 7. Análisis de mínimo. Para $Hlp=10,00$, $ie_c=3,00$ m y $L_c=12,00$ m. Viga delta (curva roja) y viga I (curva azul)	426
Figura 4.124. Estudio 7. Ampliación de la zona del mínimo de la función Acota (L_v). Para $Hlp=10,00$, $ie_c=3,00$ m y $L_c=12,00$ m. Viga I	427
Figura 4.125. Estudio 7. Ampliación de la zona del mínimo de la función Acota (L_v) Análisis de mínimo. Para $Hlp=10,00$, $ie_c=3,00$ m y $L_c=12,00$ m. Viga I	427
Figura 4.126. Caso 118 (D): $Qlc3$ y $QlvD3$. Viga entre 20 y 30 m. $ac=0,0109$; $bc=0,095$; $avD=0,1023$; $bVD=0,0358$; $ap=0,1294$; $bp=0,0847$	431
Figura 4.127. Caso 115 (D): $Qlc1$ y $QlvD2$. Viga entre 20 y 30 m. $ac=0,0096$; $bc=0,0811$; $avD=0,1079$; $bVD=0,0337$; $ap=0,1294$; $bp=0,0847$	432
Figura 4.128. Caso 122 (D): $Qlc3$ y $QlvD3$. Viga entre 20 y 30 m. $ac=0,0109$; $bc=0,095$; $avD=0,1023$; $bVD=0,0358$; $ap=0,1294$; $bp=0,0847$	432
Figura 4.129. Caso 52 (I): $Qlc3$ y $QlvI2$. Viga entre 20 y 30 m. $ac=0,0109$; $bc=0,095$; $avI=0,1083$; $bVI=0,0847$; $ap=0,1294$; $bp=0,0847$	433
Figura 4.130. Caso 117 (I): $Qlc3$ y $QlvI3$. Viga entre 20 y 30 m. $ac=0,0109$; $bc=0,095$; $avI=0,1294$; $bVI=0,0419$; $ap=0,1294$; $bp=0,0847$	433
Figura 4.131. Caso 91 (I): $Qlc2$ y $QlvI2$. Viga entre 20 y 30 m. $ac=0,0073$; $bc=0,1236$; $avI=0,1083$; $bVI=0,0376$; $ap=0,1296$; $bp=0,0847$	434

Capítulo 5. Paneles prefabricados de hormigón en fachadas

Figura 5.1. Esquema de paneles de fachada autoportantes y no autoportantes. Reproducida de FIP-ATEP, 1996	441
Figura 5.2. Sección de panel sándwich o panel con aislamiento y panel bicapa, de aislamiento continuo o sin puente térmico. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996	443

Figura 5.3. Propiedades acústicas de paneles macizos. Reproducida de Manual ANfhARQ, (2007)	446
Figura 5.4. Configuración de un panel de fachada aligerado o sánwich. Figura por cortesía de Prefabricados Castelo	449
Figura 5.5. Esquema del edificio 1	465
Figura 5.6. Esquema del edificio 2	466
Figura 5.7. Simulación del comportamiento térmico con el programa HULC	468
Figura 5.8. Estimación de los puentes térmicos en los cerramientos de fachada con el programa Therm	469

Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados en estructuras completas

Figura 6.1. Croquis de esquema de cuadrículas básicas (Cu), para vigas delta y vigas I	477
Figura 6.2. Croquis de esquema de edificio completo	478
Figura 6.3. Croquis de la influencia de la disposición de cubierta	487
Figura 6.4. Incrementos de panel en función de A/L. El incremento 0,0% es A/L=1	497
Figura 6.5. Relación estimada entre superficie total y ratio de fachadas en edificios cuadrados de altura libre 10,00 m	498
Figura 6.6. Relación estimada entre superficie total y ratio de fachadas en edificios cuadrados de altura libre 12,00 m	498
Figura 6.7. Gráficas de relaciones estimadas entre superficie total y coeficiente de forma de paneles en edificios cuadrados. Para cuadrículas básicas 20x10, 25x10 y 30x10 m	500
Figura 6.8. Gráficas de relaciones estimadas entre superficie total y coeficiente de forma de paneles en edificios cuadrados. Para cuadrículas básicas 20x12, 25x12,5 y 30x12 m	501
Figura 6.9. Primera aproximación al esquema de cuadrícula básica con la media de la base de datos	503
Figura 6.10. Esquemas de cinco edificios teóricos en estudio	504
Figura 6.11. Esquemas de tres nuevos modelos de edificios teóricos (F-G-H) en estudio	511
Figura 6.12. Gráfico de referencias de precios de transporte normal. Estimación	546
Figura 6.13. Portada de la Nota de Servicio 2/2016. Transportes especiales. Reproducida: Ministerio de Fomento (2016)	548
Figura 6.14. Detalle y características básicas de grúa móvil de 100 t. Reproducida de www.liebherr.com . (https://www.liebherr.com/es/esp/productos)	550

Anexo III. Cálculo de transmitancias térmicas de paneles optimizados (OPT)

Figura A.III.1. Transmisión de calor considerando los puentes térmicos	734
Figura A.III.2. Descripción del método de cálculo para la transmitancia térmica lineal	734
Figura A.III.3. Cálculo de la transmitancia térmica media en el panel 20 OPT-NR	735
Figura A.III.4. Cálculo de la transmitancia térmica media en el panel 20 OPT-AM	736
Figura A.III.5. Cálculo de la transmitancia térmica media en el panel 20 OPT-NR-AM	737
Figura A.III.6. Cálculo de la transmitancia térmica media en el panel 24 OPT-NR	738
Figura A.III.7. Cálculo de la transmitancia térmica media en el panel 24 OPT-AM	739

Figura A.III.8. Cálculo de la transmitancia térmica media en el panel 24 OPT-NR-AM	740
Figura A.III.9. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 20-OPT-NR para el puente térmico extremo	741
Figura A.III.10. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 20-OPT-NR para el puente térmico central	741
Figura A.III.11. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 20-OPT-AM para el puente térmico extremo	742
Figura A.III.12. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 20-OPT-AM para el puente térmico central	742
Figura A.III.13. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 24-OPT-NR para el puente térmico extremo	743
Figura A.III.14. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 24-OPT-NR para el puente térmico central	743
Figura A.III.15. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 24-OPT-AM para el puente térmico extremo	744
Figura A.III.16. Cálculo con Therm de flujos de calor en panel 24-OPT-AM para el puente térmico central	744

Índice de tablas

Capítulo 2. Estado actual del conocimiento

Tabla 2.1. Evolución de la prefabricación en edificación en España según Burón, M. et al (1997)	33
Tabla 2.2. Resumen de realizaciones de Carlos Fernández Casado en la década de 1940-1950	40
Tabla 2.3. Resumen de realizaciones de Carlos Fernández Casado en la década de 1950-1960	44
Tabla 2.4. Resumen de realizaciones de Carlos Fernández Casado en la década de 1960-1970	56
Tabla 2.5. Tabla resumen de realizaciones Hormigón pretensado: realizaciones españolas 1953-2016	120
Tabla 2.6. Tendencias de prefabricación en obra y en taller entre 1953 y 2016	121
Tabla 2.7. Vigas pretensadas en taller y en obra	121
Tabla 2.8. Análisis cualitativo. Comparativa de realizaciones en España en diferentes épocas	123
Tabla 2.9: Análisis cuantitativo. Comparativa de realizaciones en España en diferentes épocas	124
Tabla 2.10. Comparativa de valores de longitudes de los elementos estructurales que componen las cubiertas ligeras, Datos de IECA-ANDECE (1996), FIP-ATEP (1996) y Boletín 74 de la FIB (2014)	147
Tabla 2.11. Tabla resumen de diferentes elementos estructurales para estructuras de cubiertas y longitudes máximas, mínimas y óptimas propuestas	205

Capítulo 3. Plan de investigación: Análisis de tipologías, variables de diseño y geométricas. Fichas de estructuras y base de datos

Tabla 3.1. Tipologías principales objeto de investigación en edificios industriales de planta única y vigas de gran luz con prefabricados de hormigón	215
Tabla 3.2. Tabla de elementos estructurales que conforman una cubierta ligera	219
Tabla 3.3. Proyectos constructivos analizados	233
Tabla 3.4. Proyectos por subtipología o modelo de cubiertas ligeras	234
Tabla 3.5. Casos particulares de cubiertas ligeras por nudos rígidos o vigas Y	234
Tabla 3.6. Valores orientativos de espesor en paneles prefabricados de hormigón en fachadas, en función de su longitud	256
Tabla 3.7. Valores de L_v , L_c y H_{lp} del boletín 74 de la FIB de 2014. Reproducida de FIB, 2014	261
Tabla 3.8. Modelo y tipología estructural	263
Tabla 3.9. Materiales	264
Tabla 3.10. Acciones, coeficientes de seguridad, ambiente y vida útil	266
Tabla 3.11. Hipótesis de forma en planta y sección del edificio	267
Tabla 3.12. Esquema tipo de ficha de proyecto	270
Tabla 3.13. Homogeneización de los tipos de hormigones	272

Tabla 3.14. Hipótesis de costes de fabricación de hormigón armado o pretensado con cuantía de armado 1	273
Tabla 3.15. Hipótesis de costes de acero pasivo y activo	274
Tabla 3.16. Coeficientes K de homogeneización de armado en pilares	276
Tabla 3.17. Coeficientes K de homogeneización de armado en vigas I	277
Tabla 3.18. Coeficientes K de homogeneización de armado en vigas D	277
Tabla 3.19. Coeficientes K de homogeneización de armado en correas	278
Tabla 3.20. Tabla resumen. Coeficientes K de homogeneización de tipo de hormigón y armado en pilares, vigas I, vigas Deltas y correas	279
Tabla 3.21. Base de datos iniciales y base de datos de la nave completa teórica. Estructuras 1 a 40	281
Tabla 3.22. Base de datos iniciales y base de datos de la nave completa teórica. Estructuras 41 a 80	282
Tabla 3.23. Base de datos iniciales y base de datos de la nave completa teórica. Estructuras 81 a 122	283
Tabla 3.24. Base de datos de correas. Estructuras 1 a 40	284
Tabla 3.25. Base de datos de correas. Estructuras 41 a 80	285
Tabla 3.26. Base de datos de correas. Estructuras 81 a 122	286
Tabla 3.27. Base de datos de vigas principales. Estructuras 1 a 40	287
Tabla 3.28. Base de datos de vigas principales. Estructuras 41 a 80	288
Tabla 3.29. Base de datos de vigas principales. Estructuras 81 a 122	289
Tabla 3.30. Base de datos de pilares. Estructuras 1 a 40	290
Tabla 3.31. Base de datos de pilares. Estructuras 41 a 80	291
Tabla 3.32. Base de datos de pilares. Estructuras 81 a 122	292

Capítulo 4. Análisis estadístico y optimización. Discusión de resultados en cuadrículas

Tabla 4.1. Análisis cualitativo. Comparativa de realizaciones en España en diferentes épocas, incluyendo los datos del estudio de investigación de la tesis	294
Tabla 4.2. Análisis cuantitativo. Comparativa de realizaciones en España en diferentes épocas, incluyendo la base de datos de la tesis	295
Tabla 4.3. Tipología de cubiertas ligeras	297
Tabla 4.4. Clasificación de proyectos por tipo de correas	297
Tabla 4.5. Clasificación de proyectos por tipo de vigas	298
Tabla 4.6. Clasificación de proyectos en función de la longitud de vigas	298
Tabla 4.7. Valores de correas	301
Tabla 4.8. Valores de viga Delta	302
Tabla 4.9. Valores de las vigas I	302
Tabla 4.10. Valores de pilares	303
Tabla 4.11. Superficies de retículas construidas	303
Tabla 4.12. Tabla de valores Qc	306

Tabla 4.13. Tabla de frecuencias de Qc.....	306
Tabla 4.14. Tabla de valores de Lc.....	307
Tabla 4.15. Tabla de frecuencias de Lc.....	307
Tabla 4.16. Tabla de valores de iec.....	308
Tabla 4.17. Tabla de frecuencias de iec.....	308
Tabla 4.18. Tabla de valores de Cc.....	309
Tabla 4.19. Tabla de frecuencias de Cc.....	309
Tabla 4.20. Tabla de valores de PtevD.....	310
Tabla 4.21. Tabla de frecuencias de PtevD.....	310
Tabla 4.22. Tabla de valores de LvD.....	311
Tabla 4.23. Tabla de frecuencias de LvD.....	311
Tabla 4.24. Tabla de valores de CvD.....	312
Tabla 4.25. Tabla de frecuencias de CvD.....	312
Tabla 4.26. Tabla de valores de Ptevl.....	313
Tabla 4.27. Tabla de frecuencias de Ptevl.....	313
Tabla 4.28. Tabla de valores y tabla y gráfico de frecuencias de Lvl.....	314
Tabla 4.29. Tabla de valores y tabla y gráfico de frecuencias de Lvl.....	314
Tabla 4.30. Tabla de valores de Cvl.....	315
Tabla 4.31. Tabla de frecuencias de Cvl.....	315
Tabla 4.32. Tabla de valores de Qv.....	316
Tabla 4.33. Tabla de frecuencias de Qv.....	316
Tabla 4.34. Tabla de valores de Hlp.....	317
Tabla 4.35. Tabla de frecuencias de Hlp.....	317
Tabla 4.36. Tabla de valores de Lp.....	318
Tabla 4.37. Tabla de frecuencias de Lp.....	318
Tabla 4.38. Tabla de valores de Dmaxp.....	319
Tabla 4.39. Tabla de frecuencias de Dmaxp.....	319
Tabla 4.40. Tabla de valores de Dminp.....	320
Tabla 4.41. Tabla de frecuencias de Dminp.....	320
Tabla 4.42. Tabla de valores de Scu.....	321
Tabla 4.43. Tabla de frecuencias de Scu.....	321
Tabla 4.44. Tabla de valores de Vcu.....	322
Tabla 4.45. Tabla de frecuencias de Vcu.....	322
Tabla 4.46. Tabla de valores de St.....	323
Tabla 4.47. Tabla de frecuencias de St.....	323
Tabla 4.48. Tabla de valores de Vt.....	324
Tabla 4.49. Tabla de frecuencias de Vt.....	324

Tabla 4.50. Tabla de relación Luz/Canto en correas tubulares	325
Tabla 4.51. Tabla de relación Luz/Canto en vigas delta	325
Tabla 4.52. Tabla de relación Luz/Canto en vigas I	325
Tabla 4.53. Tabla de predimensionado de correas tubulares, en función de la luz de correa (Lc), intereje de correas (iec) y carga sobre correas (Qc). El tipo de correa viene definido por su canto en cm	327
Tabla 4.54. Tabla de predimensionado de vigas delta e I, en función de la luz de viga (Lv) y carga lineal sobre viga (Qlv). El tipo de viga viene definido por su canto constante en las I, y su canto máximo en las vigas delta en cm	328
Tabla 4.55. Tabla 1 de unificación de pilares por alturas.....	330
Tabla 4.56. Tabla 2 de unificación de pilares por alturas.....	331
Tabla 4.57. Tabla 3 de unificación de pilares por alturas. Frecuencias acumuladas y relativas de alturas libres unificadas.....	331
Tabla 4.58. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 6,00 m	332
Tabla 4.59. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 8,00 m	332
Tabla 4.60. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 10,00 m	333
Tabla 4.61. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 12,00 m	334
Tabla 4.62. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 14,00 m	334
Tabla 4.63. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 16,00 m	335
Tabla 4.64. Vigas Deltas. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 6,00 m	335
Tabla 4.65 Vigas Deltas. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 8,00 m	335
Tabla 4.66. Vigas Deltas. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 10,00 m	336
Tabla 4.67. Vigas Deltas. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 12,00 m	336
Tabla 4.68. Vigas Deltas. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 14,00 m	337
Tabla 4.69. Vigas Deltas. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 16,00 m	337
Tabla 4.70. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 6,00 m	337
Tabla 4.71. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 8,00 m	338
Tabla 4.72. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 10,00 m	338
Tabla 4.73. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 12,00 m	338

Tabla 4.74. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 14,00 m.....	339
Tabla 4.75. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por cuadrícula de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 16,00 m.....	339
Tabla 4.76. Tabla de soluciones más optimizadas por alturas libres unificadas de estructura. 1 de 2.....	340
Tabla 4.77. Tabla de soluciones más optimizadas por alturas libres unificadas de estructura. 2 de 2.....	341
Tabla 4.78. Incremento de consumos medios óptimos con la altura libre	342
Tabla 4.79. Estructuras de vigas deltas. Medias de los casos más optimizados para la Hlu de 10,00 m.....	343
Tabla 4.80. Estructuras de jácenas I. Medias de los casos más optimizados para la Hlu de 10,00 m.....	344
Tabla 4.81. Comparativa de gasto para el uso de vigas deltas y jácenas I, para la misma Hlu, Lc e iec	344
Tabla 4.82. Comparativa de gasto para diferentes Lc, para la misma tipología de vigas, Lv, Hlu e iec	345
Tabla 4.83. Valores en cubiertas ligeras Boletín 74 de la FIB (2014)	346
Tabla 4.84. Rango de longitudes óptimas de las tablas 4.76 y 4.77	346
Tabla 4.85. Diferencia de óptimos de longitudes de la base de datos respecto a las guías de diseño	347
Tabla 4.86. Escalones de carga en correas, en función de Qlc (kN/m)	349
Tabla 4.87. Escalones de carga en vigas en función de la Qlv (kN/m)	352
Tabla 4.88. Escalones de carga en vigas deltas, en función de QlvD (kN/m)	354
Tabla 4.89. Escalones de carga en vigas I en función de QlvI (kN/m)	357
Tabla 4.90. Discriminación de pilares por longitud de viga.....	361
Tabla 4.91. Tabla resumen de relación en correas entre Lc y SHhc.....	366
Tabla 4.92. Tabla resumen de relación en vigas Lv y SHhv.....	367
Tabla 4.93. Tabla resumen de relación en vigas delta LvD y SHhvD.....	368
Tabla 4.94. Tabla resumen de relación en jácenas I, Lvl y SHhvl.....	369
Tabla 4.95. Tabla resumen de relación en pilares, Lp / Hlp y SHhp.....	370
Tabla 4.96. Tabla resumen de relación en pilares, Hlp y Lp.....	374
Tabla 4.97. Parámetros considerados en la optimización con GeoGebra	381
Tabla 4.98. Variables consideradas en la optimización con GeoGebra	381
Tabla 4.99. Tabla de longitud de viga óptima (m) para el gasto mínimo (m ³ Hh/m ² construido, obtenida con el mínimo de la función acota en GeoGebra. Ecuaciones exponenciales generales: Correas: ac = 0,0075 y bc = 0,1164; Vigas Deltas: av = 0,1045 y bv = 0,0339, Vigas I: av = 0,1013 y bv = 0,041; Pilares (Hlp): ap = 0,1287 y bp = 0,0861)	425
Tabla 4.100. Comparativa entre los seis casos (tres viga delta y tres viga I) más optimizados de la base de datos, para altura libre de 10,00 m, y la propuesta de longitud de viga con GeoGebra para obtener el gasto mínimo	434
Tabla 4.101. Tabla de rangos de longitudes óptimas de vigas propuestas por alturas libres	436

Capítulo 5. Paneles prefabricados de hormigón en fachadas

Tabla 5.1. Resistencia mínima a fuego de fachadas acometidas por medianeras colindantes..	445
Tabla 5.2. Tabla orientativa de valores de la conductividad térmica de materiales aislantes	451
Tabla 5.3. Tabla estimativa de propiedades y valores medios de paneles de fachada incluyendo las propuestas de paneles optimizados (OPT)	456
Tabla 5.4. Datos económicos estimados de paneles prefabricados	459
Tabla 5.5. Propiedades de paneles de fachada prefabricados	466
Tabla 5.6. Resultados de simulaciones en edificios 1 y 2	470

Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados en estructuras completas

Tabla 6.1. Ejemplos de influencia de la variación de tamaño de edificios en el gasto de fachadas. Hpa estimada en 13,00 m	494
Tabla 6.2. Ejemplos de influencia de la variación de tamaño de edificios en el gasto de fachadas, en edificios cuadrados homotéticos. Hpa estimada en 13,00 m	496
Tabla 6.3. Tabla de análisis y resultados de estudio en 5 edificios. Número de elementos, coeficientes de forma y ratio de fachadas	506
Tabla 6.4. Tabla de análisis y resultados de estudio en 3 nuevos edificios teóricos. Número de elementos, coeficientes de forma y ratio de fachadas	512
Tabla 6.5. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa empleando los coeficientes de forma. Ejemplo de la estructura N°118	515
Tabla 6.6. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 6,00 m	517
Tabla 6.7. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 8,00 m	517
Tabla 6.8. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 10,00 m	518
Tabla 6.9. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 12,00 m	519
Tabla 6.10. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 14,00 m	519
Tabla 6.11. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 16,00 m	519
Tabla 6.12. Vigas Delta. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 6,00 m	520
Tabla 6.13. Vigas Delta. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 8,00 m	520
Tabla 6.14. Vigas Delta. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 10,00 m	520
Tabla 6.15. Vigas Delta. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 12,00 m	521
Tabla 6.16. Vigas Delta. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 14,00 m	521
Tabla 6.17. Vigas Delta. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 16,00 m	521

Tabla 6.18. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 6,00 m	521
Tabla 6.19. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 8,00 m	522
Tabla 6.20. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 10,00 m	522
Tabla 6.21. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 12,00 m	522
Tabla 6.22. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 14,00 m	523
Tabla 6.23. Vigas I. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas y pilares, para una altura libre unificada de 16,00 m	523
Tabla 6.24. Tabla de resultados de los promedios de gasto en cuadrículas y estructuras completas, por rangos de altura	524
Tabla 6.25. Incremento del gasto con la altura libre: 10,00 a 12,00 m	525
Tabla 6.26. Tabla de soluciones más optimizadas por alturas libres unificadas de estructura ...	526
Tabla 6.27. Incremento de consumos medios óptimos con la altura libre	528
Tabla 6.28. Estructuras de vigas deltas. Medias de los casos más optimizados para la Hlu de 10,00 m	529
Tabla 6.29. Estructuras de jácenas I. Medias de los casos más optimizados para la Hlu de 10,00 m	529
Tabla 6.30. Rango de longitudes óptimas de la tabla 6.26	530
Tabla 6.31. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 6,00 m	532
Tabla 6.32. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 8,00 m	532
Tabla 6.33. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 10,00 m	533
Tabla 6.34. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 12,00 m	534
Tabla 6.35. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 14,00 m	534
Tabla 6.36. Tabla de análisis de gasto mínimo por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 16,00 m	534
Tabla 6.37. Tabla de valores más optimizados por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 10,00 m	535
Tabla 6.38. Tabla de valores más optimizados por estructura completa de correas, vigas, pilares, incluyendo paneles de fachada, para una altura libre unificada de 12,00 m	536
Tabla 6.39. Tabla de estudios de tantos por ciento de gasto en estructura y panel. Altura libre 10,00 m. Cuadrícula básica 25,00x10,00. Hipótesis de gasto mínimo de estructura según base de datos de 0,0500 m ³ Hh/m ² St y para el panel de 0,0974 m ³ Hh/m ²	539
Tabla 6.40. Tabla de estudios de tantos por ciento de gasto en estructura y panel. Altura libre 12,00 m. Cuadrícula básica 25,00x10,00. Hipótesis de gasto mínimo de estructura según base de datos de 0,0500 m ³ Hh/m ² St y para el panel de 0,0974 m ³ Hh/m ²	540
Tabla 6.41. Clasificación de transporte en España. Fuente; Arroyo, J. et al. (2018). Jiménez Montoya. Esencial.....	543

Tabla 6.42. Tabla de referencias de precios de transporte normal. Estimación	545
Tabla 6.43. Tabla de referencias con valores medios de precios para transporte especial. Estimación.....	546
Tabla 6.44. Tabla estimativa de medios auxiliares y rendimientos de montaje	552
Tabla 6.45. Tabla de porcentajes estimados del peso de material, transporte y montaje	553

Anexo I. Base de datos de proyectos

Anexo I.A. Base de datos de Hormigón Pretensado: realizaciones españolas ATEP-ACHE

Tabla A.I.A.1. Base de datos Hormigón pretensado: realizaciones españolas. Edición de 1970.....	603
Tabla A.I.A.2. Base de datos Hormigón pretensado: realizaciones españolas. Ediciones de 1974, 1978, 1990, 1994, 1998, 2010 y 2017	604

Anexo I.B. Base de datos de obras 2006

Tabla A.I.B.1. Base de datos de obras de naves en España 2006 (1 de 3)	606
Tabla A.I.B.2. Base de datos de obras de naves en España 2006 (2 de 3)	607
Tabla A.I.B.3. Base de datos de obras de naves en España 2006 (3 de 3)	608

Notación

Mayúsculas romanas

A

A	Ancho total de la estructura en el sentido de los pórticos
Ac	Acero pasivo y activo
Acc	Cuantía de acero en correas
Acv	Cuantía de acero en vigas
AcvI	Cuantía de acero en vigas I
AcvD	Cuantía de acero en vigas D
Apa	Ancho de un panel de fachada

B

Ba	Bayoneta o espadín del pilar
----	------------------------------

C

C	Denominación de correa o viga secundaria
C - A1	Correas en armado 1
C - A2	Correas en armado 2
C - A3	Correas en armado 3
CAP	Cota de apoyo de pilar
CAPa	Cota de apoyo de panel
Cc	Canto de correa
Cch	Canto o espesor del cerramiento de cubierta
Cf	Coeficientes de forma
Cfc	Coeficientes de forma en correas
Cfp	Coeficientes de forma en pilares
Cfpt	Coeficientes de forma en pilares contemplando los testeros
Cfptx	Coeficientes de forma en pilares contemplando x testeros
Cfv	Coeficientes de forma en vigas
Cfvt	Coeficientes de forma de vigas contemplando los testeros
Cfvtx	Coeficientes de forma de vigas contemplando x testeros
CoAa	Coste acero activo
CoAp	Coste de acero pasivo
Cp	Escuadría o sección de pilar
CSPa	Cota superior de panel

CST	Cota de solera terminada
CSZ	Cota superior de zapata
Cu	Cuadrícula o retícula básica
Cv	Canto de viga
Cva	Canto de viga en el apoyo
CvD	Canto de viga delta
CvI	Canto de viga I

D

D	Denominación de vigas deltas o peraltadas
Dmaxp	Dimensión máxima de la sección del pilar
Dminp	Dimensión mínima de la sección del pilar

E

ELS	Estado límite de servicio
ELU	Estado límite último
Em	Empotramiento
Epa	Espesor de panel de fachada
Er	Posición de panel encarrilado entre pilares
EvPO	Vigas de edificación prefabricadas en obra
EvPT	Vigas de edificación prefabricadas en taller
Ext	Posición de panel por exterior de pilares

F

Fa	Frecuencia absoluta
Faa	Frecuencia acumulada absoluta
Far	Frecuencia acumulada relativa
Fr	Frecuencia relativa

G

H

H	Hormigón
Hc	Hormigón de correas de fabricación continua
Hc1	Hormigón de correas con armado 1
Hc2	Hormigón de correas con armado 2
Hc3	Hormigón de correas con armado 3
Hh	Variable de gasto. Hormigón homogeneizado por tipo de fabricación y cuantía de acero
Hhc	Variable de gasto. Hormigón homogeneizado en correas
Hhp	Variable de gasto. Hormigón homogeneizado en pilares
HhvD	Variable de gasto. Hormigón homogeneizado en vigas deltas
Hhvl	Variable de gasto. Hormigón homogeneizado en vigas I
HI	Altura libre de pilar

Hlp	Altura libre de pilar
Hlpu	Altura libre de pilar unificada
Hlu	Altura libre de pilar unificada
Hor	Posición de panel horizontal en fachada
Hp	Hormigón de pilares de fabricación en molde
Hpa	Altura de panel
HPa	Altura de panel
Hp1	Hormigón de pilares con armado 1
Hp2	Hormigón de pilares con armado 2
Hp3	Hormigón de pilares con armado 3
Hpa	Altura total de un vano de paneles de fachada prefabricados
Hv	Hormigón de vigas de fabricación en molde
Hv1	Hormigón de vigas con armado 1
Hv2	Hormigón de vigas con armado 2
Hv3	Hormigón de vigas con armado 3
I	
I	Tipología de vigas I o doble T
J	
K	
KHc KA1c	Coeficiente de homogeneización de hormigón de correas en armado 1
KHc KA2c	Coeficiente de homogeneización de hormigón de correas en armado 2
KHc KA3c	Coeficiente de homogeneización de hormigón de correas en armado 3
KHp KA1p	Coeficiente de homogeneización de hormigón de pilares en armado 1
KHp KA2p	Coeficiente de homogeneización de hormigón de pilares en armado 2
KHp KA3p	Coeficiente de homogeneización de hormigón de pilares en armado 3
KHvD KA1vD	Coeficiente de homogeneización de hormigón de vigas deltas en armado 1
KHvD KA2vD	Coeficiente de homogeneización de hormigón de vigas deltas en armado 2
KHvD KA3vD	Coeficiente de homogeneización de hormigón de vigas deltas en armado 3
KHvI KA1vI	Coeficiente de homogeneización de hormigón de vigas I en armado 1
KHvI KA2vI	Coeficiente de homogeneización de hormigón de vigas I en armado 2
KHvI KA3vI	Coeficiente de homogeneización de hormigón de vigas I en armado 3
L	
L	Longitud total del edificio en sentido perpendicular a los pórticos
Lc	Longitud de correas o vigas secundarias
Lp	Longitud total de pilar
Lpa	Longitud de panel de fachada prefabricado
Lv	Longitud de viga principal
LvD	Longitud de viga delta
LvI	Longitud de viga I

Lvt Longitud de viga de testero

M

N

Nc Número de correas por cuadrícula básica

Ncu Número de cuadrículas

Nnaves Número de naves. Igual al número de vigas por pórtico.

Np Número de pilares

Npo Número de pórticos

Nv Número de vigas por cuadrícula básica

Nvanos Número de vanos. Igual al número de vanos de correas.

Nvc Número de vanos de correas (m)

Nvp Número de vigas por pórtico (n)

Nvt Número de vigas de testero

Ñ

O

P

P - A1 Pilares en armado 1

P - A2 Pilares en armado 2

P - A3 Pilares en armado 2

Pa Panel prefabricado

Per Perímetro

Pospa Posición de paneles

PPc Peso propio de correas

PPp Peso propio de pilares

PPpa Peso propio de paneles

PPv Peso propio de vigas

Pte Pendiente de un faldón de cubierta

PtevD Pendiente de un faldón de cubierta con vigas deltas

Ptevl Pendiente de un faldón de cubierta con vigas l

PvPO Vigas de puentes prefabricadas en obra

PvPT Vigas de puentes prefabricadas en taller

Q

Qc Carga superficial sobre correas

Qch Carga superficial permanente de cerramiento o cubrición de cubierta

Qins Carga superficial de instalaciones

Qlc Carga lineal en correas

Qlv Carga lineal en vigas

QlvD Carga lineal en vigas deltas

Qlvi Carga lineal en vigas l

Qn	Carga superficial de nieve
Qppc	Carga de peso propio de correas
Qsis	Carga de sismo. Definida por su aceleración sísmica básica a_b/g
Quso	Carga superficial de uso o mantenimiento
Qv	Carga de viento en paramentos verticales
Qvc	Carga de viento en cubierta
R	
Res	Resguardo en el cerramiento de cubierta en el punto más desfavorable
Rpa	Ratio de fachada o paneles
Rper	Ratio de perímetro de fachada
S	
Sc	Sección o área transversal de correa
SCu	Superficie de cuadrícula básica (Cu)
Sepe	Separación o intereje de correas (también iec)
SHhc	Sección de hormigón homogeneizada de correa
SHhp	Sección de hormigón homogeneizada de pilar
SHhv	Sección de hormigón homogeneizada de viga
So	Espesor de la solera
Sp	Sección o área transversal de pilar
SpaCu	Superficie de panel en cuadrícula básica
SpaSt	Superficie de panel en edificio completo
St	Superficie o área total de la estructura
Sv	Sección o área transversal de viga
Svt	Sección de viga de testero
T	
TPo	Tipología de pórtico simple, doble o triple (1,2,3)
TV	Tipología de viga (D,I,Y)
U	
V	
V	Viga principal
Vcu	Volumen de estructura de cuadrícula construido
VD - A1	Vigas deltas el armado 1
VD - A2	Vigas deltas el armado 2
VD - A3	Vigas deltas el armado 3
Ver	Posición de panel vertical en fachada
VHhc	Volumen de hormigón homogeneizado de correas
VHcu	Volumen de hormigón homogeneizado en una cuadrícula o retícula básica
VHhp	Volumen de hormigón homogeneizado de pilares
VHhv	Volumen de hormigón homogeneizado de vigas

VI - A1	Vigas I el armado 1
VI - A2	Vigas I el armado 2
VI - A3	Vigas I el armado 3
VPO	Vigas prefabricadas en obra
VPT	Vigas prefabricadas en taller
Vt	Volumen total construido
W	
W	Número entero de partes en que se divide la viga principal para conformar el testero
X	
Y	
Z	

Minúsculas romanas

h	homogeneizado
iec	intereje o separación de correas (también Sepc)
m	número máximo de vanos de correas en estructura completa
máx	Valor máximo
mín	Valor mínimo
n	número máximo de vigas de pórtico en estructura completa
n1	incremento de correas por tipo de viga (D=2, l=1)
ópt	Valor óptimo

Unidades prácticas de uso habitual

En proyectos es normativo el uso del Sistema Internacional (S.I.), pero en la práctica del día a día y por qué no decirlo, en el uso práctico del orden de magnitud, resulta muy útil mantener referencias del Sistema Tradicional (MKS).

Nosotros en lo referente a unidades en este estudio, trabajaremos en el Sistema Internacional (S.I.) pero haremos algunas referencias o puntualizaciones en el Tradicional o MKS, que para ciertos aspectos resulten más intuitivos.

Capítulo 1

Introducción.

1.1 Justificación de la tesis doctoral.

Parafraseando al poeta, podemos afirmar que la prefabricación con hormigón es una solución cargada de futuro, especialmente en los edificios industriales, dadas las ventajas que presenta sobre otras técnicas constructivas tradicionales.

La experiencia en el proyecto y ejecución de estructuras de edificación industrial nos ha permitido ver que, en un alto porcentaje de casos, estas están ejecutadas con cubiertas ligeras formadas con elementos prefabricados, y también observar que apenas disponemos de bibliografía técnica actualizada en la que apoyarnos en la fase inicial de diseño y predimensionado.

La importancia de las soluciones industrializadas para la construcción de edificios industriales ha alcanzado en las últimas décadas gran importancia. Los avances en la ingeniería de materiales han llevado a la generalización de los hormigones de altas prestaciones, hace años solo presentes en edificios de gran altura y proyectos singulares. Las ventajas que representa el sistema tanto a nivel de calidad estética de fachadas, como de tiempos de ejecución, estabilidad al

fuego, aislamiento térmico y acústico, así como las soluciones estructurales en las estructuras de pórticos de pilares y vigas, que destacan por una forma de producción que garantiza una elevada calidad, rendimientos de ejecución que pueden llegar a triplicar los de las estructuras in situ, o las ventajas de las piezas de hormigón pretensado, han convertido la solución con estructuras prefabricadas de hormigón en la primera opción en el desarrollo de edificios industriales en España.

A pesar de lo expuesto en el diseño de las estructuras prefabricadas, se nos presenta como una realidad la poca información accesible que nos oriente a la hora de tomar las primeras decisiones sobre la tipología estructural a emplear.

Se suele contar con sobrada bibliografía específica y herramientas, como programas de cálculo, para el desarrollo de estructuras metálicas y estructuras de hormigón in situ. Sin embargo, a veces, parece que no ocurre lo mismo con los proyectos de estructuras de hormigón prefabricado, campo en el que es difícil encontrar criterios para el predimensionado.

Entendemos que puede haber algunos factores que han podido influir en dicha escasez de literatura específica:

El volumen de estructuras de edificación en general, resueltas en hormigón in situ y estructura metálica ha sido proporcionalmente mucho mayor.

Tradicionalmente, los conocimientos de cálculo en algunas de las Escuelas Técnicas han estado principalmente dedicados al hormigón in situ, al acero y a las estructuras mixtas.

El conocimiento del diseño de los elementos de hormigón prefabricado armados y pretensados y de cerramientos de fachada está menos extendidos a nivel general, y plantea algunos problemas a la hora de predimensionar: a nivel de producción (forma de producir, tipo de moldes, capacidad máxima de peso y

longitud de piezas a fabricar) y a nivel de construcción (transporte, montaje, uniones, etc.).

Pensamos que esta falta de soporte en las fases iniciales del proyecto, justifica un estudio sobre las tipologías estructurales presentes en los edificios industriales, así como su análisis y posibilidades de optimización.

1.2 Objetivos.

Los principales objetivos de esta tesis doctoral son: **conocer la evolución histórica publicada, seguidamente conformar una base de datos representativa de lo que se construye actualmente, para estudiar las variables que intervienen y analizar las soluciones óptimas encontradas, para por último proponer un esquema de diseño y predimensionado para los edificios industriales de cubierta ligera contruidos con estructuras prefabricadas de hormigón.** Se pretende también analizar la influencia de las fachadas de paneles prefabricados, sobre todo en lo relacionado con las propiedades térmicas, que son de gran actualidad en los nuevos códigos estructurales.

En este estudio queremos dar respuesta a las cuestiones primordiales que se nos plantean en la fase creativa, en la fase de papel en blanco; ¿Dónde pongo los pilares? Esta es sin duda una pregunta clave y la cuestión que, como podrá verse más adelante en este estudio, influye en un mayor número de parámetros.

Los condicionantes previos claros, tales como el uso del edificio, dimensiones de la parcela, forjados, sótanos, facilitan la toma de decisiones al condicionar ciertas variables.

Por el contrario, si disponemos de una parcela 500 m x 400 m (200.000 m²) y se quiere edificar un edificio industrial de aproximadamente 10.000 m² de planta

y se nos da total libertad, todos los parámetros están sin limitar: ¿Qué longitud de viga principal propongo?, ¿qué separación de pórticos o longitud de correa?, ¿qué cantos estimados tienen?, ¿qué dimensiones de edificio A x L utilizamos?, ¿qué cuadrícula $L_v \times L_c$ utilizo?

Las respuestas que buscaremos en este estudio siguen un doble camino; por un lado, se trata de ver dónde se posicionan los elementos prefabricados (replanteo de la estructura prefabricada), y como consecuencia de esta decisión, qué elementos prefabricados son precisos utilizar (tipología y secciones).

Como nos comenta Juan Carlos Arroyo, en el prologo y aclaraciones del libro de los Números Gordos en el proyecto de estructuras, *aquí hablaremos de orden de magnitud, de aproximación al fenómeno, no de un resultado exacto del mismo. No por ello despreciamos los detalles. Es más, creemos que son muy importantes para obtener una solución afinada del problema y por tanto más económica, que es uno de los objetivos de un buen técnico. Pero sin ese primer control de situación, los métodos sofisticados serían peligrosos.*

El concepto de optimización lo entendemos, en el sentido de hacer más con menos, construir más metros cuadrados de estructura con menos gasto de material, y por tanto menor coste.

Estamos ante el *tiempo para pensar*, como dijo David Mackay en el prólogo de “Un ingeniero Imagina” de Peter Rice, aspecto de reflexión que no debe olvidarse al acometer un proyecto de estructuras.

En este estudio se han analizado los parámetros más influyentes y determinantes en el proyecto de una estructura prefabricada para, con estos datos, poder **ofrecer propuestas de predimensionamiento dentro de órdenes de magnitudes ejecutables, desde el punto de vista de fabricación, transporte y montaje.**

Pensamos que en las fases iniciales del diseño y predimensionado es donde se da el mayor potencial de optimización, al ser las que marcan las dimensiones generales del edificio con su ubicación en planta y secciones. Normalmente lo que conocemos como dimensionado, será ya verificar mediante las herramientas de cálculo la opción elegida, para mediante un proceso iterativo verificar la solución.

Este proyecto nace con una ilusión doble: la inmediata, analizar los parámetros más influyentes en el proyecto de una estructura prefabricada de edificación industrial, para que nos pueda servir de guía y ayuda en la fase de predimensionado; y la derivada, ver las posibilidades de optimización en función de los parámetros analizados que sirva de punto de partida a estudios de optimización basados en el tratamiento de datos.

Son diferentes los autores, que señalan que las decisiones iniciales en un proyecto de construcción, tienen las mayores repercusiones sobre el diseño, viabilidad y coste, como señala por ejemplo Kuprenas, J. el al, 2016.

Figura 1.1. Gráfico Coste-Tiempo en un proyecto de construcción. Efecto de los costes y costes acumulados. Reproducción de Kuprenas, J. el al. (2016).

Como bien se nos señala, en el libro Aforismos Estructurales, en su séptimo aforismo, Rui-Wamba, J.,1998; *“No se debe calcular una estructura que no se sepa dibujar. No se deben utilizar fórmulas cuyo significado físico se desconoce. No se debe dimensionar con ordenador una estructura que no se sepa calcular*

manualmente". Y nos señala que, en las etapas previas, en la gestación de un proyecto, hay que intentar no caer en la enfermedad de la 'calculitis', en el convencimiento de que *cuanto más se calcula, menos se piensa*, y nos propone para ello, un antídoto, que mostramos en la siguiente figura.

Figura 1.2. Etapas previas. Proceso de gestación de una estructura. Fuentes: Rui-Wamba, J (1998) y Rice, P. (2009).

Humildemente, es en estos ejemplos, donde nos queremos basar para plantear la idea del trabajo en las primeras etapas de nacimiento del proyecto, desde *el tiempo para pensar*, a efectos de elegir el material, servir de ayuda en la concepción de la estructura y de soporte al primer planteamiento geométrico.

En la figura siguiente mostramos el poster presentado en el "Simposio: tu Tesis en 4 Minutos", convocado por la UPM, en el marco de la investigación de esta tesis doctoral.

Figura 1.3. Etapas previas. Camino del folio en blanco a la propuesta optimizada.

Respecto a los paneles de fachada, tenemos que analizar la importancia de las fachadas respecto a la superficie o volumen total construido en la edificación completa por un lado, y por otro la influencia de la separación de pórticos o longitud de correa, en la elección de la tipología de panel. Será fundamental analizar aquí el ratio, superficie de panel de fachada por metros cuadrados de superficie construida.

También se analizan las posibilidades de mejora, en función de los diferentes aislamientos y configuraciones posibles, consiguiendo unos paneles de características optimizadas a nivel de coeficiente de transmitancia térmica, procurando mantener un control de costes en dicha optimización.

A diferencia de los elementos estructurales, donde las exigencias del proceso de fabricación son las más limitantes, en los cerramientos con paneles prefabricados el diseño está determinado por demandas arquitectónicas y por la física del edificio; entre dichas demandas se incluyen necesidades de modulación, aspecto, mantenimiento y limpieza, así como requisitos de comportamiento frente a fuego y propiedades térmicas y acústicas. El análisis de los espesores clásicos de los paneles fabricados en molde y en diferentes composiciones (macizos o con aislamiento integrado), en lo referente a las propiedades acústicas y su transmitancia térmica, no es considerada tradicionalmente en el diseño de los cerramientos de fachada, puesto que un importante número de edificios industriales no se consideran espacios acondicionados; sin embargo, dichas propiedades son cada vez más demandadas en el sector, pudiendo un mismo edificio albergar distintos usos (oficinas junto con almacenes o talleres).

La optimización en el caso de paneles trata de conjugar adecuadamente el comportamiento frente al fuego y las propiedades termoacústicas. Para ello, se parte de los paneles encontrados en el desarrollo de la base de datos, que pretenden ser un reflejo de las condiciones actuales de la construcción de edificios industriales con paneles prefabricados y donde propondremos soluciones optimizadas a nivel termoacústico, para diferentes tipologías del panel, materiales y espesores del núcleo aislante.

1.3 Esquema general de la tesis.

La tesis se ha estructurado en 7 capítulos principales y 3 anexos.

En el presente Capítulo 1 se han presentado la motivación, objetivos y el esquema general de este trabajo. El contenido de los capítulos restantes se describe sucintamente a continuación:

Capítulo 2. *Estado actual del conocimiento*. Se presenta un trabajo sobre la historia de la prefabricación de edificios industriales en España, realizando una comparativa de lo publicado y analizando su evolución en el tiempo. Se analizan las publicaciones precedentes relacionadas con las tipologías de estructuras prefabricadas de cubierta ligera y la optimización de estructuras, tanto en normativa y guías de diseño, como en investigaciones.

Capítulo 3. *Plan de investigación: Análisis de tipologías, variables de diseño y geométricas. Fichas de estructuras y base de datos*. En este capítulo se define el plan de trabajo y la clasificación de las tipologías de estructuras a estudiar, haciendo un análisis pormenorizado de cada una. Se analizan las variables de diseño generales de un edificio y los parámetros y variables de estudio de cada tipología estructural, conformando un esquema de cada tipología. En esta fase se describen los proyectos constructivos de 122 edificios de estructura prefabricada, para la construcción de edificios industriales, a partir de sus planos y memorias. Se ha desarrollado una ficha por cada proyecto incluyendo el esquema estructural, así como las principales variables de geometría. Con el apoyo de estas fichas, recogidas en el Anexo II, y con las variables del análisis, se conforma la base de datos. También en este apartado se define la variable de gasto-optimización a tener en cuenta en el estudio, que denominaremos metros cúbicos de hormigón homogeneizado.

Capítulo 4. *Análisis estadístico y optimización. Discusión de resultados en cuadrículas*. Se presenta la segunda fase experimental después de haber obtenido la base de datos de los proyectos de estructuras. En ella se realiza una

explotación descriptiva-cuantitativa y se incluyen tablas de medidas de posición y frecuencias de los parámetros. Se analiza el gasto mínimo por cuadrícula para las diferentes tipologías de vigas en un primer acercamiento a la optimización; también se realiza un análisis de las relaciones entre las longitudes y las secciones de hormigón homogeneizadas de los distintos elementos estructurales mediante líneas de tendencia. Se desarrolla la ecuación general de optimización en cuadrículas, programada en el programa informático GeoGebra, con idea de obtener las dimensiones de elementos que nos den los consumos mínimos en la variable de gasto, y en las tendencias de la ecuación de gasto.

Capítulo 5. *Paneles prefabricados de hormigón en fachadas.* Vamos a presentar los paneles en un capítulo independiente, para hacer un estudio general de los mismos y en particular su comportamiento en lo correspondiente a las propiedades termo-acústicas, tanto a nivel local de panel aislado, como a nivel global en una estructura completa.

Capítulo 6. *Análisis y discusión de resultados en estructuras completas.* A partir de los resultados obtenidos en el análisis de proyectos y base de datos, vamos a analizar mediante coeficientes de forma, el paso de resultados de cuadrículas básicas a las estructuras completas de cada proyecto analizado. En este análisis tendremos en cuenta el gasto en estructura de la tipología pórticos-cubierta ligera y el gasto en la tipología de fachadas, poniendo especial énfasis en la búsqueda de la superficie mínima de fachada y en el ratio de fachada por metros cuadrados contruidos. Aunque no es el objeto principal de la tesis, también en este capítulo, haremos una breve reseña al transporte y montaje de elementos prefabricados.

Capítulo 7. *Conclusiones y futuras líneas de investigación.* Se ofrecen las conclusiones extraídas del estado del arte en cuanto a la evolución producida, vista desde lo publicado, y las conclusiones de la base de datos en cuanto a rangos de estructuras óptimas encontradas. También el análisis del modelo de optimización de cuadrícula básica estructural en GeoGebra y por ultimo una propuesta para el diseño y predimensionado de edificios industriales de una sola

planta y grandes luces, a partir de los análisis de la investigación. Conclusiones de tipologías más optimizadas en estructuras de pórticos y conclusiones de propuestas de paneles optimizados desde el punto de vista de la transmitancia térmica. Se plantean cuestiones que pueden ser de interés para futuras líneas de investigación; el estudio de edificios de varias plantas, el análisis de estructuras bajo acciones sísmicas, estudios pormenorizados en pilares, análisis de las conexiones de correas, uso de diferentes resistencias características en elementos estructurales.

- Anexo I. *Bases de datos del estado del arte. Anexo IA. Base de datos de Hormigón Pretensado: realizaciones españolas ATEP-ACHE.* Se muestra el estudio realizado sobre las realizaciones mostradas en las 8 ediciones publicadas en los años 1970, 1974, 1978, 1990, 1994, 1998, 2010 y 2017. Este estudio se analiza en el Capítulo 2. *Anexo IB. Base de datos de obras 2006.* Para ver una aproximación a la evolución producida en estos últimos 10 años.
- Anexo II. *Fichas técnicas de estructuras de la base de datos.* Incluimos una ficha para cada obra estudiada para realizar la base de datos, incluyendo los principales datos a nivel de cargas, parámetros y variables geométricas, tanto a nivel de cuadrícula básica como de estructura completa. Este trabajo se ha elaborado para sacar la base de datos que es la piedra angular de la tesis y que se muestra en el Capítulo 3 y se analiza en el Capítulo 4. Este compendio nos servirá de guía en el predimensionado.
- Anexo III. *Cálculo de transmitancias térmicas de paneles optimizados (OPT).* Incluimos aquí las consideraciones reseñadas en el DA DB-HE / 3 Puentes térmicos, del Código Técnico de la Edificación, en lo referente a la formulación de la transmisión de calor considerando los puentes térmicos y la descripción de la transmitancia térmica lineal, utilizadas en el Capítulo 5. También presentamos la programación en una hoja de cálculo, del desarrollo realizado para el cálculo de la transmitancia

térmica media de la envolvente, considerando los puentes térmicos y se adjuntan los gráficos y valores de flujos de calor calculados con Therm para el cálculo de la transmitancia lineal de los puentes térmicos.

Capítulo 2

Estado actual del conocimiento.

2.1 Introducción.

Nos describe el filósofo y teólogo Raimon Panikkar, que al *conocimiento* podemos llegar mediante la experiencia, la observación y el experimento. La experiencia significa que algo actúe directamente en mí y me atraviese, absorberlo dentro de mí, es decir, identificarme con lo que conozco. La observación presupone cierta separación entre el que conoce y el conocido. Puede describirse por un lado como una 'actividad pasiva' que exige atención y contemplación y por otro, como un dejarse influenciar, estar abierto al exterior. La ciencia moderna prefiere un tercer modo de conocimiento: el experimento. Distinguir entre experiencia, observación y experimento no implica su separación. A menudo están interconectados, manifestando incluso cierta ordenación jerárquica: el experimento necesita, al fin y al cabo, de una observación, y ésta ha de desembocar en determinada experiencia, si realmente queremos conocer. Panikkar, R. (1998).

Analizar el actual estado del conocimiento, requerirá que aunemos nuestra experiencia, lo que absorbimos y conocemos sobre las estructuras prefabricadas

de hormigón, nuestra capacidad de observación, de búsqueda, de abrirnos al exterior, con el experimento de lo observado, mediante diferentes análisis.

La construcción de edificios industriales con estructuras prefabricadas de hormigón, ha tenido un enorme desarrollo desde las primeras décadas del siglo XX hasta la actualidad, debido a los avances en los materiales, en las técnicas de fabricación, y al desarrollo y automatización de las plantas de producción de elementos prefabricados. La industria del prefabricado ha sido pionera en la innovación dentro de la construcción, tanto en el desarrollo de la investigación en hormigón y acero como en el empleo de moldes y, muy especialmente, con la generalización de la técnica del pretensado, que cuenta con su primera patente en 1928 por Eugene Freyssinet y que llega a España en el año 1942 de la mano de Francisco Fernández Conde.

Las estructuras prefabricadas de hormigón son cada vez más empleadas en ingeniería civil y edificación. Sus aplicaciones en construcción de edificios prefabricados van desde el uso en construcciones residenciales de viviendas unifamiliares con paneles portantes y forjados alveolares, edificios de aparcamientos, construcción de edificios de uso público (oficinas, escolares, sanitarios), edificios industriales de grandes luces y planta única para centros logísticos, comerciales, naves de usos varios, pabellones polideportivos, talleres y hangares, y en los últimos tiempos, construcción de viviendas económicas en países en desarrollo.

En el ámbito industrial se han generalizado en casi la totalidad de edificios promovidos por promotores e inmobiliarias especializadas, por la fiabilidad de la construcción y la solvencia en el cumplimiento de requerimientos de durabilidad, resistencia al fuego, y acabados, y por desarrollar unas calidades más cercanas al residencial que al industrial clásico, y ofrecer unas ventajas competitivas respecto a las estructuras de acero y de hormigón *in situ*, además del cumplimiento de plazos y el precio cerrado.

Algunas propiedades intrínsecas del hormigón como material, tales como su resistencia al fuego, basicidad y protección de armaduras, así como su durabilidad, han motivado el creciente número de estructuras proyectadas con prefabricados de hormigón. Las ventajas de la prefabricación en cuanto a control intenso del proceso de fabricación de las piezas y el permitir trabajar con independencia de las condiciones climáticas, han dado un impulso al sistema por la confianza generada a nivel de calidad, y de cumplimiento de plazos de ejecución. Todo esto, combinado con el buen comportamiento del hormigón armado en elementos trabajando a flexión y compresión, y muy especialmente del hormigón pretensado, que ha permitido alcanzar luces en edificios industriales en el entorno de los 50,00 m con pequeñas deformaciones dentro del rango normativo.

Aunando las reseñas de distintos autores (Koncz, T., 1968; Fernández Ordóñez, J.A., 1974; Burón, M., 1995; Burón M. et al., 1997; Navarro F. et al., 2003; Bachmann, H. et al., 2011) y de las guías de diseño (IECA-ANDECE, 1996; FIP, 1996; Ache E-10, 2004; Andece, 2008; FIB Bulletin 74, 2014), pueden señalarse algunas ventajas del hormigón prefabricado que son de aplicación a las soluciones estructurales ejecutadas con este material, y particularmente a los edificios industriales con cubiertas ligeras:

- Elevada resistencia al fuego sin tratamientos especiales. Por defecto y habitualmente en estructura principal de vigas, pilares y placas alveolares: REI 30 a REI 120, pudiéndose llegar a valores mayores aumentando recubrimiento y/o cambiando la sección. Esto evita la necesidad de un tratamiento de ignifugado de las estructuras.
- Basicidad del hormigón, que repercute en protección de armaduras y elementos metálicos aumentando la durabilidad.
- Buen comportamiento en ambientes agresivos, con posibilidad de utilización de distintos cementos en función del tipo de ambiente.
- Control de calidad intenso, fruto de la industrialización y elaboración del hormigón en central/fábrica.

- Limitación de los riesgos derivados de las uniones complejas al trabajar, siempre que la geometría y las cargas actuantes lo permitan, con uniones sencillas de ejecutar; típicamente, soluciones con piezas de apoyo isostático y nudos articulados.
- Fácil revisión de apoyos con control visual de entrega, evitando riesgos en un punto de elevado compromiso.
- Acabado de buenas cualidades estéticas, especialmente con el uso del hormigón autocompactante.
- Elevada resistencia estructural de los materiales, con resistencia a compresión habitual del hormigón de 40 a 60 Mpa.
- Disminución y garantía de plazos de construcción. Rapidez de ejecución.
- Disminución de riesgos en obra, al montarse con uno o varios equipos especializados de instaladores profesionales de tres personas por equipo habitualmente. La mayor seguridad en obra está también condicionada por el tipo de estructuras, que suelen ser autoportantes y estar preparadas para colocar sistemas de protección individual, dejando embebidas durante el hormigonado de las piezas en fabrica casquillos y pasa-tubos para instalar el sistema de protección individual.
- Gastos de mantenimiento mínimos, al no precisarse tratamientos ni revestimientos de aplicación periódica para preservar las propiedades de los elementos, y gracias a la facilidad de limpieza con la presencia de piezas de líneas simples y bordes lisos.
- Precio cerrado de los trabajos contratados, y forma de gestión de trabajos por parte de una única empresa que se encarga de las fases de fabricación, transporte y montaje. Habitualmente, la empresa fabricante se encarga también de la gestión de toda la documentación técnica: planos, anejo de cálculo y dossier de calidad.

- Facilidad de cambio de uso del edificio por las propiedades inherentes y acabados propios de la prefabricación de hormigón.
- Dado el sistema estructural, permite trabajar sin juntas de construcción o en su caso una mayor distancia entre juntas, ya que las piezas al llegar a obra han sufrido una parte muy importante de la retracción total.
- Alta capacidad de absorción de impactos.

Como bien señala Lopez, A., 2014, los principales argumentos para defender la industrialización, construir elementos en fábrica e instalarlos en obra, son: construir más rápido, con más calidad, con menor impacto ambiental y si puede ser, con menor coste, argumentos que ya se han expuesto y defendido por otros autores: Nissen, H., 1976; Bender, R., 1976; Koncz, T., 1977, hablando de la construcción industrializada con diferentes matices.

En el desarrollo y evolución de los materiales encontramos importantes aportaciones en Hue, F., 2003, focalizado en los hormigones de alta resistencia y prefabricación y en Esteban, M. et al., 2003, sobre el empleo del hormigón autocompactante en la prefabricación, donde se incide en lo que el autor denomina las tres dimensiones de la construcción sostenible: la medioambiental, con mayor durabilidad, menos residuos, óptimo consumo de materias primas, mayor inercia térmica y menos consumo de energía; la social, con empleo local, espacios confortables y seguridad de ejecución; y la económica, con menores costes globales de obra.

Dentro de la evolución del sector de la prefabricación, la técnica del pretensado ha sido fundamental en el desarrollo de las soluciones de cubiertas con grandes luces en los edificios industriales. Según indica Fernández Ordóñez, J.A., (1978), Freyssinet lleva el hormigón a los dominios hasta entonces copados por las estructuras metálicas, deja de ser el material tosco y pesado, para conquistar la ligereza. Las primeras vigas pretensadas de hormigón prefabricado de gran longitud son ensayadas en Frankfurt y Stuttgart entre los años 1933 y

1936, con modelos a escala 1/3 en vigas de 60,00 m como puede verse en la Figura 2.1, y empiezan a fabricarse en serie las 4 vigas de 34,00 m para el puente de Oelde en 1938.

Figura 2.1. Viga de ensayo de Frankfurt por E. Freyssinet. Maqueta a escala 1/3 (20 m) **1933-1936**. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A., (1978).

Las mejoras en la técnica del pretensado, permiten a Freyssinet construir la pasarela de peatones de Bully- Grenay en 1944 de 30 m de luz y 1,80 m de canto y un puente en Brest en 1947 de 63,00 m de luz, formado por 4 vigas de canto variable de 4,00 m en el centro y 3,40m en los apoyos.

Figura 2.2. Colocación de vainas. Pasarela de peatones de Bully- Grenay por E. Freyssinet. **1944**. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A., (1978).

Figura 2.3. Viga prefabricada pretensada de 63 m en Brest por E. Freyssinet en **1947**. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1978).

En España, Eduardo Torroja utiliza de forma intuitiva la idea del pretensado en la estructura del acueducto de Tempul en 1925, para controlar la fisuración y acotar el alargamiento de los tirantes. A esta genialidad demostrada por Torroja se deben las primeras estructuras pretensadas construidas en España, adelantadas, audaces y pioneras de la historia del pretensado, con una funcionalidad y estética deslumbrantes, con ejemplos como la cubierta del mercado de Algeciras en 1935 con una cúpula esférica de diámetro 47,8 m y el acueducto de Alloz en 1939, estructura donde con gran lucidez se aplican los principios de la técnica del pretensado formulados por Eugène Freyssinet como bien se explica en ATEP, (1970).

Figura 2.4. Estructuras de Eduardo Torroja. Acueducto de Tempul **1925**, Mercado de Algeciras **1935**, Acueducto de Alloz **1939**. Reproducidas de Torroja, E. (1999).

La aparición en el mercado español de los primeros alambres finos de alta resistencia dio pie al desarrollo de los elementos prefabricados con armaduras pretesas, que en el año 1943 dan lugar a la fabricación en taller de las primeras viguetas pretesadas y su aplicación a la construcción de un puente de pequeña luz. En la década de los años 50, la creación del “sistema Barredo” de pretensado inicia un camino que alcanzará la extensión de las aplicaciones en la década de los 60 y de los 70. Los inicios, debido a los escasos y limitados medios auxiliares de transporte y elevación, serán mayoritariamente con dovelas prefabricadas unidas mediante postesado en obra.

La introducción de la técnica del pretensado en España fue tan importante que las publicaciones ya desde sus portadas están dando un aldabonazo para mostrar dónde se encuentra la industria en ese momento. Así en 1961 y 1962 se publican las portadas en el boletín nº 61 y nº 62 de la Asociación Española del hormigón Pretensado del IETcc que se reproducen en la Figura 2.5.

Figura 2.5. Portada de las revistas de la Asociación Española del hormigón Pretensado del IETcc, en **1961** y **1962**. Reproducidas de Asociación técnica del hormigón pretensado. Boletín nº 61 y nº 62. IETcc.

Son numerosos los autores que, hasta los años más recientes, hablan de las ventajas del hormigón pretensado, como por ejemplo las señaladas en Sánchez, F. et al., 2002:

- Mayor durabilidad por la estricta limitación de abertura de fisuras.
- Gran capacidad para recuperar la forma inicial cuando cesa la carga actuante, por su comportamiento elástico.
- Soluciones con ahorro de material: entre un 15 y un 30% en hormigón, y entre un 60 y un 80% de acero, respecto al hormigón armado, debido al trabajo de la totalidad de la sección y al elevado límite elástico de los aceros de pretensado.
- Mayor resistencia a fatiga del hormigón pretensado respecto a las estructuras metálicas soldadas o atornilladas. Esta elevada resistencia encuentra su justificación en la pequeña amplitud de los ciclos de tensión en el acero de las armaduras.
- Posibilidad de empleo de grandes luces y grandes cargas, con el uso del pretensado. Elevada relación luz/canto sin problemas de flechas. Concretamente, con hormigón pretensado:
 - Menor deformabilidad: en el hormigón pretensado es del orden de $\frac{1}{4}$ del hormigón armado
 - Estructuras esbeltas: relaciones aproximadas de canto/ luz en forjados de $\frac{1}{40}$ y en cubiertas de $\frac{1}{20}$.
- Reducción del tiempo de construcción por su uso en estructuras industrializadas.
 - Reducción plazo.
 - Posibilidad de uniones entre piezas.
 - Empleo de hormigones que consiguen rápidamente resistencias mínimas elevadas, para poder transferir el esfuerzo del pretensado al hormigón.

En este desarrollo, se encuentran ejemplos que incluso hoy en día siguen resultando de una audacia y genialidad dignas de resaltar, como las vigas pretensadas huecas denominadas vigas “hueso” de Fisac (el nombre es dado por la semejanza morfológica y tensional), construidas por piezas o dovelas y postesadas en obra, cuyo nacimiento y concepto se explica en Hormigón y Acero, (Fisac, M., 1970): tocamos aquí unos acordes que llevan una doble dualidad: solución estructural y arquitectónica, durable y “traccionable”.

Figura 2.6. Piezas huecas pretensadas. Vigas Hueso. Fisac, M. (1970).

En el estudio de obras recientes, con la denominación de **estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales**, se quiere englobar el conjunto de elementos portantes que conforman el esqueleto de un edificio construido en una central o fábrica (en la actualidad de instalación fija en la gran mayoría de casos) y transportadas a obra para ser instaladas. Los elementos estructurales están fabricados de hormigón armado o pretensado y las fases de construcción consisten en fabricación en instalación fija, transporte y montaje en obra de los elementos prefabricados, habitualmente con grúas móviles.

El ámbito de la **edificación industrial** comprende: estructuras de planta única y grandes luces para conformar soluciones de cubiertas; naves, centros logísticos, pabellones, centros comerciales, almacenes, cuyo uso más habitual es el industrial, logístico y comercial, excluyendo las soluciones de residencial

(casas, apartamentos, bloques de viviendas) y las construcciones de obra civil prefabricada (puentes, dovelas, marcos, etc.).

Son encomiables los esfuerzos realizados por Burón, M., 1995, en su artículo sobre el estado del arte en España de la prefabricación en edificación, donde reseña ya que la utilización de elementos prefabricados es frecuente en la edificación de edificios industriales. En lo referente al modo de trabajo de las estructuras, se reseña el uso extendido tanto de los modelos isostáticos como hiperestáticos con nudos rígidos. **Se reseña que las estructuras más habituales en la construcción de naves industriales, son las de sistema o conjunto estructural formado por tres elementos: pilar, viga y correa, con estructuras con las vigas simplemente apoyadas sobre pilares (nudo pilar-viga articulado), que son precisamente las estructuras estudiadas en esta tesis.** Se nos muestra cómo se ha extendido el uso de los paneles de cerramiento, lisos o nervados, con o sin material aislante y con diversos tratamientos superficiales, y se señalan rendimientos de montaje de 2.000 m²/día.

Se insiste en las ventajas de la prefabricación de edificios como solución eficaz, economía, de alta tecnología, que asegura la calidad y que no se limita a una utilización por catálogo, sino que es una forma alternativa para construir todo tipo de estructuras, con un gran futuro con la colaboración de todos: proyectistas, constructores, administración y empresas de prefabricado, con el objetivo de construir con mejor calidad.

Del artículo de Burón se han extraído las siguientes imágenes, que resumen de forma muy visual, cómo ha sido la evolución en España.

Figura 2.7. Logotipo de viguetas Freyssinet década de 1940, ensayo de las vigas del primer puente pretensado en España en 1951, forjado de cubierta realizado con viguetas pretensadas en la década de 1950, cubierta con elementos prefabricados pretensados década 1950, cercha con pares-tirantes y viguetas pretensadas, década 1950, naves rurales década 1960. Reproducidas de Burón, M. (1995).

Figura 2.8. Primeros edificios totalmente prefabricados, finales década 1960, Almacén Corte Ingles Valdemoro, década 1970, cubierta de gran superficie con deltas, década 1970, vigas especiales Centro comercial Alcampo Valencia, década 1980, piezas de muro curvas en edificio Azca, década 1980, centro comercial Aluche, década de 1990. Reproducidas de Burón, M. (1995).

También se encuentra un buen termómetro sobre la evolución en Lleida, J.L., 1995, en el estado del arte en España de la prefabricación en obras civiles, donde se expone cómo ha sido la historia y cómo hemos llegado a trabajar

mayoritariamente en fábricas fijas, y a pasar de ejecutar puentes isostáticos de hasta 40 m de luz a soluciones hiperestáticas de hasta 70 m. De igual forma, se señala cómo han sido precisos esfuerzos en el estudio y entendimiento de las estructuras evolutivas con elementos hormigonados en fechas diferentes, retracción, fluencia, temperatura, con estudios detallados y cálculos avanzados. Las ventajas de rapidez, control de ejecución, calidad, precio, garantía de coste fijo, señalando la importancia de la relación proyectista-empresa de prefabricado. Ya nos señalaba que las mejoras y evoluciones en materiales y estudios, como los hormigones de muy alta resistencia, marcarán el futuro.

Burón, M., et al, 1997 hace referencia a la importancia de tener como premisa la modulación en la concepción del proyecto de estructuras prefabricadas realizadas con “Prefabricación Abierta”, como garantía de buena conexión entre elementos, y optimización de diseño, a través del módulo, retícula o cuadrícula básica como la definimos en la tesis, que es la unidad adoptada en cada diseño para definir el proyecto. Este concepto aparece ya anteriormente en muchos autores específicamente hablando de la prefabricación de elementos de hormigón para la construcción de edificios industriales como Koncz, T., 1962, Neufert, E., 1965 y Fernández Ordóñez, J.A., 1974. Koncz nos dice: *“El módulo es el máximo común divisor a partir del cual pueden deducirse todas las medidas de la construcción, por adicción o por multiplicación. Cuando todas las dimensiones de la obra son realmente múltiplos del módulo, y existen entre tales dimensiones relaciones fácilmente apreciables, se ha conseguido para el sistema la mutua coordinación de medidas. La magnitud de dicho módulo, puede elegirse según el criterio de cada uno. Lo importante no es su tamaño, sino el hecho de su fijación”*.

El módulo en planta y sección definirá una retícula espacial, definida por las líneas de coordinación. Este criterio es fundamental en el planteamiento propuesto en nuestro trabajo, y se sigue referenciando en todos los manuales actuales de estructuras como el Ching, F.D.K., 2014, donde priman por sencillez los esquemas estructurales con retículas rectangulares y regulares.

Figura 2.9. Modulación y líneas de coordinación en planta o malla de posicionamiento. Ejemplos de composición. Reproducida de Koncz, T. (1962) y esquemas estructurales con diferentes módulos y retículas reproducido de Ching, F.D.K. (2014).

Ciertamente existe una bibliografía extensa y de gran calidad sobre diseño y cálculos de hormigón armado, como por ejemplo (García, A., 2001; Jiménez, P., 2000). y sobre cálculo y realizaciones en hormigón pretensado (Moell, H., 1958; Leonhardt, F., 1988; Calavera, J., 1999), pero ya desde esta fase de búsqueda se detecta la dificultad de encontrar apartados específicos referidos a la construcción de edificios industriales prefabricados, y más concretamente a las cubiertas ligeras de grandes luces. Hay excepciones, especialmente las encontradas en algunos libros descatalogados como; Moral, F. (1962) en el apartado XLI, titulado el hormigón precomprimido, donde en el apartado de

realizaciones nos muestra un ejemplo de vigas ligeras de sección Y invertida para cubiertas de grandes luces, Koncz, T., 1968 y Fernández Ordóñez, J.A. et al., 1973, posiblemente los dos manuales más extensos dedicados a prefabricación industrial, Calavera, J., 1999, con referencias directas y algún ejemplo de construcciones de naves y cubiertas con vigas y correas prefabricadas, en los capítulos 25 y 68, y en la reciente guía FIB Bulletin 74, 2014, donde se encuentra bibliografía específica de edificios industriales.

El hormigón autocompactante (HAC) merece una reseña especial dentro de la evolución histórica de la prefabricación. Según Ache Monografía M-13, 2008, es el avance más importante que se había producido en los últimos años en la tecnología del hormigón. El HAC, es un hormigón cuya característica principal es la capacidad de fluir y rellenar correctamente el volumen del molde a hormigonar por la acción de su propio peso, sin ayuda de ningún método de compactación. Su bondad ha sido probada especialmente en prefabricación con ventajas técnicas, económicas y ambientales en su utilización. El desarrollo ha sido posible gracias a la colaboración con la industria química, y el desarrollo de los aditivos denominados superplastificantes de última generación. Entre las ventajas técnicas destacan la posibilidad de trabajar con armados más densos, formas más complejas, dejando mejores acabados superficiales y sin depender del proceso de vibración, con la mejora consiguiente de las condiciones de seguridad y salud de los trabajadores al evitar el manejo de vibradores.

Somos conscientes del carácter profundamente estructural del tema y de que resulta de gran importancia para lograr la optimización las decisiones tomadas en la fase de diseño, con un planteamiento constructivo lo más sencillo y práctico posible. Para un técnico que quiera proyectar en prefabricado, es de gran utilidad poder consultar con una empresa especializada, de las cuales en España hay buenos ejemplos. Pero también es de gran utilidad tener bibliografía específica, como ocurre con otras soluciones estructurales como las estructuras metálicas donde tenemos desde manuales genéricos descatalogados Hart, F., 1976, pasando por prontuarios más o menos actualizados a la normativa vigente como Ensidesa, 1969 y Rodríguez, R., 2002 del CEDEX, hasta libros como

Arguelles, R., 1999, Tomo 1 y 2 de Estructuras de acero, que se han actualizado a la normativa en vigor en la tercera edición del 2013.

Destacar aquí los esfuerzos de la FIB (International Federation for Structural Concrete) y ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural) que presentan dos de las guías más actualizadas de recomendaciones y diseño de estructuras prefabricadas de hormigón, FIB 74, 2014 y ACHE E-10,2004 y también la reciente 16ª edición del mítico Jiménez Montoya, que ha dedicado su capítulo 26 al hormigón prefabricado, Arroyo, J.C., et al., 2018, para que el proyectista en los primeros estadios del nacimiento del proyecto tenga un soporte a la hora de plantear un esquema básico, pudiendo imprimir al proyecto una solución ajustada a las necesidades arquitectónicas, de instalaciones y con un planteamiento optimizado desde el punto de vista estructural.

Los edificios industriales con estructura de hormigón prefabricado suelen emplear sistemas de cerramiento igualmente industrializados, siendo una solución muy habitual la de paneles de fachada de hormigón prefabricado. En este sentido, son distintos autores (Gatz, K., 1968; Lewicki, B., 1968; Bachmann, H. et al., 2011) y guías de diseño (IECA-ANDECE, 1996; FIP, 1996; Andece, 2008; FIB Bulletin 84, 2017), que señalan las ventajas de la solución con paneles prefabricados de hormigón respecto a otros sistemas de fachadas:

- Alta calidad, acabados personalizados, piezas a medida, uniones sencillas.
- Acabados vistos con el uso de hormigón autocompactante.
- El prefabricado de hormigón es un “traje a medida” desde la misma elección de los materiales:
 - Tipo de cemento.
 - Hormigones con fibras.
 - Resistencia característica del hormigón (30-100 Mpa).
 - Longitudes de piezas.
 - Formas y secciones.
 - Uniones según necesidades.

- Tratamientos exteriores (Distintas formas con matrices de goma, texturizados, hormigón visto, etc.).
- La inercia térmica del hormigón se puede aprovechar como ahorro energético en fachadas.
- Posibilidad de elevado aislamiento térmico y acústico, en función del espesor y tipo de material aislante (EPS, XPS, PIR, PUR...).
- Espesores reducidos y control de fisuración con la adicción de fibras.

En el caso de los paneles de fachada, la bibliografía nos habla del dimensionamiento teniendo en cuenta las distintas fases de la construcción evolutiva hasta la puesta en obra: desmoldeo, izado, transporte y montaje, y haciendo referencias a la resistencia al fuego y el comportamiento termoacústico. Se reseña la importancia del análisis de las condiciones de fabricación, transporte, montaje, y fase de servicio, en el comportamiento mecánico de los paneles y la buena resistencia a fuego que caracteriza el hormigón prefabricado, en función de configuraciones y espesores adecuados resulta de gran ayuda en el diseño. Se apunta como interesante, el poder realizar estudios específicos de las propiedades térmicas y acústicas, dado el incremento de interés normativo y de uso en los últimos años,

Por último, pero no menos importante, nos parece necesario hacer una referencia al estado del conocimiento, en lo referente a los conceptos, orden de magnitud, la puesta en común diferentes ingenieros y arquitectos, de ayudar y aprender a pensar, que son parte fundamental de la motivación de esta tesis.

A riesgo de olvidar algunos de ellos, indicamos los siguientes libros de orden de magnitud, de conceptos, de reflexiones, de claves, de difusión de ideas, de incentivos para pensar:

- Torroja, E., 1976, con Razón y ser de los tipos estructurales.
- Rui-Wamba, J., 1998, Aforismos estructurales.
- Rice, P., 1994, Un ingeniero imagina.

- Aguiló, M., 2013, Qué significa construir.
- Arroyo, J.C., et al., 2009, Números gordos en el proyecto de estructuras.
- Arroyo, J.C., et al., 2018, Jiménez Montoya Esencial. Hormigón armado.
- Berger, J., 2016, Modos de ver.
- Campo, A., 2008, Aprendiendo a pensar.
- Edward, A., 2017, Cómo funciona un edificio.
- Engel, H., 2018, Sistemas de estructuras.
- Billington, D.P., 2013, La torre y el puente.
- Fernández Casado, C., 2005, La Arquitectura del Ingeniero.
- Fernández Ordóñez, J.A., 1978, Eugene Freyssinet.
- Fernández Ordóñez, J.A., et al., 1973, Arquitectura y Represión.
- Fundación COAM., 2007, Miguel Fisac. Huesos Varios.
- Manterola, J., 2016, El oficio de ingeniero.
- Margarit, J., 2005, Cálculo de estructuras.
- Gordon, J.E., 2004, Estructuras o por qué las cosas no se caen.
- Ortega, J., 2004, Meditación de la técnica y otros ensayos sobre ciencia y filosofía.
- Petroski, H., 2007, La ingeniería es humana.
- Torroja, E., 1999, Las estructuras de Eduardo Torroja.
- Kuprenas, J. et al, 2016, 101 cosas que aprendí en la Escuela de Ingeniería.

Figura 2.10. Dibujo de Jørn Utzon. Reproducida de Campo, A. (2008).

2.2 Historia de la prefabricación en España. Realizaciones, evolución y comparativa.

2.2.1 Realizaciones.

En la búsqueda realizada en el arranque de la tesis, para conocer lo más posible del estado de la cuestión, aparecieron muchas joyas, que marcaron un poco el camino, como John Berger, quien nos alienta en el camino visual, cuando nos dice que *“la vista llega antes que las palabras, que el niño mira e identifica antes de hablar”*, Berger, J. (2016). También las palabras de Eduardo Torroja, en el primer capítulo de Razón y ser de los tipos estructurales, cuando habla de que *“nada de lo dicho ni de lo que se sigue es nuevo; no es más que un conjunto de perogrulladas. Pero, aun así, puede ser interesante el revisarlas y agruparlas en unas páginas; por cuanto, es siempre del mayor interés el meditar sobre ellas y el grabarlas más y más en el espíritu”*. También nos dice Torroja, que *“en las escuelas hay tanto que aprender que rara vez queda tiempo para pensar”*. Así, que humildemente queremos centrar este apartado en lo visual, para revisarlo y pensar, aunque no sea nada nuevo.

Peter Zumthor, escribe: *“en las cosas corrientes de la vida cotidiana reside una fuerza especial, nos parecen decir los cuadros de Edward Hopper. Sólo hay que mirarlas el tiempo suficiente para verlas”*. Zumthor, P., 2014.

Vamos a reseñar aquí los esfuerzos, que han sido muchos a lo largo del tiempo, por mostrar la evolución, cambios y avances en este campo, de la forma más visual posible, siguiendo una línea cronológica para ver la evolución histórica, a través de las publicaciones más relevantes.

Se ha considerado oportuno iniciar este apartado con un gran ejemplo de resumen hasta finales de la década de 1990 en el artículo de Burón, M., et al., 1997, titulado: Evolución de la prefabricación para la edificación en España.

Medio siglo de experiencia, del que resumimos en la siguiente tabla los hitos referenciados.

Tabla 2.1. Evolución de la prefabricación en edificación en España según Burón, M. et al (1997).

Año	Realizador/Lugar	Hito
1.850-1.900	Monnier y Lambot	Prefabricación de maceteros y barcas con hormigón reforzado con alambre.
1.891	Ed. Coignet (Paris)	Vigas prefabricadas en hormigón prefabricado para el Casino de Biarritz.
1.900	(EE.UU)	Premoldeo de los primeros elementos de hormigón armado de gran tamaño para cubiertas. Placas de 5,00 x 1,20 m y 5 cm de espesor.
A partir de 1.900	(EE.UU e Inglaterra)	Las necesidades de viviendas en países industrializados hacen proliferar los proyectos basados en prefabricación.
1.907	Grosvenor Atterbury	Desarrolla un sistema cerrado de construcción de viviendas mediante grandes paneles aligerados de hormigón.
1.908	Thomas A. Edison	Patenta un sistema para construir edificios de hasta tres plantas mediante vertido de hormigón en moldes metálicos.
1.900-1935	---	Desarrollo de sistemas constructivos basados en la prefabricación de elementos no estructurales, fundamentalmente de fachada.
1.928	Eugene Freyssinet	Patenta el pretensado, invento que revolucionará la construcción con hormigón. Hasta entonces un material inerte, pasivo, de fácil degradación a través de las inevitables fisuras, dada la baja capacidad de resistir esfuerzos de tracción, que gracias al pretensado se convierte en material activo, que trabaja principalmente a compresión, lo que le da un carácter isótropo y con unas buenas condiciones de durabilidad. Para esta técnica fue necesario desarrollar los aceros de alto límite elástico y hormigones de altas resistencias.

Año	Realizador/Lugar	Hito
1.929	Eugene Freyssinet	Crea la fábrica de Montargis. Inicia la fabricación de postes pretensados.
1.936	Eugene Freyssinet	Construye el primer puente pretensado con una luz de 19 m y un ancho de 4,66 m, en la Presa de Portes de Fer.
1.942-1.943	Francisco Fernández Conde	Trae las patentes de Freyssinet a España. Fábrica de prueba las primeras viguetas pretensadas.
1.944-1.945	PACADAR, S.A. (Rivas Vaciamadrid-España)	Se constituye la primera fábrica de elementos pretensados en España. Las iniciales significan: piezas armadas con acero de altísima resistencia.
1.945	PACADAR (España)	Se prefabrica la primera viga pretensada en España, con 3,20 m de longitud y 16 cm de canto y 8 alambres de 2 mm de diámetro. Se comercializa bajo el nombre de viguetas Freyssi.
1.947	PACADAR (España)	Primeros ensayos de viguetas en Laboratorio central de la EICCP bajo la dirección de Eduardo Torroja y ensayos oficiales de forjado de vigueta y bovedilla en la Dirección General de Arquitectura.
1.940-1950	(España)	Empleo de vigueta como elemento fundamental de la construcción de forjados en España. Complementada con bloque de hormigón, bovedilla catalana o losa de hormigón in situ (para grandes cargas).
1.950	(España)	Solución con viguetas para cubiertas apuntadas en naves gallinero, con uniones in situ para dar continuidad a la estructura.
1.950	(España)	Realizaciones con viguetas pretensadas, en cubiertas de gasolineras (trabajando para resistir momentos negativos en voladizos), graderíos del campo de Mestalla y cubiertas de grandes superficies.
1.951	(España)	Puente de Anoeta. Primer puente con vigas prefabricadas pretensadas. Se comprobaban todas las vigas mediante pruebas de carga en fábrica.

Año	Realizador/Lugar	Hito
1955-1960	(España)	Viguetas de gran tamaño y canto. Se desarrollan elementos planos como losas pretensadas y vigas TT, de usos suelto o complementado con apoyos en vigas o viguetas. Los elementos planos podían llevar losa superior hormigonada en obra.
1960	(España)	Se empiezan a prefabricar elementos de grandes dimensiones para cubiertas de naves. También cerchas por elementos fabricados en instalaciones fijas y conectados en obra.
1959	J.A. Fernández Ordóñez, y F. Higuera. (España)	Elementos prefabricados pretensados en voladizo. Edificio Accesit al Premio Nacional de Arquitectura. Fernández Ordóñez, J.A, y Higuera, F.
1960-1970	(España)	Prefabricación como una filosofía de construcción. Aparecen naves industriales totalmente prefabricadas. Programa de naves rurales (pilares, vigas y correas), naves en diente de sierra, cerchas, hasta la prefabricación total de grandes naves prefabricadas (pilares, vigas, correas, incluidas fachadas con paneles de cerramiento.
1.957-1.961	Alejandro de la Sota, Francisco Fernández Conde, J.A. Fernández Ordóñez y Manuel Ramos.	Edificio CLESA en Madrid con soluciones prefabricadas armadas y pretensadas.
1970-1980	PACADAR (Valdemoro- España)	Nave industrial prefabricada para almacén de El Corte Inglés en Valdemoro. 250.000 m ² , construidos a un ritmo de 1.000 m ² /día. Posiblemente en la época, el almacén más grande del mundo realizado con elementos prefabricados pretensados.
1970-1980	(España)	Prefabricación de placas de forjado para grandes cargas y luces, placas alveolares pretensadas, grandes placas TT.

Año	Realizador/Lugar	Hito
1970-1980	(España)	Desarrollo de sistemas de paneles de cerramiento: lisos y nervados. Macizos o con aislante incorporado (hormigón ligero, porexpan). Armados y postesado en grandes dimensiones. Acabados liso, áridos vistos, chorreado, pintado, texturas.
1970-1980	(España)	Grandes superficies cubiertas con jácnas peraltadas, de alma llena o aligeradas. Celosías para grandes luces. Apoyos a media madera.
1970-1980	Salvador Pérez Arroyo y Federico Echevarría. (España)	Edificio ELMU. Pórticos para grandes luces y cargas con vigas continuas fabricadas por elementos y postesadas en obra. También se realizan edificaciones modulares con paneles en tres dimensiones.
1975-1985	(España)	Edificios de hasta tres alturas con plantas exentas, con paneles y forjados autoportantes.
1975-1985	Antonio Miro (España)	Centros escolares totalmente prefabricados en Aragón y Navarra, con los cerramientos de fachada formando parte de un sistema estructural hiperestático para dar rigidez al conjunto.
1975-1985	(España)	Primeras vigas prefabricadas tipo cajón. Artesas para aparcamiento en calle Diputación – Barcelona.
1980-1990	Miguel de Orio (España)	Edificio de núcleo rígido en Madrid, de 110 m de altura con pilares prefabricados en el perímetro tratados con chorro de arena.
1980-1990	(España)	Estructura y cerramientos prefabricados para edificios comerciales para grandes superficies.
1980-1990	(España)	Nuevas soluciones de vigas (V) y pasarelas peatonales con vigas cajón. Piezas especiales y piezas curvas en edificio Azca, jácnas en voladizo estadio del Sardinero con J.J. Arenas, los graderíos del estadio de Teruel con Federico Echeverría.

Año	Realizador/Lugar	Hito
1990-2000	(España)	Prefabricación de edificios de varias plantas con estructura hiperestática para grandes superficies comerciales. Por ejemplo, el Centro Comercial Aluche de 70.000 m ² en cinco plantas y cargas de hasta 20 kN/m ² con el arquitecto Juan Serrats. Montaje de 20.000 m ² /mes.
1990-2000	Juan Navarro Baldeweg y Julio Martínez Calzón (España)	Edificio de las Consejerías de la Junta de Extremadura en Mérida. Vigas cargadero prefabricadas pretensadas, sobre las que apoya un edificio de 4 plantas.

También podemos seguir la evolución en el trabajo de Salas, J., 2010, sobre las tendencias e hitos del sector de la industrialización a nivel europeo y especialmente en España, desde 1970, donde puede verse que los cambios tecnológicos han permitido la evolución desde la prefabricación cerrada a las nuevas tecnologías constructivas, auspiciados por los avances en las técnicas de producción. En edificación de viviendas, esto ha supuesto el paso de la construcción mediante grandes paneles de hormigón a los sistemas modulares actuales.

Queremos exponer a continuación algunos ejemplos de realizaciones publicadas, agrupados de forma cronológica por décadas, para ver lo que se construía en España en lo referente a edificios industriales y añadiendo alguna referencia de otros tipos de soluciones y de realizaciones internacionales.

2.2.1.1 Década 1940-1950.

Para iniciar las realizaciones queremos rendir homenaje a una de las primeras obras ejecutadas con la utilización de la técnica del pretensado en España en edificación industrial, como es el majestuoso mercado de Algeciras proyectado por Eduardo Torroja en **1935**. La estructura es una cúpula laminar

esférica de 47,80 m apoyada sobre ocho soportes, y que supuso un récord mundial de luz en su época, con un radio de curvatura de 44,10 m. y un espesor de cálculo de la lámina de 9 centímetros, que aumenta hasta los 50 cm al llegar a los soportes. La estructura cuenta con un zuncho periférico postesado hormigonado después de tesar. Torroja ya había mostrado la intuición por la técnica del pretensado en el Acueducto de Tempul en 1925 y que desarrollaría explícitamente en 1939 en el Acueducto de Alloz.

Figura 2.11. Mercado de Algeciras, **1935**. E. Torroja. Esquema y detalle de zuncho-anillo postesado antes de hormigonar. Tomadas de Torroja, E. (1976) y Torroja, E. (1999).

Destacar a nivel bibliográfico, el trabajo de Nardíz, C., 2017, en el que nos presenta a través de seis arquitectos y seis ingenieros (E. Torroja, entre ellos), lo que han sido las relaciones entre arquitectura e ingeniería en el siglo XX.

Jurado, J., 1996, nos presenta una visión sobre la historia de realizaciones prefabricadas en España. De cara a este estudio son muy significativos algunos ejemplos de realizaciones, como el proyecto para la estación de trolebuses en Madrid de **1.950** con arcos triarticulados de hormigón prefabricado de 36,80 m con tirantes de acero y 5,60 m de flecha, del Ingeniero Fernández Casado (uno de los precursores en España de la fabricación de naves industriales) y construido por Huarte & Cia, cuyo montaje de la estructura prefabricada para una superficie de 196 x 73 (aprox. 14.300 m²) se realizó en 2 meses. Los arcos fueron fabricados a pie de obra en posición vertical e izados con mástiles, con separaciones de 5,00 m y arriostrados con vigas de 0,40 x 0,20 m.

Figura 2.12. Estación de trolebuses de Madrid. 1950. Reproducida de Archivo Carlos Fernández casado. FC-088. CEHOPU-CEDEX e (inferior) Koncz, T. (1968).

Carlos Fernández Casado, es pionero y desarrolla una importante actividad en lo referente a naves y edificios industriales como bien describe el Archivo Carlos Fernández Casado del CEHOPU-CEDEX, tanto en esta época, que tiene como colofón, la impresionante estructura de la estación de trolebuses de Madrid,

como en la década siguiente. Incluimos las referencias de obras y fechas en la tabla siguiente, y fotografías del archivo CEHOPU-CEDEX y del Catálogo de prefabricación de Huarte y Cía. S.A.

Tabla 2.2. Resumen de realizaciones de Carlos Fernández Casado en la década de 1940-1950.

Nº	Edificio industrial	fecha
1	Cubierta para la Escuela de Ingenieros de Montes en Madrid	1942
2	Taller de Industrias Metálicas de Huarte (IMENASA) en Pamplona	1943
3	Nave de producción de Estudios Ballesteros en Madrid	1944
4	Taller de montaje para el Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz	1946
5	Factoría Barros de la Sociedad Ibérica del Nitrógeno en La Felguera	1947
6	Talleres Huarte en Madrid	1948
7	Fábrica de Hilados Goñi e Hijos en Pamplona	1949
8	Estación de Trolebuses de Madrid	1950

Figura 2.13. Realizaciones de Carlos Fernández Casado. Por filas y de arriba hacia abajo: Escuela de Ing. Montes (1942), IMENASA (1943), talleres Huarte (1948) y taller INTA (1946). Reproducidas de Huarte y Cía. (1960) y del archivo Carlos Fernández Casado. CEHOPU-CEDEX.

2.2.1.2 Década 1950-1960.

El sistema Barredo de pretensado, resulta de vital importancia en el desarrollo del pretensado en España, y se explica profusamente en ATEP, 1970. El primer sistema español de pretensado patentado, arranca en **1952** por el ímpetu de Ricardo Barredo y la influencia de Eduardo Torroja, y será determinante para propulsar las obras con armaduras postesas con alambres o cables trenzados.

Figura 2.14. Detalles del sistema de pretensado Barredo (patente).

Reproducidas de ATEP (1970).

New, D.H. (1959), es el ponente de los progresos conseguidos en la prefabricación de elementos de hormigón pretensado y en los sistemas utilizados para el montaje y colocación en obra, presentado en el Tercer Congreso de la Federación Internacional del Pretensado. Los congresos de la FIP son un magnífico termómetro para ver la evolución de la prefabricación a nivel mundial. En este congreso, Barredo mostraba desde España la construcción de vigas para cubiertas con elementos prefabricados (dovelas) de 1,53 m de longitud. Los elementos se pretensaban conjuntamente mediante armaduras postesas,

colocadas en los conductos formados por unas barras de acero colocadas en el molde y retiradas poco antes de terminar el fraguado del hormigón.

Dentro de los múltiples proyectos de edificios y naves industriales del Ingeniero Fernández Casado, que ya en 1941-1942 plantea una cubierta con cerchas prefabricadas para la Escuela de Ingenieros de Montes de Madrid, destaca la factoría de ENSIDESA en Avilés, unas instalaciones de 180.000 m², en las que se utilizaron arcos triarticulados con tirante, para luces de 30,20 m, con cerchas separadas 14 m. El tirante era hormigonado en las partes que reciben correas y descubierto bajo las linternas.

Figura 2.15. Para la factoría de ENSIDESA en Avilés, en **1954**. Proyecto de Huarte y Cía, con Fernández Casado. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Hacemos a continuación en resumen de realizaciones del ingeniero y maestro Carlos Fernández Casado en esta década, en la que sigue siendo referencia destacada y en la que aparece referenciado en los manuales más importantes como el Koncz, T. (1968). Se pueden consultar fotos y documentación en la página:

<http://www.cehopu.cedex.es/cfc/indices/obraindx.htm>

Tabla 2.3. Resumen de realizaciones de Carlos Fernández Casado en la década de 1950-1960.

Nº	Edificio industrial	Año
1	Talleres y almacenes FIAT en Madrid	1951
2	Naves para la Empresa Nacional Siderúrgica (ENSIDESA) en Avilés	1954
3	Empresa Nacional “Calvo Sotelo”, S.A.	1955
4	Nave de Metalúrgica de Santa Ana en Linares	1956
5	Nave de fundición de ENDASA en Avilés	1957
6	Naves de Lacas Mari en Barcelona	1959
7	Naves de la Empresa Española de Zinc en Cartagena	1960

Figura 2.16. Nave Metalúrgica Santa Ana en Linares, en **1956**. Reproducida de Archivo Carlos Fernández Casado. FC-093. CEHOPU-CEDEX.

La cubierta para la Central Hidroeléctrica de Saltos del Cortijo en la presa Juliana, Logroño en **1955**, se trata de la primera cubierta realizada con vigas ligeras de sección en Y invertida prefabricadas por dovelas.

Figura 2.17. Vigas por dovelas para la cubierta de la Central Hidroeléctrica de Saltos del Cortijo. **1955**. Reproducidas de ATEP (1970).

Figura 2.18. Cubierta Garaje SAICA en Valencia, **1954**. Reproducidas de ATEP (1970).

Figura 2.19. Cubierta nave Valenciana de Cementos, **1954**. Reproducidas de ATEP (1970).

Figura 2.20. Cubierta Mercado de Ruzafa, Valencia. **1959**. Reproducidas de ATEP (1970).

En la evolución de la prefabricación en España según Burón, M., et al, (1997), se relata la importancia del Edificio CLESA de **1957**, con proyecto de Alejandro de la Sota y José Antonio Fernández Ordóñez.

Figura 2.21. Edificio CLESA. **1957**. Alejandro de la Sota y J.A. Fernández Ordóñez. Reproducidas del archivo digital Fundación Alejandro de la Sota.

En Konz, T. (1968) se encuentra la obra de **1957** para ENDASA en Avilés, con proyecto del Ingeniero Carlos Fernández Casado, construido por Huarte & Cia. Con luces de 30,70 m, cuenta con cerchas de celosías triangulares con la armadura de tracción descubierta, separadas 5,90 m y prefabricadas en dos partes. Las viguetas eran de sección 0,28 x 0,12 m y el cerramiento de la cubierta se realizó con placas de Uralita. También se encuentra información de este proyecto en la página del Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (www.cehopu/cedex.es/cfc/obras/FC-092).

Figura 2.22. Cubierta ENDASA en Avilés, de **1957**. Reproducida de Konz, T. (1968).

Figura 2.23. Proyecto de Fernández Casado, construido por Huarte & Cia. Para INASA en Irurzun. Hacia **1960**. Para luces de 21 m. Cercha biarticulada y con tirante, fabricada en dos piezas. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Otra solución empleada en la nave Siemens en **1959**, con proyecto de José Soto Burgos y Carlos Ortuño, que proponen carreras apoyadas sobre vigas pretensadas de 18 m de luz. El montaje se realizó con grúa móvil.

Figura 2.24. Cubierta nave Siemens. **1959**. Reproducidas de ATEP (1970).

La prefabricación en obra, con moldes sencillos de madera como el de la figura siguiente irá poco a poco dando paso a los moldes metálicos.

Figura 2.25: Molde de madera para cercha. Sin datar (**década 1950**).

Reproducidas de Vilagut, F., 1975.

Dentro de otro tipo de soluciones de cubiertas en hormigón, destacamos en la época 1950-1960:

Las vigas PREFLEX patentadas por Rubiera, es un sistema de “preflexión” de viga con cargas que está profusamente explicado en Baes, L., **1958**, realizado cargando la viga metálica con una carga equivalente a la de trabajo y el posterior hormigonado en fábrica de la zapatilla inferior correspondiente a la zona traccionada, como podemos ver en la siguiente figura del número 94 y 95 de la publicación Hormigón y Acero.

Figura 2.26. Sección viga Preflex . Reproducidas de Baes, L. (1958).

Para la resolución de cubiertas usando armaduras de pretensado encontramos en esta época el empleo de tipologías como las cubiertas laminares plegadas con armadura de pretensado. Algunas como la de la Universidad laboral de Tarragona de **1956**, alcanzaban los 20 m de luz con un canto de 2,80 m en los extremos y 1,40 m en el centro. La superficie cubierta diáfana es de 57,60 x 20,00 m en un proyecto de Eduardo Torroja, Alfredo Páez, Florencio del Pozo, con sistema Barredo.

Figura 2.27. Cubiertas laminares plegadas. Universidad laboral de Tarragona. **1956**. Reproducidas de ATEP (1970).

En lo concerniente a proyectos internacionales en esta década encontramos (1950-1960):

Hasta el momento se ha reseñado la evolución técnica y de diseño en España. Se establecen a continuación algunos paralelismos entre la historia de la prefabricación en España y algunos desarrollos internacionales encontrados.

A finales de la década de los 50 y primeros años 60, encontramos en Michailow, W.W., 1958, los procedimientos que se estaban empleando en Rusia para la prefabricación de elementos de hormigón pretensado, y cómo fue evolucionando la prefabricación en este país con la presentación de las armaduras activas en alambre continuo suministrado en carretes o bobinas. En lo referente a vigas para cubierta para la construcción de edificios industriales nos refiere a luces de 12, 15, 18 y 24 m, formadas por elementos individuales de 6 a 9 m de longitud y unidos para formar la viga mediante pernos u hormigonado de la junta de unión entre elementos.

Figura 2.28. Viga compuesta de tres elementos, armadura continua y fijación con tornillos, de longitud total 22,50 m (izq) y viga pretensada de 24 m de longitud (dcha). Reproducida de Michailow, W.W. (1958).

Se nos muestran ejemplos de fábricas en Rusia para la prefabricación de elementos de hormigón pretensado con capacidad de hasta 185.000 m³ anuales, como en la fábrica de Kiefersfelden. Que para una hipótesis de 300 días de producción, nos da una producción estimada diaria de aproximadamente 600 m³/día.

Figura 2.29. Fábrica de elementos de hormigón prefabricados de Kiefersfelden (Rusia). Reproducida de Michailow, W.W. (1958).

Brocard, R. (1961), nos muestra la construcción del edificio dedicado a prefabricación de elementos de hormigón de la firma Matthews y Mumby, cerca de Manchester. Destaca la nave de fabricación de elementos prefabricados con 76 m de longitud y la nave destinada a la preparación de la ferralla con 45 m de longitud). Las vigas curvas en V, que constituyen las limahoyas de la cubierta se apoyan sobre los soportes formados por trapecios invertidos, para formar los pórticos. Esta realización fue posible gracias a la idea del Doctor Ingeniero D. D. Matthews, autor del proyecto.

Figura 2.30. Fábrica de Matthews y Mumby cerca de Manchester. Arriba en construcción y abajo en funcionamiento para la fabricación de elementos prefabricados. **Anterior a 1961.** Reproducidas de Brocard, R. (1961).

2.2.1.3 Década 1960 a 1970.

La década se caracteriza por una preocupación por la iluminación natural y las condiciones de confort lumínico para el uso requerido, siguiendo la corriente higienista. En esta década son dignas de mención las cubiertas en dientes de sierra que tienen también cabida en las soluciones prefabricadas de hormigón, como por ejemplo el proyecto de la cubierta de la factoría de Cimianto de España en Alicante de **1962**, y la cubierta para la factoría General del caucho en Torrelavega en el mismo año, con proyecto de Rafael Romero.

Figura 2.31. Cubierta en diente de sierra para Cimianto – Alicante (Izq) y Factoría General del Caucho – Torrelavega, **1962**. Reproducida de ATEP (1970).

La nave para Celulosas de Motril en Granada, con vigas de 18,98 m, sobre cargaderos:

Figura 2.32. Cubierta celulosas de Motril, **1962**. Reproducida de ATEP (1970).

Queremos destacar de nuevo en esta época, las aportaciones de Carlos Fernández Casado, que siguen siendo de gran relevancia en el desarrollo de las naves prefabricadas.

Tabla 2.4. Resumen de realizaciones de Carlos Fernández Casado en la década de 1960-1970.

Nº	Edificio industrial	fecha
1	Nave para Hytasa en Sevilla	1961
2	Escuela de Formación Profesional Obrera en Barcelona	1962
3	Nave para Intelhorce en Málaga	1962
4	Garaje Catusus en Barcelona	1962
5	Potasas Ibéricas, S.A.	1966

Figura 2.33. Nave para Hytasa - Sevilla. Planos y modelo reducido, **1961**. Reproducida de Archivo Carlos Fernández Casado. FC-098. CEHOPU-CEDEX.

También en esta categoría de aplicaciones de gran originalidad destacan las vigas construidas por piezas prefabricadas de secciones huecas “tipo Hueso”, formadas por dovelas de 1,00m postesadas en obra, propuestas por Miguel Fisac, y que en **1963** llegan a 22,00 m en el Centro de Estudios Hidrográficos de Madrid.

Figura 2.34. Centro de Estudios Hidrográficos, **1963**. Reproducida de ATEP (1970)

Más de 30 años después, Montaner, J., et al 1997, cuenta cómo se plantea la fabricación y montaje de vigas hueso, con vigas pretensadas en fábrica de un sólo tramo y armaduras pretesas, para la sustitución de la estructura de cubierta de la nave de ensayos de este mismo edificio.

Es digno señalar en este sentido cómo, al cambiarse los procesos de producción, una viga de este tipo aparece ahora como un elemento mucho más complicado de fabricar que en la época del proyecto de Fisac, a primeros de la década de 1960, donde se contaba con más mano de obra para la ejecución de encofrados complejos. La posición relativa entre vigas estudiada por Fisac, estaba pensada tanto para la evacuación del agua de lluvia, como para iluminación de cubierta, con efecto “dientes de sierra” para iluminación cenital.

Figura 2.35. Posición relativa y molde para las vigas pretesas de 24 m. Centro de estudios hidrográficos-Madrid. Reproducida de Montaner, J., et al (1997).

También son destacables las soluciones con vigas canalón, como por ejemplo los edificios construidos en **1963** con vigas canalón (V) de 20,70 m para Talgo en Aravaca con proyecto de J.A. Fernández Ordóñez, y también las vigas canalón de 23,15 m, del proyecto de Estambrera Riojana en Logroño de **1965**, de Rubén Sampedro y Rafael Romero. Las vigas tienen diferente canto de alas (1,90 y 1,60 m) para conformar una cubierta en diente de sierra.

Figura 2.36. Cubierta cocheras Talgo en Aravaca, **1963** (izq.) y sección de viga de Estambrera Riojana, **1965** (dcha.). Reproducidas de ATEP (1970).

En la misma publicación se destacan las cubiertas tipo “cabaña”, como la de los almacenes Fertibería en **1964-1965**, en Grao – Castellón de la Plana y Punta del Sebo – Huelva, con vigas de 27,20m, con proyecto de Ramón Arguelles de Ideam, S.A.

Figura 2.37. Cubiertas almacenes Fertiberia, **1964-1965**. Reproducidas de ATEP (1970).

De gran interés es destacar aquí el proyecto realizado por Rafael Romero y José María Sáenz Benito para Intelhorce en Málaga en **1965**, con vigas en cajón formadas por la unión de dos vigas prefabricadas en obra de 70 t y 30,00 m de longitud.

Figura 2.38. Cubierta Intelhorce. **1965**. Reproducida de ATEP (1970).

También las soluciones de cerchas, como el proyecto de la cubierta del cuartel de San Lamberto en Zaragoza en **1965**, para unas luces máximas de 21,78 m y un canto central de 1,31 m.

Figura 2.39. Cerchas de cubierta cuartel San Lamberto en Zaragoza. **1965**.
Reproducida de ATEP (1970).

Como muestra del desarrollo del “sistema Barredo” de pretensar, podemos mostrar la impresionante terraza volada del Chalet Barredo en Madrid de **1966**, con un proyecto de F. Cassinello y R. Barredo. Con vigas de sección Y, formadas por dovelas prefabricadas en obra y de longitud total de 27,00m, de los cuales 15,00 m son en voladizo. Un dibujo de esté impresionante voladizo será la imagen de portada de la revista Hormigón pretensado, ATEP, 1970.

Figura 2.40. Terraza volada en chalet Barredo en San Fernando de Henares en **1966**. Reproducidas de ATEP (1970).

Jurado, J., 1996, también presenta las realizaciones de Fernando Higuera con piezas lineales prefabricadas, con nudos simplemente apoyados y un equilibrio global a través de voladizos. El uso del pretensado, la facilidad de montaje y los buenos acabados superficiales de las piezas de molde, destacan en toda su expresión en estas realizaciones singulares. Los ejemplos de la Casa Lucio Muñoz en Torrelodones (1963) en dos niveles y La Casa la Macarrona en Somosaguas (1971), esta última con empleo de vigas de 20,55 m y 72 cm de canto.

Figura 2.41. Casa Lucio de Fernando Higuera. **1963**. Reproducida de Jurado, J. (1996) y Fernandohiguera.org/casa-lucio.

Figura 2.42. Casa la Macarrona de Fernando Higuera. **1971**. Reproducida de Jurado, J. (1996) y Fernandohiguera.org/casa-la-macarrona.

En el artículo de la AEHP (1962), sobre prefabricación de paneles de hormigón pretensado para la construcción de forjados de piso o de cubierta, podemos ver las que se conocen en la actualidad como placas alveolares.

Figura 2.43. Paneles alveolares para forjados de piso. **Anterior a 1962.**

Reproducida de AEHP (1962).

La idea de las placas alveolares será precursora de los elementos lineales alveolares o correas tubulares, que predominan en la actualidad en la mayoría de los edificios industriales de cubierta ligera y que son objeto de esta tesis.

Las piezas con sección en TT (Pi), utilizadas en las plantas y cubiertas de aparcamiento, en diferentes obras como el Aparcamiento de la Plaza de España de Madrid, se cuentan con detalle en Calavera, J., et al (1970).

Figura 2.44. Aparcamiento Plaza de España de Madrid. **Anterior a 1970.**

Tomada de Calavera, J. et al., (1970).

Como resumen de esta década, podemos decir que vemos que la prefabricación hasta 1970, realizaba muchas de sus realizaciones de vigas pretensadas en parques de **prefabricación a pie de obra**, a lo que algunos autores como J. A. Fernández Ordóñez llamarán “premoldeo”.

Figura 2.45. Vigas postesadas a pie de obra. Puente río Fluvia en Olot en **1967**.
Reproducidas de ATEP (1970).

Hasta esta década vemos que es mayoritaria la **prefabricación por dovelas**, piezas de una longitud habitual entre 1,00 y 1,20 m, como por ejemplo en estas dovelas de doble T disimétrica de canto 1,15 m y 1,00 m de anchura de ala, para la carretera elevada de Caldetas en Barcelona en **1967**, primera carretera elevada en España en un tramo de 600 m.

Figura 2.46. Vigas prefabricadas por dovelas en carretera elevada de Caldetas – Barcelona. **1967**. Reproducidas de ATEP (1970).

En lo referente **al montaje** y colocación en obra, vemos realizaciones de vigas de gran envergadura montadas con auto-grúas o grúas móviles, como en la cubierta de Fertiberia (tipo cabaña) en **1965** a la derecha en la Figura 2.47.

Figura 2.47. Montaje de estructuras prefabricadas con grúas móviles. Reproducidas de ATEP (1970).

Otros montajes de vigas con torres de elevación, como en el caso de la cubierta de la factoría Sniace en Torrelavega, con vigas de 22,00m (1), la cubierta de las cocheras de trenes Talgo en Aravaca en **1963**, con un proyecto de José Antonio Fernández Ordóñez, donde la elevación de las vigas se produce con torres desmontables de elevación tipo 'Soto'(2), o la cubierta de Intelhorce en Málaga en **1962-1965**, en un proyecto de Rafael Romero y José María Sáenz Benito (3) , que vemos en la Figura 2.48:

Figura 2.48. Montaje de estructuras prefabricadas con torres de elevación. De arriba abajo e izquierda a derecha (1), (2) y (3). Reproducidas de ATEP (1970).

En la publicación *Hormigón pretensado: Realizaciones españolas mayo 1970*, (1970), se dedica un apartado entero al desarrollo de los proyectos con armaduras pretensas, que supone poner, negro sobre blanco, el cambio de tendencia que ya vemos en las realizaciones que se van produciendo a partir de 1960; por la aparición de cada vez más instalaciones fijas de prefabricación, la necesidad de construir cada vez más rápido y el aumento de costes de la mano de obra y de la madera. Hasta los finales de esta década no se había extendido la prefabricación en instalaciones fijas, cuyo uso se limitaba a la fabricación de

viguetas armadas y pretensadas, que ya estuvieron en el arranque de la prefabricación en España con viguetas para forjados desde la década de 1940.

Vemos la construcción de postes, forjados, puentes, tuberías, graderíos, lamas de fachada y con un importante apartado dedicado a las cubiertas y naves industriales, destacando las realizaciones con cerchas de celosía, vigas de alma llena (peraltadas), vigas tubulares, placas nervadas y láminas en hiperboloide. Las luces habituales de vigas alcanzan hasta los 25,00 m y se reseña que es todavía escasa la prefabricación de fachadas.

Figura 2.49. Realizaciones de cubiertas en hormigón con cerchas de celosía, vigas de alma llena y láminas en hiperboloide. **Décadas 1950-1960 y década 1960-1970.** Reproducidas de ATEP (1970) de CAMARA, CADE, ALBAJAR Y CIDESA.

Estamos atentos a los cambios que se irán produciendo, que veremos se encaminan hacia las vigas pretensadas con armaduras pretesas, prefabricadas en instalaciones o fábricas fijas y trasladadas posteriormente en transporte por carretera a obra para el montaje con grúas móviles.

En esta época, no encontramos bibliografía de obras en España con empleo de paneles prefabricados de hormigón en fachadas, no así fuera de España, donde la bibliografía señala múltiples ejemplos, como nos muestra el GATZ, K. 1968.

Dentro de otras soluciones en esta época de 1960-1970 encontramos, a nivel nacional:

Ejemplos de construcción “in situ” en obra sobre cimbra, como el edificio Trema en Madrid, de **1964** con Proyecto del forjado de Vicente Cudós y Luis Blanco Soler, con vigas de 33,00 m en sección doble T de canto 1,65 m.

Figura 2.50. Edificio Trema, Madrid **1964**. Vigas construidas in situ sobre cimbra. Reproducidas de ATEP (1970).

Como vemos en Hormigón pretensado: Realizaciones españolas mayo 1970, se da cabida a otras aplicaciones del pretensado en estructuras de una belleza y originalidad excepcional, tales como el proyecto de Frontón Jai-Alai en Guernica de **1962**, con un proyecto de Secundino Zuazo, Javier Zuazo y Luis Angula Prota el cual, junto al famoso Frontón de Recoletos (construido antes de 1936 por Eduardo Torroja), es el mayor frontón de España. La cubierta cuenta con vigas de sección en T, hormigonadas in situ y postesadas.

Figura 2.51. Frontón Jai-Alai en Guernica, **1962**. Reproducida de ATEP (1970).

Dentro de las cubiertas de grandes luces, destacan las estructuras laminares como bien muestran Jurado, J., 1996; Cassinello, P., 2013, y Sánchez del Río, I., 1977, en La propuesta que hace Ildelfonso Sanchez del Rio para la cubierta del Palacio de los Deportes de Oviedo en **1962**, resuelta con tres bóvedas parabólicas compuestas por arcos-onda biarticulados de hasta 100 m de luz y 7 m de ancho. Los arcos se dividen en dovelas prefabricadas a pie de obra de 3,20 m de largo, y aligeradas con piezas cerámicas.

Figura 2.52. Palacio de los deportes de Oviedo. **1962**. Reproducidas de Sánchez del Río, I., (1977), Jurado, J., (1996) y Cassinello, P., (2013).

También destacan las soluciones como la cubierta colgante pretensada, como la proyectada para el picadero cubierto para la Sociedad Hípica del Club de Campo, por José Antonio Domínguez Salazar Ingeniero y Carlos Fernández Casado en **1968**, con una planta rectangular de 70 X 40 m², cuya forma es de funicular de carga permanente con flecha creciente del centro a los extremos (desde 2,60 a 3,00 m) para obtener un desagüe natural. Esta obra se encuentra también referenciada en ATEP, 1970 y Fernández Casado, C., 1970.

Figura 2.53. Picadero Club de Campo, **1968**. Tomadas de ATEP (1970).

Destacar a nivel bibliográfico, el impresionante trabajo de documentación desarrollado en Fernández Casado, C., 2005; La Arquitectura del Ingeniero. Mostrando grandes naves, dientes de sierra laminares y hangares de Nervi.

Como resumen del final década de los 60 y arranque de los 70, en Vilagut, F., 1975, encontramos varias propuestas para resolver estructuras de luces medias, piezas de sección en T (preferible en hormigón armado) o doble T (preferible en hormigón pretensado), y para grandes luces soluciones de hormigón armado y pretensado de arcos, cerchas de celosía, vigas de alma calada (montantes y diagonales), vigas tipo Vierendeel (celosía ortogonal).

Figura 2.54. Realizaciones con cerchas, viga de alma calada, cubierta en arco y lucernario, vigas Vierendeel. **Anteriores a 1975.** Reproducidas de Vilagut, F. (1975).

Respecto a proyectos internacionales en esta década (1960-1970), incluimos algunas muestras de lo publicado:

En la década de los 60 encontramos en una de las publicaciones míticas de la prefabricación en Europa, el Koncz, T., 1968, esta prodigiosa celosía

parabólica formada por elementos sueltos para resolver una luz de 61,00 m, con sistema postesado en cordón inferior y superior, y separación de jácenas de 12,50 m. También la celosía pretensada de cordones paralelos fabricada por L. Rostan, e instalada en Metzingen, hormigonadas en una sola pieza de 32,30 m, reseñada como la más larga conocida de este estilo en la época.

Figura 2.55. Celosía parabólica formada por elementos sueltos en Yugoslavia.
Anterior a 1968. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Figura 2.56. Celosía pretensada de cordones paralelos fabricada por L. Rostan, e instalada en Metzingen. Hormigonadas en una sola pieza de 32,30 m, siendo las más largas conocidas de este estilo en la época. **Anterior a 1968.**
Reproducida de Koncz, T. (1968).

También destacan los elementos en T, proyectados para el aeropuerto de Phoenix (Arizona), proyectado por T.Y.Lin.

Figura 2.57. Edificios aeropuerto de Phoenix (Arizona), con elementos en T.

Longitud total 45 m, con vuelos por los dos extremos. **Anterior a 1968.**

Reproducida de Koncz, T. (1968).

Vemos en publicaciones como en Goffin, G.R. (1963), cables con una trayectoria variable conseguida con desviadores en piezas largas de más de 8,0 m en vigas doble T, por reducción de peso y para economizar las piezas. La posición de los cables se mantiene fijándolos en las extremidades y en el centro (Figura 2.58).

Figura 2.58. Trazado curvo de cables de pretensado. **Anterior a 1963.**

Reproducida de Goffin, G.R. (1963).

Encontramos en Payá, M., (1968), ejemplos de movimiento de grandes piezas prefabricadas con puentes grúa en instalaciones fijas fuera de España, en la figura 2.59 vigas peraltadas para la ejecución de cubiertas.

Figura 2.59. Movimiento de grandes cargas en taller. Reproducida de Payá, M., (1968).

Como referencias del extranjero en esta época, encontramos en Bryan, R.H. (1964), bibliografía sobre construcción de edificios en altura con soluciones prefabricadas de hormigón pretensado, como las 15 plantas del “Capp Towers Motor Hotel” de Minneapolis abierto en 1963, y cuya construcción se realizó con losas de forjado prefabricadas y pretensadas.

Figura 2.60. Edificio Capp Towers Motor Hotel. Construcción y colocación de losas prefabricadas. **1963**. Reproducida de Bryan, R.H. (1964).

También en FIP 1970, podemos ver que las tendencias europeas dan una importancia creciente a los moldes en los sistemas de producción de piezas pretensadas, con una evolución hacia moldes reforzados con estructura metálica, y con sistemas de apertura y cierre cada vez más mecánicos.

Figura 2.61. Moldes metálicos de base reforzada para anclaje de armaduras. Dispositivos de apertura y retirada. **Anterior a 1970**. Reproducida de FIP, 1970.

En lo que respecta a las fachadas fuera de España encontramos en Gatz, K., 1968, numerosos ejemplos de paneles prefabricados de hormigón para la construcción de fachadas de edificios. En lo referente a edificios industriales destacan los ejemplos del edificio almacén Pott-Rum en Rinteln con paneles aislados de 7,42 m x 1,34 m y de 18 cm de espesor, y la central telefónica del Oeste en Amsterdam, con piezas especiales de sección en C, macizas o con acristalamiento y marquesina postiza instalada a posteriori.

Figura 2.62. Detalle y foto de fachada de los paneles del almacén Pott-Rum (izq.) y detalle de piezas de fachada en C, para la central telefónica del Oeste en Amsterdam. **Anterior a 1968.** Reproducidas de Gatz, K., 1968.

2.2.1.4 Década 1970-1980.

Podemos decir que es la gran década de los cambios que se mantendrán hasta la actualidad, y que arranca con algunas soluciones de gran importancia en la década anterior, como las realizaciones impulsadas por Miguel Fisac con las “vigas hueso”, como el Colegio de la Asunción en Madrid en **1969**, las fábricas de curtidos en Montmelo y Vich en **1970**, y las Bodegas para Garvey S.A en Jerez de la Frontera y su estudio-taller en **1971**. Ya vimos que estas soluciones habían sido altamente innovadoras, al escapar de las construcciones en granito habituales en los edificios oficiales, como el Centro de estudios hidrográfico del CEDEX en 1963. Siguen aportando un gran valor arquitectónico con hormigón visto, formas singulares de gran valor ingenieril y estético, y proponiendo una piel estructural y arquitectónica con muros de hormigón con encofrados de madera.

Figura 2.63. Fábrica de curtidos en Montmelo (arriba) y de Colomer Munmani en Vich (abajo), **1970**, con vigas ‘hueso’. Reproducidas de ATEP.

Figura 2.64. Estudio-taller de M. Fisac (superior izquierda) y Bodegas Garvey, **1971**, con vigas 'hueso'. Reproducida de ATEP (1974).

Destacar a nivel bibliográfico, el magnífico trabajo de documentación sobre la obra de Fisac realizado en Fundación COAM., 2007; Miguel Fisac. Huesos Varios.

También en el cambio de década se van imponiendo las secciones doble T de vigas y jácenas, y las secciones TT de vigas y placas, tanto en edificación como en obra civil.

Esta se configura como una década clave en el desarrollo de los sistemas de transporte y montaje, según se encuentra en CADE, 1972, con una colección de puentes prefabricados, en la que pueden verse buenas muestras de cómo se planteaban los transportes por carretera y los montajes con grúas móviles.

Figura 2.65. Transporte de viga I-90 de 18 m. Autopista Villalba – Villacastín y Elevación de viga de 26 m para estación Norte en Vilanova. Montaje sobre camión en fábrica para transporte. CADE. **Anterior a 1972**. Reproducidas de CADE (1972).

Figura 2.66. Transporte en Dolly y montaje de vigas I-110, en el enlace de Molins de Rey y montaje de vigas I-110 en el Puente de Puigreig sobre el río Llobregat. CADE. **Anterior a 1972.** Reproducidas de CADE (1972).

Igualmente, también se ve con un futuro prometedor las piezas de sección TT, por el variado ámbito de uso y posiciones de funcionamiento. En horizontal para forjados y cubiertas, en vertical para formar fachadas, soportar apoyos de cubiertas y contención de tierras como señalaba Calavera et al., 1999. En la figura 2.67 podemos ver cómo se analizaba con pruebas y ensayos el comportamiento de las vigas TT.

Figura 2.67. Ensayo a esfuerzo cortante de vigas TT-100 en los Laboratorios de INTEMAC. **Anterior a 1972.** Reproducida de CADE (1972).

En lo referente a la tipificación del producto, dentro del manual de ATEP de Hormigón pretensado: realizaciones españolas de mayo de 1974, se encuentran varios ejemplos de empresas de prefabricados de hormigón que muestran su catálogo de soluciones para puentes, en los que ya puede intuirse la tendencia con la hegemonía de las secciones en doble T en las vigas principales:

PACADAR que define su actividad industrial como *“prefabricación en factoría fija, con procesos totalmente estandarizados y con un producto tipificado y catalogado”*.

Tipo	Esquema	Canto (cm)	Peso viga (kg/m)	Luz mín. Luz máx. (m)	n.º de tableros (4570-4870)
Búfalo		150+25	790	22-35	10
Rabeco		102+25	390	17-23	42
Reno		72+25	240	13-18	197
Gamo		60+25	136	10-14	302
Ciervo		50+25	84	8-12	60
P. Delfin		40+25	76	7-10	247
Alce		28+20	58	6-9	93

Figura 2.68. Esquema, rangos de uso y realizaciones de tableros de puente con secciones doble T, de PACADAR. **Anterior a 1974.** Reproducida de ATEP, 1974.

CADE, que nos cuenta que sus fábricas tienen bancos de pretensado preparados para una prefabricación industrial, instalaciones fijas de hormigón capaces de garantizar la calidad que el hormigón pretensado requiere, calderas de vapor necesarias para obtener resistencias elevadas en pocas horas, y todos los medios necesarios para la prefabricación en taller de piezas pesadas para puentes. En su catálogo distinguen tres series: serie I con 229 realizaciones, serie T-150 con 60 realizaciones y serie TT con 23 realizaciones.

VIGAS PUENTE SERIE I

SECCION SIMPLE

CUADRO DE CARACTERISTICAS

PERFIL I BxH	SECCION (cm ²)	PESO (Kg/ml.)
I 40x35	779	195
I 55x50	1.285	321
I 70x65	1.863	466
I 90x80	2.907	727
I 110x100	4.273	1.068
I 110x125	4.648	1.162

TABLERO I
vigas juntas

CUADRO DE UTILIZACION
Luz de cálculo en metros

[illegible]

TABLERO II
vigas separadas

CUADRO DE UTILIZACION
Luz de cálculo en metros

ΣB×H	Lc									
	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
I 40×35	•	•	•							
I 55×50				•	•	•				
I 70×65					•	•	•	•		
I 90×80						•	•	•	•	
I 110×100							•	•	•	•
I 110×125								•	•	•

VIGAS PUENTE SERIE TT

SECCION SIMPLE

CUADRO DE CARACTERISTICAS

PERFIL TT 250xH	b(cm.)				PESOS(Kg.)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
TT 250x50	2'4"	2'12"	18'2"	15'2"	968	902	836	970
TT 250x60	2'3"	20'4"	17'4"	14'4"	1.087	1.006	925	844
TT 250x75	2'2"	19'2"	16'2"	13'2"	1.258	1.154	1.051	947
TT 250x90	2'1"	18'0"	15'0"	12'0"	1.420	1.294	1.168	1.042

TABLERO I - 15 cm de losa

CUADRO DE UTILIZACION Luz de cálculo en metros

[illegible]

TABLERO II- 20cm de losa

CUADRO DE UTILIZACION Luz de cálculo en metros

[illegible]

VIGAS PUENTE SERIE T-150

SECCION SIMPLE

CUADRO DE CARACTERISTICAS

SERIE T.150 Bx150	SECCION (cm²)	PESO (Kg/ml.)
T100x150	4.190,25	1.045
T120x150	4.314,25	1.079
T140x150	4.438,25	1.109
T160x150	4.558,25	1.140
T180x150	4.678,25	1.170
T200x150	4.798,25	1.198

TABLEROI

CUADRO DE UTILIZACION (15cm de losa)
Luz de cálculo en metros

[illegible]

TABLERO II
20 cm. de losa

CUADRO DE UTILIZACION (20cm de losa)
Luz de cálculo en metros

[illegible]

Figura 2.69. Viga serie I en fábrica. Tipificación de uso de vigas I, T-150 y TT, de CADE. **Anterior a 1974.** Reproducida de ATEP, 1974.

ALVISA nos dice que las ventajas universalmente reconocidas a la prefabricación, tales como aumento de rapidez en la ejecución de la obra, incremento de la seguridad como consecuencia de una homogeneidad y un control mayor de los productos, y economía con relación a la obra realizada por métodos tradicionales, pueden aplicarse, con mayor razón, a los tableros de puentes. “Realizamos la prefabricación de vigas pretensadas con armaduras pretesas, fabricando una serie homogénea de diferentes tipos de secciones, de los que facilitamos a continuación, resumidos en un cuadro, los datos más característicos, incluyendo las series P, PL y N, esta más potente y que tuvo su razón de ser con la puesta en vigor del nuevo tren de cargas de febrero de 1972”.

Figura 2.70. Tipificación de uso de vigas P, PL y N, de ALVISA. **Anterior a 1974.** Reproducida de ATEP, 1974.

Se aporta un dato que será relevante en nuestro estudio, que es la importancia de tener un orden de magnitud manejando las esbelteces, en concreto se señala que para este tipo de tableros, están entre $1/14$ y $1/22$.

Figura 2.71. Transporte de grandes vigas serie N, de ALVISA. **Anterior a 1974.**
Reproducida de ATEP, 1974.

A raíz de las publicaciones consultadas, destacan especialmente dos edificios industriales prefabricados como los precursores de las actuales construcciones industriales. Por un lado la nueva factoría de Michelin en Valladolid de **1972**, de la que encontramos un interesante artículo de Del Campo, F., 1973, autor del proyecto, que nos muestra cómo se vivía en esos años la prefabricación de edificios industriales de cubiertas ligeras.

Se habla de prefabricación in situ de las vigas pretensadas de hasta 25,00 m, que puede resultar una paradoja en los términos, pero que nos habla de prefabricación en taller a pie de obra con 2 bancos de 66 m con anclajes para una capacidad de 500 t y uno de 55 m con capacidad de 100 t (otros autores como Fernández Ordóñez, J.A. definirá esta ejecución como “premoldeo”). Las mallas oscilan entre 18 x 12 m y 22 x 15 m. Se acondicionó también una instalación de curado al vapor, un taller de ferralla y una central de hormigonado.

Los moldes o encofrados, dado el número de puestas previsto se hicieron metálicos, con chapa plegada y rigidizadores, en piezas de 4 m para facilitar su manejo. El anuncio de la obra ejecutada por Construcciones Bigar, en la revista

Hormigón y Acero N° 107-108, en 1973, una gran muestra en España, junto con el almacén de El Corte Inglés de Valdemoro, de este tipo de edificios industriales, y, un hito que ha sido referencia en este tipo de construcciones.

Figura 2.72. Nueva factoría Michelin en Valladolid, 1972. Montaje, croquis de tipología de vigas y viguetas y anuncio de la obra. Reproducida de ATEP (1974), Del Campo, F. (1973) y Hormigón y Acero n° 107-108.

Este es uno de los grandes hitos de cubiertas de edificios industriales de los que se nos ha dejado legado escrito, dónde vemos la importancia del plazo de ejecución como determinante y donde exceptuando la prefabricación en taller, destacan cuestiones precursoras del estado actual de la prefabricación industrial:

- Vigas prefabricadas pretensadas para salvar grandes luces.
- Construcción de gran superficie (62.000 m²).
- Predominio de las secciones en doble T.
- Uso de bancos de pretensado.
- Moldes metálicos.
- Armaduras pretesas.
- La importancia del plazo: fabricación estimada de 500 m²/día.
- Montaje con autogrúas o grúa móvil sobre neumáticos.

La otra construcción industrial que queremos destacar es la estructura prefabricada de la nave almacén para El Corte Inglés de Valdemoro de **1973**, es una estructura isostática formada por cuatro elementos principales: pilar, jácena, viga canalón y correa. Fabricada y montada por PACADAR, con proyecto de Miguel Aguiló y J.A. Fernández Ordoñez. Las vigas principales son dobles T pretensadas de sección constante y luz 18,75 m, las pendientes se consiguen con diferente altura en los pilares. Los pilares también son de sección doble T, empotrados en cimentación. y con sección maciza en la cabeza para el apoyo de vigas.

La sección de las correas pretensadas es trapecial maciza, con algunas particularidades como son la ranura longitudinal corrida en la parte inferior para colgar instalaciones, la cara superior lleva una pendiente del 17% para apoyo de la cubrición, y un retallo lateral para anclaje de la cubierta. Su luz es de 9,35 m. La viga canalón pretensada con una capacidad de desagüe de tres veces el máximo aguacero conocido en la zona, y pensada para servir de pasillo de inspección para visitar la cubierta, y preparada con dos guías longitudinales para suspender dos líneas de instalaciones.

Destacar de ella varias cosas importantes, que serán las precursoras del modelo de prefabricación industrial actual:

- Todos los elementos de cubierta son pretensados.
- Armaduras pretesas.
- **Se fabrican en una instalación fija alejada de la obra** (La fábrica está a 40 Km).
- El transporte en camiones a la obra.
- Los elementos se montan con grúas móviles.
- El plazo: se fabrican y montan a razón de 1.000 m²/día, por lo que en el plazo de 1 año se montarán los 250.000 m².
- **El cerramiento es también prefabricado con paneles de hormigón armado.**

Figura 2.73. Nave almacén para El Corte Inglés, **1973**. Ejemplo de prefabricación total. Reproducida de ATEP (1974).

Figura 2.74. Detalles de jácenas, pilares, vigas canalones, correas y uniones de la nave almacén para El Corte Ingles, **1973**. Reproducida de ATEP (1974).

Debemos mencionar aquí otras realizaciones de la época que mantienen el mismo patrón que el que hemos visto con el almacén de Valdemoro, como las Naves del Polígono de las Mercedes en Madrid, y los supermercados Makro en Barajas y Barcelona, con elementos prefabricados del GRUPO CADE.

Figura 2.75. Naves en polígono Las Mercedes, Barajas (Madrid), **1972**. Vigas Doble T de luz 20 m y correas V macizas de 8,4 m. Ejemplo de prefabricación total. Reproducida de ATEP (1974).

Figura 2.76. Makro en Barajas y Barcelona, **1972**. Vigas doble T de 14 m, separadas 10 m. Ejemplo de prefabricación total incluyendo paneles de fachada. Reproducida de ATEP (1974).

Respecto a los cambios que se van produciendo en España en el ámbito del transporte y montaje, debido a la creciente prefabricación en instalaciones fijas, Fernández Ordóñez, J.A. (1974), en el tomo 2 de su Seminario de Prefabricación ya habla de transportar piezas largas en vehículo corto y plataforma unida (Dolly), con distancias frecuentes entre 200 y 300 km y cargas de hasta 40 t. Se reseña que la longitud máxima permitida en España en esa época eran 32,00 m con un permiso especial excepcional. Esta forma de transporte es actualmente la mayoritaria para piezas de gran longitud en España.

Figura 2.77. Esquema de Dolly de transporte de grandes piezas y camión cargado en fábrica para transporte de paneles prefabricados. **Anterior a 1974.**

Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).

Respecto al montaje y elevación de piezas Fernández Ordóñez, J.A., 1974, reseña el empleo de; grúas torre sobre carriles, grúas pórtico, grúas mástil, auto grúas sobre orugas y auto grúas sobre neumáticos, siendo esta última la que predomina en los montajes de edificios industriales en la actualidad.

Figura 2.78. Montaje de paneles en obra con una auto grúa y pórticos automotor sobre neumáticos para carga de piezas TT en fábrica. **Anterior a 1974.**

Reproducidas de Fernández Ordóñez, J.A. (1974).

Ya destaca que en el libro de Hormigón pretensado: Realizaciones españolas de mayo de 1978 de ATEP, se muestran 63 ejemplos de los cuales sólo 2 son de vigas prefabricadas para edificios industriales. También es relevante ver cómo se va produciendo ya el paso de la prefabricación en obra a la prefabricación en talleres permanentes. Vemos que de los 33 casos de tableros de puentes con vigas prefabricadas, 14 son fabricadas en obra y 19 en talleres permanentes. Hacemos estas reseñas, poniendo la precaución, de que lo publicado no tiene que coincidir necesariamente con lo construido por motivos varios, como los posibles cambios de líneas editoriales, las importantes cargas de trabajo que dificultan sacar tiempo para publicar, entre otros factores.

En Alvisa, 1978, encontramos la realización de las cubiertas de pistas de tenis del club Las Lomas-El Bosque (Madrid) en 1977, con 2 naves adosadas con

vigas peraltadas de sección doble T y con el alma aligerada por motivos estéticos. La estructura se compone de vigas principales de 25 m de luz, con correas y una altura libre de 7,00 m. La resistencia característica del hormigón era de 40 MPa, muy por encima de los hormigones de uso habitual en obras in situ en la época.

Figura 2.79. Club Las Lomas. Deltas de 25 m. **1977**. Reproducida de ATEP (1978).

Otros ejemplos de la época son el edificio para uso comercial en Fuenlabrada de naves adosadas con vigas peraltadas en cubierta de pendiente 10%. Una cuadrícula de 20 m (longitud de viga) por 10 m (longitud de correa). Esta nave cuenta con un forjado intermedio en cuadrícula 10 x 5 m. Las correas son viguetas pretensadas autorresistentes, separadas a un intereje de 1,10 m y con un hormigón de resistencia característica de 42,5 MPa

Figura 2.80. Edificio comercial en Fuenlabrada. Deltas de 20 m. **1975.**

Reproducida de ATEP (1978).

La nave industrial para Indas, S.A. en San Fernando de Henares, con cuatro naves adosadas con vigas peraltadas de sección doble T de 25,00 m de longitud, separación de pórticos de 6,70 m y una altura libre de 4,50 m, con un hormigón de 40 MPa.

Figura 2.81. Nave industrial INDAS, en San Fernando de Henares. **1977.**

Deltas (Vigas peraltadas) aligeradas por motivos estéticos, de canto variable de ALVISA de 100 m. Reproducida de ATEP (1978).

Dentro de otro rango de soluciones, encontramos en la década 1970-1980:

La cubierta pabellón del Ministerio de Agricultura con vigas TT cerradas en cajón (omegas invertidas), de 32,80 m y 2,60 m de canto.

Figura 2.82. Cubierta pabellón del Ministerio de Agricultura, **1973**. Reproducida de ATEP (1974).

Con el avance de la técnica del pretensado, se realizan cubiertas que, sin ser prefabricadas, son dignas de reseñar aquí por poner en contexto todos los avances, como la cubierta de la pista de hielo del Club de futbol Barcelona.

Figura 2.83. Cubierta pista de hielo del Club de Fútbol Barcelona en **1971**.
Reproducida de ATEP, 1974.

También el pabellón del INI en Barcelona.

Figura 2.84. Pabellón del INI en la Feria de Muestras de Barcelona en **1972**.
Reproducida de ATEP, 1974.

Contamos con algunos ejemplos de la empresa Rubiera, de soluciones con vigas Preflex, que reseñamos aquí a pesar de ser su uso preferente el de cubiertas pesadas o forjados:

La construcción del Banco de Bilbao en Palma de Mallorca, con un patio de operaciones con vigas Preflex (viga mixta) de canto limitado a 1,00m y una luz de 18,50 m, para grandes cargas y fabricadas en taller.

Figura 2.85. Banco Bilbao en Palma de Mallorca. **1975.** Vigas Preflex de Rubiera de 18,50 m de luz y canto 1,0 m. Reproducida de ATEP, 1978.

Con este mismo sistema se desarrolla el edificio colgado de Inmobiliaria Las Flores en el Paseo de la Castellana de Madrid, la cubierta de una piscina municipal en Madrid, la Banca López Quesada en la plaza de Neptuno de Madrid, con vigas Preflex que soportan grandes cargas de 12 t/m con vigas de canto 0,80 m, separadas 8,60 m y el tinglado del Puerto de Algeciras con vigas Preflex de 43,00 m de luz con apoyos rígidos sobre los pilares, y separadas 7,00 m, de canto total de viga 1,50 m:

Figura 2.86. Tinglado del Puerto de Algeciras. Vigas Preflex de Rubiera. **1976.** Reproducida de ATEP, 1978.

En lo que respecta a proyectos internacionales en esta década (1970-1980):

Encontramos las Placas curvas HP para cubiertas (sistema Silberkuhl), como las mostradas en la siguiente figura.

Figura 2.87. Realizaciones con Placas HP para cubiertas (sistema Silberkuhl).

Anteriores a 1975. Reproducidas de Vilagut, F. (1975).

También las naves prefabricadas desmontables de hormigón pretensado de sistema Guiraudie y Auffeve.

Figura 2.88. Estructura de naves prefabricadas desmontables de hormigón pretensado (Sistema Guiraudie y Auffeve). **Anteriores a 1975.** Reproducidas de Vilagut, F., 1975.

En Bender, R., 1976, en lo referente a paneles de fachada, vemos que la evolución nos ha llevado a la fabricación de los paneles en instalaciones fijas, con moldes de acero para garantizar la planeidad de las superficies sin defectos, moldes y mesas mecanizados, el acabado regleado y fratasado de la cara de llenado, con capas de aislante para mejorar sus propiedades térmicas, y el empleo de baterías verticales de fabricación para paneles de divisorias y tabiquerías donde se dejan embebidas las instalaciones y los marcos de los huecos de puertas y ventanas.

Figura 2.89. Fabricación de paneles en instalaciones fijas, acopio y transporte.

Anteriores a 1976. Reproducida de Bender, R., (1976).

2.2.1.5 A partir de 1980.

A partir de 1980, veremos en lo publicado cómo se mantienen los avances señalados en la época anterior. Se producirán algunas innovaciones en tipología específicas de vigas como las secciones en Y griega o las vigas tipo gaviota o en sección en V, pero seguirán siendo predominantes las secciones en T y especialmente las doble T, tanto de canto constante como variable.

Lleyda, J.L., 1988, nos presenta una nave para CASA, Construcciones Aeronáuticas en Getafe (Madrid). Se trata de un edificio industrial con unas dimensiones de ancho libre de 50,00 m, una longitud de 75,00 m y una altura libre bajo vigas principales de 15,00 m y un entreje de vigas de 9,00 m. La estructura se fabricó en las instalaciones fijas de ALVISA, a unos 50 km de la obra. La

estructura se resuelve con vigas de 50,00 m y sección doble T de canto 2,05 m, ancho de 1,53m y 95 t de peso.

El izado de estas vigas se realizó con dos grúas de 120 t. Los pilares eran prefabricados de sección 1,00 x 0,80 m y las correas de fabricación continua de canto 0,20 m, para aportar ligereza a la estructura y por economizar la solución. La cubierta tiene una configuración en dientes de sierra, que se forma con pequeños pilares de hormigón armado conectados sobre las vigas doble T. Los paneles de fachada se realizaron con piezas de 18,00 m de longitud y 2,00 m de ancho, aislados con 10 cm de arcilla expandida y con dos nervios de 50 cm, con un peso de 18 t.

La estructura es isostática, y se llegó a esta solución viéndose que se competía con las soluciones metálicas a efectos de plazo y coste, y que además se aportaba las ventajas propias de las estructuras prefabricadas de hormigón: rapidez de ejecución, bajo mantenimiento y protección al fuego. El plazo de montaje fue de 2 meses, a razón de 500 m²/semana, ejemplo de cómo aumenta el plazo y los tiempos de montaje en vigas de 50,00 m de luz.

Figura 2.90. CASA en Getafe. **Anteriores a 1988.** Reproducidas de Lleyda, J.L., 1988.

Figura 2.91. Paneles verticales nervados. Longitud de 17,60 m, y esbeltez de 1/35 en hormigón armado. CASA en Getafe. **Anteriores a 1988**. Reproducidas de Lleyda, J.L., 1988.

Atienza, J.R., 1989, en su artículo sobre el sistema estructural prefabricado para la construcción de naves porticadas de grandes dimensiones, nos presenta una estructura para el muelle de Levante del Puerto de Valencia. La estructura cubre una superficie de 45,00 x 135,00 m y 8,00 m de altura libre, con vuelos laterales de 2 m, sacados como aleros de los pilares.

El pórtico principal es biarticulado de 45,00 m de luz, a dos aguas y se conforma con con dos piezas laterales de pilar-dintel y una central de dintel de 30,00 m en sección doble T, y canto variable de 1,20 en cumbrera a 1,60 m en la unión del dintel con el pilar. Las tres piezas tienen pesos aproximados en el entorno de las 30 t, y las juntas se ensamblan por medio de juntas húmedas hormigonadas en obra. Los pórticos van articulados a la cimentación mediante rótulas metálicas.

Los pórticos van separados 15,00 m, lo que hace que las correas estén formadas por vigas doble T de canto 0,50 m. La separación de las mismas es de 5,00 m, lo que condicionará la cubrición de la chapa a colocar.

Dentro de otras soluciones para la resolución de cubiertas a partir de los años 80, encontramos algunas realizaciones que mostramos a continuación:

En el desarrollo de soluciones prefabricadas para cubiertas de grandes luces de edificios industriales, podemos destacar aquí el proyecto de los arquitectos Busquets i Grau y Farre Escofet, Fira de Barcelona, 1998 contado en ATEP-ACHE, 1998 y también en Mateos, J.J, 1997. En este proyecto se desarrolló un espacio de luz de 70 m sin pilares intermedios, conformado por vigas arco de hormigón armado y postesado. La sección tiene tres almas paralelas (una central y dos secundarias laterales más cortas) unidas con diafragmas, que se muestra en las figuras siguientes:

Figura 2.93. Vigas de 70 m para la Fira de Barcelona. **1997**. Reproducidas de Fira de Barcelona, (1998 y Mateos, J.J. (1997).

Esta sección da lugar a piezas de aproximadamente 500 t, con un peso medio estimado de 7,0 t/m ($3,4 \text{ m}^3/\text{m}$), muy alejados de las aproximadamente 63 t que puede pesar la viga más larga analizada en este estudio para 52,00 m de luz.

FASES PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Figura 2.94. Procedimiento constructivo de Vigas Fira de Barcelona. **1997.**

Reproducidas de Fira de Barcelona (1998) y Mateos, J.J. (1997).

También encontramos en los diferentes análisis de estructuras prefabricadas con nudos rígidos realizados por Burón, M. & et al., 2000 y Burón, M. & et al., 1995, el ejemplo del Centro Comercial Continente en Aluche-Madrid.

Figura 2.95. Perspectiva y fase de montaje de estructura prefabricada con nudos rígidos en edificios de varias plantas. Comercial Continente en Aluche-Madrid. **1992-1993**. Reproducida de Burón, M. & et al., 2000 y Burón, M. & et al., 1995.

Como resumen de esta época tenemos en Burón, M., 1995, en su artículo sobre el estado del arte en España de la prefabricación en edificación, y en Lleida, J.L., 1995, en el estado del arte en España de la prefabricación en obras civiles, un buen termómetro de diferentes realizaciones.

Figura 2.96. Paneles de fachada de sección nervada y paneles de fachada cara lisa. **Anterior a 1995**. Reproducida de Burón, M., 1995.

Figura 2.97. Nave industrial prefabricada. Sistema isostático. **Anterior a 1995.**
Reproducida de Burón, M., 1995.

Entre las grandes diferencias y particularidades de la obra pública, como nos muestra Lleida, están los montajes en zonas de difícil acceso y a gran altura, los montajes nocturnos, el uso habitual de transportes especiales para grandes dimensiones, y el uso de grúas de gran tonelaje 400-800 t.

Figura 2.98. Montaje de vigas artesas de 51 m, a 50 m de altura con grúas automóvil de 400 y 800 t. y montaje nocturno en la M-30 de Madrid. **Anterior a 1995.** Reproducida de Lleida, J.L., 1995.

Figura 2.99. Montaje de vigas artesas sobre pilas prefabricadas, auto grúa de 800 t , artesa de 25 m y sección de 6 m², y transporte de vigas de 40 m de longitud y 2 m de canto. **Anterior a 1995.** Reproducida de Lleida, J.L., 1995.

Para terminar, destacamos el resumen realizado por Mateu, J. (1996), donde nos presenta un dossier de productos, con **soluciones de cubiertas propuestas** desde diferentes empresas del sector de prefabricados, desde la cubierta ya comentada para los Almacenes del Corte Inglés en Valdemoro-Madrid con vigas doble T por PACADAR de la década de 1970 , el Sistema Integra de PREFABRICATS MATEU PLANAS, el sistema TTY del GRUPO PUJOL, la estructura TITANO y ONDAL de PRAINSA, la cubierta con vigas YPSILON y VARIANT de Hormipresa, vigas delta y placa TTT de TRUMES, cubierta GABIANO, y vigas FUTURA de PRETERSA-PRENAVISA.

Figura 2.100. Solución de cubierta a dos aguas de P.M.PLANAS y Sistema TTY de Pujol. **Anterior a 1996.** Reproducidas de Mateu, J. (1996).

Figura 2.101. Solución con vigas TITANO de PRAINSA (arriba) y Delta con placas TTT de TRUMES. **Anterior a 1996.** Reproducidas de Mateu, J. (1996).

Figura 2.102. Viga YPSILON y VARIANT de Hormipresa (izquierda arriba y derecha), Ondal de PRAINSA (derecha abajo). **Anterior a 1996.** Reproducidas de Mateu, J. (1996).

Figura 2.103. Sistema de vigas GABIANO y vigas FUTURA. Pretersa-Prenavisa. **Anterior a 1996.** Reproducidas de Mateu, J. (1996).

En lo referente a paneles de fachada Mateu, J. (1996) recoge el panel aligerado de CIRERA, panel GRC de PREINCO, panel de hormigón celular de EUROBLOQUE, el panel de losa pretensada de CASTELO, paneles lisos y nervados de TRUMES, los paneles de cerramiento autoportante y de hormigón chocado de SCHOKBETON, las fachadas mixtas de ESCOFET, los paneles armados y pretensados de DINESCON, los sistemas de anclaje de paneles CIMES de EUROCONT, los anclajes HTA y HZA y los sistemas de elevación y transporte de HALFEN-DEHA, las celosías autoportantes de INDAGSA, los elementos urbanos de ESCOFET, las persianas de lamas fijas de SAS, y los ventanales de hormigón de SADA.

Figura 2.104. Palacio Congreso y Exposiciones Santiago de Compostela. Alberto Noguero y Pilar Díez de Prefabricados CASTELO (izquierda) y paneles lisos y nervados (derecha) de TRUMES. **Anterior a 1996.** Reproducidas de Mateu, J. (1996).

Figura 2.105. Panel de hormigón chocado en Torre Mapfre en Barcelona de Iñigo Ortíz y Enrique León (arriba izq.) y panel con función estructural en Edificio Beatriz en Madrid del Arq. Eleuterio Población (arriba dcha.) fabricado por Schokbeton. Celosía autoportante en Pabellón Deportivo y Cultural en Moraleja de Enmedio-Madrid de los Arq. Fernando Espuelas y Pilar Alonso (abajo), fabricado por INDAGSA. **Anterior a 1996.** Reproducidas de Mateu, J. (1996).

Del documento de la FIP-ATEP, 1996 (FIP-1994), rescatamos un par de fotos significativas, de una construcción con vigas delta y gran altura libre y otra de montaje de paneles TT en fachada.

Figura 2.106. Montaje de cubierta de vigas delta en edificio industrial.
Reproducida de FIP-ATEP (1996).

Figura 2.107. Montaje de paneles nervados TT en fachada. **Anterior a 1996.**
Reproducida de FIP-ATEP (1996).

Burón, M., et al, 2001, en su artículo sobre las últimas realizaciones en España de estructuras de edificación con hormigón de alta resistencia y altas prestaciones, nos muestra algunos ejemplos de edificios industriales.

Figura 2.108. Soluciones de estructura de cubierta ligera en edificios industriales. **Anteriores a 2001.** Reproducida de Burón, M, et al. (2001).

Xercavins, E. et al., 2007, en su Construcción industrializada de centros escolares, plantea diferentes modelos con diferentes grados de prefabricación y empleo de materiales, con algunas soluciones totalmente prefabricadas de

hormigón y otras mixtas, destacando de la industrialización la calidad, el plazo, los residuos mínimos y las uniones de fácil ejecución en obra.

Figura 2.109. Soluciones prefabricadas de centros escolares. **Anteriores a 2007.** Reproducida de Xercavins, E, et al. (2007).

En el manual más reciente publicado en Europa sobre estructuras prefabricadas de hormigón, el FIB Bulletin 74 de 2014, encontramos algunos ejemplos de realizaciones que mostramos a continuación:

Figura 2.110. Diferentes realizaciones con vigas delta y jácenas I en Europa. Transporte y montaje de vigas delta de 52 m. en Salamanca (segunda fila derecha y tercera fila). **Anteriores a 2014.** Reproducidas de FIB Bulletin 74 (2014).

Figura 2.111. Otras tipologías de cubierta. Laminas, placas TT, vigas canal, Y o V. **Anteriores a 2014.** Reproducida de FIB Bulletin 74 (2014).

2.2.2 Evolución y comparativa.

Después de ver las realizaciones del apartado anterior, nos hacemos más conscientes de que si acotar el presente, pasado y futuro de cualquier actividad no es tarea sencilla, menos aún lo es cuando se trata de una actividad tan heterogénea como la prefabricación. Para poder acotar el trabajo, se consideró necesario marcar unos hitos de inicio y presente; se vio adecuado poner en relación dicho inicio con el nacimiento de la técnica del pretensado, cuando Freyssinet ensaya las primeras vigas pretensadas de hormigón prefabricado de gran longitud en Frankfurt y Stuttgart entre 1933 y 1936.

Para ayudarnos con los hitos temporales, y dada la relación de crecimiento paralelo que hemos visto que han llevado los avances del pretensado y la construcción de edificios industriales (hermano menor si se compara con los puentes por trascendencia social, humana y por orden de magnitud), resultaba muy difícil no remitirse al trabajo desarrollado por la ATEP, Asociación Técnica Española del Pretensado, fusionada en 1998 con GEHO, Grupo Español del Hormigón, para formar ACHE, la Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, que recientemente ha cambiado el nombre a Asociación Española de Ingeniería Estructural.

La ATEP ha realizado un magnífico trabajo reflejado en 8 tomos de Hormigón Pretensado: realizaciones españolas, los dos últimos ya bajo la denominación de ACHE, que abarcan un periodo desde 1953 hasta 2016. Esta documentación, junto a algunos artículos publicados en la revista Informes de la construcción (IETcc-CSIC) tales como la evolución del sector prefabricación en España presentado por Manuel Burón en 1995, o la revista Hormigón y Acero (ATEP-ACHE), con artículos sobre el estado del arte de la prefabricación en edificación Burón, M. et al, 1997, conforman un importante corpus de conocimiento sobre décadas de evolución de la prefabricación en España.

El planteamiento del trabajo es, por tanto, sencillo: hacer un análisis de cómo ha evolucionado la prefabricación a través de lo escrito en la **etapa entre 1953 y 1978, de la que encontramos amplia bibliografía**, y analizar el pasado más cercano y el presente con bases de datos de proyectos de elaboración propia, separando los datos por tipo de estructura y técnica constructiva. El año 1978 se ha adoptado como punto de inflexión porque se observa un cambio de tendencia en la forma de construir, y porque a partir de esta fecha se produce una drástica reducción en las publicaciones sobre prefabricación de estructuras para edificios industriales que dura, salvo excepciones, hasta la actualidad.

Esta reducción de publicaciones, especialmente entre 1980-2000, siendo una época con muchísimas construcciones en prefabricado y estando España entre los países que estaban a la cabeza de la prefabricación mundial, puede parecer paradójico, pero es que se trabajó, innovó y desarrolló tanto, que quedó poco tiempo para escribir. Tómense con prudencia las reflexiones sobre lo publicado, pues no necesariamente tienen que coincidir con todas las estructuras construidas, pero sí servirnos de referencia de modos y tendencias.

Como pasado cercano se ha designado la etapa de **1978 hasta 2008**, por dos motivos. El motivo técnico para la frontera de 2008 es la llegada del hormigón autocompactante y en España, aunque ya se utilizaba desde algunos años antes, como García, J.M. (2001) nos contaba en su artículo sobre hormigón autocompacto, dicho avance queda explicitado con la publicación de la Monografía M-13. Hormigón Autocompactante en 2008, año en que también se publica la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08). El otro motivo es el disponer de datos de un conjunto de proyectos con características comunes anteriores al del 2008, lo que anima a unificar en el presente los proyectos desde desde esa fecha.

El presente queda por tanto contenido entre **2008 y 2017**, con los datos recogidos en el trabajo de investigación de la presente tesis.

Hemos elaborado una base de datos con las obras mostradas en los ocho tomos de Hormigón pretensado: realizaciones españolas, que incluiremos en el Anexo IA: Tomo I (1970), Tomo II (1974), Tomo III (1978), Tomo IV (1990), Tomo V (1994), Tomo VI (1998), Tomo VII (2010) y Tomo VIII (2017).

Aprovechamos para aclarar aquí algunos de los términos que pueden resultar confusos respecto a la prefabricación: se denomina prefabricación en taller o fábrica, a aquella que se realiza en instalación fija, alejada de la obra; se distingue así de la que se realiza en talleres de obra, parques a pie de obra o aledaños de la obra, llamada por algunos autores “premoldeo”, como en Fernández Ordóñez, J.A., et al, 1974.

En la Tabla 2.5, puede apreciarse que la temática principal en las publicaciones han sido los puentes, con unos porcentajes entre el 56% y el 96% respecto a la edificación, que ha oscilado entre el 3% y el 29% de lo total publicado. Esto está justificado, por la importancia de las obras, orden de magnitud y porque es en los puentes donde al pretensado se le ha llevado a los límites, exprimiendo todas sus prestaciones.

Tabla 2.5. Tabla resumen de realizaciones Hormigón pretensado: realizaciones españolas 1953-2016.

Tomo	Edición	Periodo	Total estructuras	PUENTES %	EDIFICACIÓN %	OTRAS OBRAS %
Tomo I	1970	1953-1970	337	56,97%	21,07%	21,96%
Tomo II	1974	1969-1974	106	69,81%	16,98%	13,21%
Tomo III	1978	1974-1978	109	71,56%	12,84%	15,60%
Tomo IV	1990	1979-1990	86	88,37%	8,14%	3,49%
Tomo V	1994	1990-1993	28	96,43%	3,57%	0,00%
Tomo VI	1998	1994-1997	57	91,23%	8,77%	0,00%
Tomo VII	2010	1998-2008	143	83,92%	15,38%	0,70%
Tomo VIII	2017	2009-2016	152	65,79%	29,61%	4,61%

En la Tabla 2.6, se recoge el porcentaje de obras que llevan vigas prefabricadas en obra (VPO) o en taller (VPT), respecto al total de realizaciones de cada tipo (P-puentes / E-edificación), por lo que al 100% se llegaría añadiendo el porcentaje restante de otras tipologías tanto en puentes como en edificación.

Tabla 2.6. Tendencias de prefabricación en obra y en taller entre 1953 y 2016.

Tomo	Edición	Periodo	PUENTES	PVPO %	PVPT %	EDIFICACIÓN	EVPO %	EVPT %
Tomo I	1970	1953-1970	192	63,54%	4,17%	71	70,42%	0,00%
Tomo II	1974	1969-1974	74	27,03%	10,81%	18	27,78%	33,33%
Tomo III	1978	1974-1978	78	17,95%	24,36%	14	0,00%	35,71%
Tomo IV	1990	1979-1990	76	0,00%	15,79%	7	0,00%	28,57%
Tomo V	1994	1990-1993	27	0,00%	7,41%	1	0,00%	0,00%
Tomo VI	1998	1994-1997	52	0,00%	5,77%	5	0,00%	0,00%
Tomo VII	2010	1998-2008	120	0,00%	3,33%	22	0,00%	9,09%
Tomo VIII	2017	2009-2016	100	0,00%	5,00%	45	0,00%	2,22%

En la tabla 2.7, respecto a las estructuras ejecutadas con vigas pretensadas en puentes y edificación, puede verse cuántas se prefabricaron en taller y cuántas en obra en cada época.

Tabla 2.7. Vigas pretensadas en taller y en obra.

Tomo	Edición	Periodo	PUENTES VP	PVPO %	PVPT %	EDIFICACIÓN VP	EVPO %	EVPT %
Tomo I	1970	1953-1970	130	93,85%	6,15%	50	100,00%	0,00%
Tomo II	1974	1969-1974	28	71,43%	28,57%	11	45,45%	54,55%
Tomo III	1978	1974-1978	33	42,42%	57,58%	5	0,00%	100,00%
Tomo IV	1990	1979-1990	12	0,00%	100,00%	2	0,00%	100,00%
Tomo V	1994	1990-1993	2	0,00%	100,00%	0	-	-
Tomo VI	1998	1994-1997	3	0,00%	100,00%	0	-	-
Tomo VII	2010	1998-2008	4	0,00%	100,00%	2	0,00%	100,00%
Tomo VIII	2017	2009-2016	5	0,00%	100,00%	1	0,00%	100,00%

La documentación de los proyectos de referencia es reveladora de interesantes tendencias que dan cuenta de la evolución de la prefabricación, ligada, como se ha mencionado, al pretensado. Además, en las tablas 2.6 y 2.7 vemos como la prefabricación se va trasladando con los años a instalaciones fijas.

En el periodo 1953-1978 analizado, las publicaciones de Hormigón Pretensado: realizaciones españolas (Tomo I, II, III) muestran en los proyectos hasta 1970 el uso de elementos prefabricados en un gran número construcciones, que contienen elementos por dovelas prefabricadas en obra con moldes de madera, madera reforzada o metálicos. También se observa que la mayoría de las vigas se fabrican con armaduras postesas, destacando los sistemas Barredo y Freyssinet. En este periodo destacan las secciones doble T disimétricas de

canto variable, vigas T, vigas Y invertidas, vigas V, cerchas y arcos. El montaje descrito es de carriles y andamios, torres de elevación, torres “Soto” y grúas torre.

En las ediciones de ATEP 1974 y 1978 se perciben cambios importantes con la aparición de estructuras prefabricadas en instalaciones fijas (taller/fábrica) tales como GRUPO CADE, PACADAR y ALVISA, que se imponen a finales de la década de 1970. Esto posibilita también la proliferación de estructuras con armaduras pretesas. Las secciones empleadas siguen siendo muy variadas, con tendencia ya marcada hacia las secciones en doble T y con estructuras de gran valor estético con secciones huecas tipo hueso en múltiples obras de Fisac. Es ya habitual el montaje con grúas móviles y el transporte de piezas por carretera.

De esta época data una encuesta realizada por la FIP en varios países, resultado de la cual se obtuvo un croquis que indica que, en esa época, se veía en el futuro de la prefabricación un planteamiento de prefabricación total con pilares empotrados en cimentación, elementos TT en cubierta de hasta 25 m y elementos prefabricados de fachada. Dicha encuesta está recogida en Fernández Ordóñez, J.A., 1974, y podemos ver un croquis en la Figura 2.169.

En este periodo 1978-2008 las publicaciones de Hormigón Pretensado: realizaciones españolas (Tomo IV, V, VI, VII), apenas arrojan datos sobre la construcción de edificios con hormigón prefabricado, y tan solo se encuentran referencias sueltas en otras publicaciones, por lo que se recurrió a un listado de 207 estudios de proyectos de estructuras realizados por Prefabricados Castelo, una de las principales empresas del sector del prefabricado. Los estudios fueron llevados a cabo en torno al año 2006. En dicho listado se aprecia la tendencia general del sector, con todas las obras fabricadas en instalaciones fijas, todas las vigas pretensadas con armaduras pretesas, cobrando importancia el transporte por carretera con camiones, plataformas y vehículos de transporte especial. Las secciones predominantes son las vigas Delta o dobles T de canto variable y las Jácenas I o doble T de canto constante. Se presenta en el Anexo IB.

En esta etapa son especialmente valiosos los esfuerzos realizados por diferentes asociaciones e institutos, con distintas guías de diseño, por la aportación de literatura específica: IECA-ANDECE, 1996; FIP, 1996; Anfharg, 2007; ANDECE, 2008; ACHE E-10, 2004.

En la Tabla 2.8, puede verse cómo la prefabricación de edificios industriales se ha trasladado a fábricas con instalaciones fijas en su totalidad. Se han impuesto progresivamente las secciones en doble T, y la gran mayoría de edificios se resuelve con vigas delta o peraltadas y con jácenas I (doble T) de canto constante. Un aspecto muy destacable es el concepto de prefabricación total de los edificios, incluyendo pilares, vigas, correas y progresivamente los cerramientos de fachada mediante paneles sándwich y macizos, que arranca en la edición de ATEP, 1974, y que se mantiene hasta la actualidad, con un predominio de la “Prefabricación Abierta” de elementos.

Tabla 2.8. Análisis cualitativo. Comparativa de realizaciones en España en diferentes épocas.

Análisis de proyectos en España 1.953 - 1978									
	Lugar de prefabricación		Tipología vigas (ud)			Tipología de correas (ud)		Tipología de pilares (ud)	
Obras	Obra	Fábrica/ Taller	Jácena I (T/DT)	DELTA (DT-cv)	otros	Tubulares	Macizas/otras	Prefabricado	otros
66	55	11	14	13	39	0	66	7	59
100,00%	83,33%	16,67%	21,21%	19,70%	59,09%	0,00%	100,00%	10,61%	89,39%
Análisis de proyectos en España 2.006									
	Lugar de prefabricación		Tipología vigas (ud)			Tipología de correas (ud)		Tipología de pilares (ud)	
Obras	Obra	Fábrica/ Taller	Jácena I	DELTA	Jácena Y	Tubulares	Macizas	Prefabricado	otros
207	0	207	73	133	1	199	8	207	0
100,00%	0,00%	100,00%	35,27%	64,25%	0,48%	96,14%	3,86%	100,00%	0,00%

Por otro lado, en la Tabla 2.9, puede verse la evolución de las vigas, que han ido aumentando su longitud con los años, siendo habitualmente las vigas delta o dobles T de canto variable, de mayores luces que las jácenas I. Los valores medios están entre 12,00-50,00 m para vigas delta y entre 7,00-36,00 m para jácenas I. Es llamativa la evolución en la luz de las correas, que ha pasado de valores entre 1,00-10,00 m hasta los 4,40-12,40 m para correas tubulares, siendo este un valor clave, ya que rige la distribución de estos edificios. Los pilares pasan de 4,00-13,00 a 3,00-20,00 metros.

Tabla 2.9: Análisis cuantitativo. Comparativa de realizaciones en España en diferentes épocas.

Análisis de proyectos en España 1953-1978					
	Longitud vigas principales (m)		Longitud de correas (m)		Altura libre de pilares (m)
	D (DT cv) + I (DT) + otras		Tubular + macizas + otras		Pilar prefabricado
Media	19,72		4,59		8,24
Mediana	20,00		3,80		8,00
Moda	16,00		1,00		7,00
Mínimo	7,00		1,00		4,50
Máximo	34,00		10,00		13,00
Análisis de proyectos en España 2.006					
	Longitud vigas principales (m)		Longitud de correas (m)		Altura libre de pilares (m)
	D (DT cv)	I (DT)	Tubular	Maciza/otras	Pilar prefabricado
Media	24,64	15,56	9,15	14,78	8,54
Mediana	22,81	13,60	9,35	15,20	8,00
Moda	20,00	11,45	10,00	-	8,00
Mínimo	12,00	6,77	4,40	12,50	3,25
Máximo	50,00	36,00	12,50	16,80	20,05

A la vista de la comparativa podemos ver cómo el sector ha experimentado cierto cambio de tendencias, empezando por la longitud de vigas, con unos valores medios crecientes hasta el entorno de los 24,60 m para vigas deltas, y 15,00 m para las vigas I, y unas separaciones de pórticos o longitudes de correas, con unos valores medios de 9,00 m.

Respecto a los pilares, destaca especialmente el cambio que se ha producido en lo referente a su ejecución, donde hemos pasado de tener un 89% de pilares ejecutados en obra, a tener un **100% de soluciones de pilares prefabricados en instalaciones fijas**. La altura de pilares también ha ido creciendo hasta llegar a unos valores medios en el entorno de los 8,50 m de altura libre bajo viga principal.

Tómense estas reflexiones con prudencia, como un análisis de tendencias, obtenido de las muestras bibliográficas y de una base de datos propia.

2.3 Publicaciones precedentes.

En la búsqueda de publicaciones precedentes específicas sobre este tema de investigación, los resultados en publicaciones actuales han sido relativamente escasos. Se han encontrado trabajos que analizan la optimización de estructuras prefabricadas de hormigón, pero ninguno que investigue en concreto sobre la construcción de edificios industriales de planta única y grandes luces de cubierta. Los estudios encontrados en la bibliografía actual abordan el tema de la optimización de estructuras desde diferentes prismas.

Son muy destacables todas las comunicaciones, artículos y referencias encontradas en ACHE, Asociación Científico-Técnica del hormigón estructural. También destaca la FIP, Federación Internacional del Pretensado, que dio comienzo a sus actividades en 1951 impulsada por Eduardo Torroja entre otros, y el Comité Europeo del Hormigón (CEB), fusionados en la actualidad en la FIB, Fédération Internationale du Béton (The International Federation for Structural Concrete). Esta unión nació con el objetivo de superar la separación histórica entre hormigón armado y hormigón pretensado, con el concepto del hormigón estructural.

Las referencias encontradas nos han permitido vislumbrar las necesidades, y tener una referencia sobre los caminos de trabajo recorridos. Se han encontrado grandes reflexiones sobre el camino a seguir, como la realizada por Cabral, R. et al., 2014, donde nos indica que en un puente en construcción con vigas prefabricadas se han introducido una serie de mejoras y adaptaciones constructivas respecto a los construidos anteriormente. Estas adaptaciones han sido fruto de la experiencia en la ejecución de estos puentes, que ha permitido identificar aspectos que optimizan y facilitan su ejecución. Este guiño a la experiencia y a valorar lo aprendido en la ejecución de obras precedentes, nos resulta muy apropiado para tenerlo en cuenta en un proceso de modelos teóricos optimizados.

Tanto La Huerta, J.A., 1997, como Amat, J. et al, 1996, en su análisis de las bases de datos de materiales de construcción, en lo referente a prefabricados estructurales y a las fichas técnicas, ya nos hacen ver la importancia cada vez mayor de ordenar y estructurar los datos, dado al número de consultas cada vez mayor mediante búsquedas informáticas. Orden, estructura y adaptación de fichas a la normativa vigente, son de gran importancia para el uso riguroso en los proyectos constructivos.

Aunque en esta tesis estamos analizando aisladamente la optimización de la estructura, no debemos olvidar que la mejor opción es, como afirma Ching, F.D.K. et al. 2014, que sabiendo que el diseño estructural debe operar en un entorno de incertidumbre, ambigüedad y aproximación, esto supone la búsqueda de un sistema estructural que no sólo asuma los requisitos impuestos por las cargas, sino que también de respuesta al resto de aspectos arquitectónicos, urbanísticos y funcionales del proyecto. Esa visión será la que nos ofrezca sin duda una solución más acertada.

En esta labor de búsqueda, hemos encontrado múltiples hallazgos, que nos han ayudado en la estructura de la investigación, desde la importancia de la ordenación o cuadrícula básica estructural, la condición del orden de magnitud, hasta un factor que a veces se nos olvida y como nos señala David Mackay en el prólogo de *Un ingeniero imagina* de Rice, P. (1994); *“Si un ingeniero imagina, es porque él mismo se ha permitido encontrar tiempo para pensar”*.

Hemos analizado la historia de la prefabricación en España a nivel de realizaciones y análisis por épocas de lo publicado/ejecutado, para centrarnos ahora en las publicaciones precedentes, de las que incluiremos dos apartados; uno de publicaciones procedentes de organismos que englobará la normativa, guías de diseño y buenas prácticas, y otro con las investigaciones precedentes en tesis, artículos y ponencias de congresos. Esta última a su vez con dos apartados, uno de análisis de optimización en general, y otro específico de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales.

2.3.1 Normativa, guías de diseño y buenas prácticas.

La bibliografía general relativa a estructuras prefabricadas de hormigón es bastante extensa, pero a pesar de ello, solamente encontramos algunas referencias aisladas sobre la optimización de edificios industriales.

Al tratarse en esta tesis de proyectos desarrollados en España, hemos buscado a nivel global, pero potenciando los esfuerzos en los países de normativa y costumbres constructivas comparables, pues como indica Simón-Talero, J.M. et al., 2014, en un artículo sobre bases de diseño y tipologías de puentes en Canadá, para aportar optimizaciones es importante hacerlo desde el respeto y con un conocimiento profundo de las normativas, pues las soluciones óptimas dependen de múltiples factores y habrá que compararlas con las recomendaciones de la normativa local.

Como señalan desde ANDECE, a nivel de normativa aplicable, podemos dividirla en reglamentos a nivel de producto y a nivel de sistema constructivo (en nuestro caso, cubiertas ligeras).

El marcado CE es un requisito obligatorio para la comercialización de aquellos productos que componen la tipología estructural de cubiertas ligeras: pilares, vigas principales y correas, y nos indica que un producto es conforme con los requisitos esenciales de las directivas que le son de aplicación. Las normativas de referencia son la UNE-EN 13225 (2013) de Productos prefabricados de hormigón con elementos estructurales lineales y la UNE-EN 13369 (2013) de Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón.

En España, para las estructuras prefabricadas de hormigón, es de obligado cumplimiento la EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural, vigente desde diciembre de 2008. La instrucción es el marco reglamentario por el que se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón.

Uno de los grandes cambios que presenta la EHE-08 es la incorporación del Artículo 59.º, sobre las estructuras construidas con elementos prefabricados, definiendo requisitos particulares para estos productos en las etapas de cálculo, control y ejecución. Desde ANDECE se señala también que encontraremos el Anejo 12 dedicado a los forjados unidireccionales de viguetas y losas alveolares prefabricadas, y la posibilidad que da la normativa de que la empresa de prefabricados obtenga un distintivo de calidad oficialmente reconocido que le permita la aplicación de ciertas consideraciones especiales, como la reducción de los coeficientes parciales de seguridad del hormigón y el acero, con la consecuente mejora en la relación entre prestaciones mecánicas y materiales empleados.

Por otro lado, a nivel europeo se han desarrollado los Eurocódigos Estructurales, que son las normas que recogen los métodos comunes de cálculo y dimensionamientos de estructuras. Destacamos el UNE-EN 1992-1-1 (2010) Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación

El Código Técnico de la Edificación (CTE) representa el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, y es de obligado cumplimiento en las obras de edificación de nueva construcción en España. En el caso de los elementos prefabricados destinados a cubiertas, deben ser las soluciones o elementos constructivos de los que forman parte, los que deban cumplir en su conjunto los requisitos establecidos en el CTE.

Apreciamos el enorme esfuerzo realizado por ANDECE, la Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón en España, donde cabe destacar aquí sus boletines y guías técnicas, por su ayuda para hacer accesible el conocimiento entre todos los intervinientes en el desarrollo del proceso constructivo con estructuras prefabricadas.

Entre las guías de Andece cabe destacar:

- Andece (2019). Guías técnicas Andece. Estructuras prefabricadas de hormigón. Versión 1. Febrero 2019.
- Andece (2014), una Guía específica de marcado para productos prefabricados de hormigón: Elementos estructurales lineales.
- Andece (2014). Los productos prefabricados de hormigón en el nuevo reglamento europeo de productos de construcción.
- Andece (2013). Diccionario técnico específico prefabricados de hormigón. Inglés-Castellano.
- Andece (2012). Los prefabricados de hormigón en la EHE-08. Biblioteca de consultas. 3ª edición.
- Andece (2008). Prefabricados de hormigón: las 100 mejores razones para utilizarlo.

Otro apartado destacado es el que representan históricamente en España las asociaciones como IECA; Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, ATEP; Asociación Técnica Española del Pretensado, actualmente dentro de ACHE, y la FIP; Federación Internacional del Pretensado, en la actualidad dentro de la FIB (The International Federation for Structural Concrete).

2.3.1.1 Optimización en prefabricación industrial.

En la búsqueda de manuales editados en España, y en orden cronológico, destaca la guía editada con los esfuerzos y colaboración de **IECA y ANDECE**, que dieron a la luz el **Manual de edificación con prefabricados de hormigón para usos industriales, comerciales, aparcamientos y servicios, de 1996**, en el que se señalan los principales tipologías y elementos que componen una cubierta.

IECA-ANDECE, 1996, nos señala respecto a las cubiertas con pendiente:

- Vigas peraltadas, vigas de sección constante sobre pilares a diferente altura, y cubiertas en diente de sierra. Las define bajo las características de que permiten superficies más diáfanas, son las más ligeras (dentro del hormigón prefabricado) con un peso propio de 100-120 kg/m², la impermeabilización es sencilla, y están diseñadas para soportar su peso propio, la cubierta ligera, la nieve y viento, y algunas otras pequeñas cargas (tales como iluminación, instalaciones ligeras,...).
- Pueden resolverse con vigas peraltadas, de secciones más habituales la doble T, armadas o pretensadas y la U invertida (para grandes luces al tener mayor inercia transversal), con armaduras pretesas o postesas, para ensamblar en obra las dos mitades. Las pendientes varían del 8 al 12%.
- Vigas de sección constante, dando la inclinación con las vigas apoyadas a diferente altura sobre los pilares. Estas vigas, a igualdad de luces y cargas, resultan menos económicas que las peraltadas de canto variable, que ajustan mejor su sección a la ley de momentos. Se usan para diseño de pendientes diferentes a las deltas, y cuando queremos aumentar la luz libre sin aumentar la altura de la estructura.

Figura 2.112. Cubierta con vigas I de sección constante y cubierta con vigas delta o peraltadas. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996.

Respecto a las correas, se reproduce a continuación una figura con distintas tipologías de sección, que cubren luces desde los 5,00 hasta los 12,00 m. Las más habituales son las trapezoidales, T o doble T y tubulares.

Sección	Altura (cm)	Anchura (cm)	Longitud de uso (m)	Observaciones
Rectangular	20	10	5 - 6	Poco empleadas
En "T"	20	15	5 - 6	Poco empleadas
Trapezoidal	40 - 70	15 - 20	8 - 12	
En "I"	15 - 25	10 - 15	5 - 7	
Tubular	18 - 30	25 - 30	8 - 12	
Panel "TT"	20 - 30	100 - 200	8 - 12	Se colocan a tope. Pueden llevar huecos para eliminación.
Artesa	25 - 30	100 - 120	8 - 12	Se colocan alternas o adosadas

Figura 2.113. Tipología de correas. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996.

Respecto a los materiales de cubrición, que históricamente venían siendo en muchos casos prácticamente un forjado con placas, losas y capas de compresión, da aquí un giro y se nos presentan dos sistemas de cubiertas en función de que cuenten o no con aislamiento.

- Cubiertas sin aislamiento:
 - Placas onduladas de fibrocemento
 - Chapas grecadas de acero
- Cubiertas con aislamiento:
 - Panel sándwich metálico
 - Panel sándwich metálico conformado en obra

Figura 2.114. Detalles de cubrición de cubiertas. Reproducida de IECA-ANDECE., 1996.

Pueden verse en la siguiente figura, las tipologías de secciones de vigas I (la más habitual) y U invertida (de uso poco habitual). También las secciones de algunas soluciones especiales de vigas, tratadas aquí como elementos superficiales con sección en V o Y proyectados para dar el mayor desagüe con el menor canto posible, de 0,70 a 1,20 m, con anchos de 1,20 a 2,50 m y longitudes de hasta 30,00 m.

Figura 2.115. Secciones de vigas (izquierda) y secciones de vigas especiales para evacuación de agua (derecha). Reproducida de IECA-ANDECE, 1996.

En lo referente a los paneles de fachada, se señalan las ventajas que suponen por facilidad de montaje, con rendimientos de instalación o montaje de 500 m²/día, así como la gran cantidad de tipologías en cuanto a acabados exteriores y aislamientos posibles. Los paneles son clasificados de acuerdo a su geometría en lisos y nervados, y por sus opciones de composición y aislamiento en macizos, sándwich, y de aislamiento continuo (bicapa).

Figura 2.116. Tipología de paneles por geometría y por composición.

Reproducida de IECA-ANDECE, 1996.

Las características de los paneles pueden variar en función del fabricante, se da una tabla de los valores más habituales, con anchos estándar de 1,20, 2,40, y 2,50 m. El aislamiento acústico está en valores alrededor de los 50 dBA.

Tipo de panel	Espesor (cm)	Peso propio (kg/m ²)	Altura máxima (m)	Aislamiento térmico (kcal/h.m ² .°C)		Resistencia al fuego (minutos)	
				EPS (cm)	ARLITA (cm)	EPS	ARLITA
Nervado	12	270	12	-	1,44 (5)	-	120
	16	310	14	-	1,08 (9)	-	180
Liso	16	270	10	0,81 (6)	1,10 (10)	120	180
	20	~ 290	12	0,62 (10)	0,90 (14)	120	240
	24	310	14	0,53 (14)	0,77 (18)	120	240
Liso con aislamiento continuo	20	290	10	0,38 (8+2)	-	90	-
	24	310	12	0,31 (12+2)	-	120	-
	28	320	14	0,27 (16+2)	-	180	-

Figura 2.117. Valores habituales de características de paneles. Reproducida de

IECA-ANDECE, 1996.

Se aporta también una tabla de conductividad térmica de los materiales que forman los paneles prefabricados para fachadas de edificios industriales.

	Densidad kg/m ³	Conductividad	
		kcal/(hmK)	W/(mK)
Hormigón armado	2.400	1,40	1,63
Hormigón ligero (ARLITA)	550	0,10	0,12
Poliestireno expandido (EPS) según UNE 53.310-87			
Tipo I	10	0,038	0,044
Tipo II	12	0,036	0,042
Tipo III	15	0,039	0,037
Tipo IV	20	0,029	0,034
Tipo V	25	0,028	0,033

Figura 2.118. Valores habituales de conductividad térmica de diferentes materiales para la fabricación de paneles prefabricados. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996.

Por último, encontramos una interesante tabla de valores orientativos, de requisitos habituales para diferentes tipos de instalaciones de edificios industriales.

Tipo de instalación	Luz de la nave (m)	Separación entre pórticos (m)	Altura libre (m)	Sobrecargas de explotación (kp/m ²)		Capacidad de grúas (t)	
				Cubierta	Solera	Monocarriles	Puente
Industria ligera de alta tecnología	9 - 18	9 - 18	4	50	500 - 750	-	-
			6,5		1.200 - 1.500		
Industria ligera de baja tecnología	12 - 18	Función de la estructura de cubierta	6	50	750 ⁽¹⁾ 1.500 ⁽²⁾	2	Ligera
Producción y montaje por lotes	12 - 30	6 - 12	8	30	1.200 ⁽¹⁾ 2.500 ⁽²⁾	2	5
Producción y montaje en cadena	12 - 30	La mayor posible	6,5 - 10,5 ⁽¹⁾	50 - 120 ⁽³⁾	1.500 - 2.000 ⁽¹⁾	5	10
			9 - 14 ⁽²⁾		3.000 - 6.000 ⁽²⁾		
Industrias de proceso	12 - 30	Función del tipo de proceso	> 6	50 - 120 ⁽³⁾	1.500 - 2.000	-	-
Mecánica pesada	12 - 25	La mayor posible	≤ 6	50	1.500 - 3.000	5	> 30
		8 - 12	> 6				

Nota: Los valores recogidos en esta Tabla son orientativos, ya que la prefabricación admite cualquier dimensión.

(1) En procesos de producción
(2) En almacenes
(3) Debe preverse la posibilidad de situar equipos pesados en la cubierta

Figura 2.119. Valores orientativos de requisitos de edificios industriales según el tipo de instalación. Reproducida de IECA-ANDECE, 1996.

En la figura anterior podemos observar que, salvo algunas excepciones puntuales, las longitudes de vigas oscilan en el rango 12,00-30,00 m y la separación de pórticos o longitudes de correa entre 6,00-12,00 m, con alturas libres entre 6,00-10,50 m.

Del mismo año que el anterior, encontramos el **Manual de estructuras de edificación prefabricadas de la FIP, editado por ATEP 1996**. Este manual es la traducción del FIP, 1994: Planning and design handbook on precast building structures. El manual trata todos los aspectos relevantes en lo referente a las estructuras de edificación prefabricadas, desde la adecuación del hormigón prefabricado a la construcción, hasta los principios generales de diseño y los sistemas estructurales.

Se destaca en esta publicación que el sector ha pasado, poco a poco, de la manufactura a pie de obra a la industrialización, tal y como puede concluirse de las realizaciones recogidas en el anterior apartado de este trabajo, señalando tres motivos en el desarrollo de la construcción prefabricada:

- Los avances en las técnicas del pretensado permitiendo ir a mayores luces y elementos con pesos menores
- La necesidad de edificar viviendas rápidamente en Europa después de la Segunda Guerra Mundial
- Las nuevas técnicas de construcción con elementos alveolares.

Es reseñable la importancia de los planteamientos del apartado de diseño esquemático de la etapa inicial, donde se recomienda la participación de un ingeniero experto en prefabricación para obtener los mejores resultados e idealmente, formar un equipo de diseño entre el proyectista y autor del proyecto y el especialista en prefabricación.

Este diseño esquemático o predimensionado conforma varias etapas:

1. Croquis general de planta
2. Selección del Sistema estructural

3. Elección de la malla de pilares. Marcará la longitud de viga y longitud de correa.
4. Análisis de necesidad de elementos estabilizadores. En función de esfuerzos horizontales, viento y sismo.
5. Elección y predimensionado de elementos estructurales.
6. Elección de paneles de fachada.

En la figura siguiente, encontramos un repaso a los principales sistemas estructurales de hormigón prefabricado.

Tipos de edificios	Sistemas estructurales de hormigón prefabricado			
	Esqueleto	Muros de carga	Fachadas resistentes	Estructuras celulares
Edificios industriales y comerciales	Grandes espacios abiertos			
Edificios de oficinas	Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Libertad para la elección del revestimiento		Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Se consigue un espacio cerrado en obra rápidamente	
Edificios para apartamentos		Economía Comportamiento		Rapidez en la ejecución
Hoteles		Economía Comportamiento		
Viviendas		Economía Comportamiento		
Escuelas	Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Libertad para la elección del revestimiento		Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Se consigue un espacio cerrado en obra rápidamente	
Hospitales	Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Libertad para la elección del revestimiento		Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Se consigue un espacio cerrado en obra rápidamente	
Edificios culturales	Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Libertad para la elección del revestimiento		Grandes espacios abiertos. Flexibilidad Se consigue un espacio cerrado en obra rápidamente	
Aparcamientos	Grandes espacios abiertos			Plazas cerradas Velocidad Facilidad

Figura 2.120. Sistemas estructurales de hormigón prefabricado. Reproducida de FIP-ATEP,1996.

En el apartado de edificios con grandes luces libres, encontramos las estructuras que están siendo objeto de estudio en esta tesis, para construir naves industriales, almacenes y centros comerciales (edificios industriales y comerciales) y ya vemos que, para evitar pilares intermedios, la solución de diseño más habitual es con estructuras esqueleto prefabricadas.

Figura 2.121. Cubiertas de edificios con vigas de canto variable (arriba) y placas en TT de canto constante y variable en cubiertas sobre vigas rectas (abajo).
FIP-ATEP, 1996.

Vemos que todavía está muy vigente en las publicaciones el uso de elementos muy masivos (placas principalmente), tanto para su uso en forjados como para cubiertas. Con placas lisas hasta 6,00 m, casetones nervados hasta 9,00 m, alveolar hasta 18,00 m y placas TT hasta 20,00 m.

Figura 2.122. Esquema de elementos estructurales y elementos (losas, casetones, placa alveolar, placas de gran luz) para forjados y cubiertas.
Reproducida de FIP-ATEP,1996.

Para el desarrollo de edificios de grandes luces, se dan algunas referencias en cuanto a vigas de cubierta y pilares, con vigas delta hasta 45,00 m, jácenas I hasta 30,00 m, vigas rectangulares macizas hasta 20,00 m y pilares hasta 15,00 m.

Figura 2.123. Elementos prefabricados para edificios de grandes luces (pilares y vigas de cubierta). Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

Y ya desde estos esquemas podemos comprobar cómo se pensaba incluso en el uso de zapatas prefabricadas, solución prácticamente en desuso hoy en día.

Para las fachadas aparecen los paneles autoportantes con núcleo aislante y las soluciones de paneles con nervios con sección en forma de C o U.

Figura 2.124. Tipologías de paneles de fachadas autoportantes. Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

El planteamiento estructural queda definido en la figura siguiente, en función de las necesidades estabilizadoras frente a acciones horizontales. Lo habitual, siempre que sea posible, es una disposición con pilares en ménsula, tipo a) de la Figura 2.125, por economía, rapidez y sencillez de ejecución. Como bien reseña el manual, los detalles elaborados o vulnerables deben evitarse y seguir el principio de sencillez y, siempre que las acciones de cálculo lo permitan, es conveniente trabajar con uniones articuladas en pilar-vigas como en el caso a).

Figura 2.125. Planteamientos estructurales, deformadas y estabilidad (dcha.) y detalle de conexión pilar-viga articulado (izq.). Reproducida: FIP-ATEP, 1996.

El manual desarrolla, junto con estos principios de diseño, una serie de recomendaciones de predimensionamiento para las estructuras de pórticos:

- 1) Para pórticos que soportan piezas de cubierta y de fachada (placas, casetones), la distancia entre pórticos varía de 5,00 a 7,20 m
- 2) Con el uso de vigas secundarias o correas, se tiene una separación de pórticos de hasta 12,00 m
- 3) Grandes espacios libres de pilares, se consiguen con vigas primarias longitudinales intermedias (vigas cargadero), sobre las que apoyan las vigas principales de cubierta. Estas vigas suelen ir hasta un máximo de 24,00 m.

Y ya desde estos esquemas podemos comprobar la variedad de soluciones para colocar sobre las vigas principales, siendo en la actualidad mayoritaria la solución de correas tubulares como vigas secundarias de la Figura 2.126.

Figura 2.126. Soluciones con estructuras de pórticos 2) y 3), (de izq. a dcha.).
Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

De las soluciones 2) y 3), en la figura adjunta se dan algunas recomendaciones, y ya se nos indica que los datos son meras guías y no recomendaciones absolutas:

Tabla 5A Valores orientativos para la longitud de vanos y la altura del edificio.

	Luz de la viga de cubierta (m)	Luz de la viga secundaria (m)	Luz de la viga primaria (m)	Altura de columna (m)
Mínimo	12	4	6	4
Óptimo	18-32	7-12	12	8
Máximo	40	12	24	20

Figura 2.127. Recomendaciones para estructuras de pórticos 2) y 3).
Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

El manual propone otros sistemas para la construcción de las cubiertas de grandes espacios, con la utilización de elementos prefabricados de gran luz, sobre pórticos longitudinales. Se indican aquí, aunque en nuestro estudio no hemos encontrado ningún caso de estos en la actualidad.

Tabla 5.B Longitudes de vano recomendadas para grandes cubiertas en pórticos longitudinales

	B1(m)	C1(m)	C2(m)
Mínimo	9	4.8	7.2
Óptimo	18-24	7.2	12
Máximo	30	12	18

Figura 2.128. Longitudes recomendadas para cubiertas con placas de gran luz sobre pórticos longitudinales. Fotografía de placa de gran luz. Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

La guía también reseña otros ejemplos de estructuras de pórticos, de los que no hemos encontrado ejemplos actuales en el desarrollo de la presente tesis, sin bien es de reseñar aquí que, por uniformidad de los proyectos considerados, descartamos un par de proyectos de estructuras ganaderas con pórticos triarticulados.

Ejemplo con elementos pórtico prefabricados de hormigón.

Ejemplo con elementos pórtico prefabricados, de hormigón, con elementos de relleno.

Figura 2.129. Otros ejemplos de cubiertas con pórticos prefabricados. Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

Este manual tiene un apartado dedicado a las fachadas arquitectónicas, no propiamente a las fachadas de los edificios industriales, en el que da unas recomendaciones de diseño:

- Peso de los elementos inferior a 10 t, por manejo y transporte
- Dimensión principal del elemento menor a 3,60 m
- Mínimo espesor de paneles según la Figura 2.130 adjunta, con longitudes máximas tabuladas hasta 8 m.

Figura 2.130. Mínimo espesor de panel (mm), en función de su longitud (m)
Reproducida de FIP-ATEP, 1996.

Dentro de los edificios industriales prefabricados, para construir entreplantas y forjados interiores, el uso extendido de los elementos alveolares queda evidenciado en España con el **Manual AIDEPLA M-04, 2004, Manual para el proyecto y ejecución de elementos resistentes con ALVEOPLACA**, siendo AIDEPLA la Asociación para I+D de las placas alveolares. Podemos ver en la Figura 2.131, cómo destacan las placas alveolares pretensadas (3), por la posibilidad de cubrir mayores luces a igualdad de canto, respecto a otras soluciones habituales como las viguetas armadas y bovedillas (1), y las viguetas pretensadas y bovedillas (2).

Figura 2.131. Cantos de diferentes tipos de forjado para una luz máxima dada y una sobrecarga de 4 kN/m^2 . Reproducida de AIDEPLA M-04 (2004).

A efectos de compresión de las estructuras y dado el carácter profundamente estructural, es de sumo interés la publicación **ACHE Monografía E-10, 2004, de Recomendaciones para el proyecto, ejecución y montaje de elementos prefabricados**. En su capítulo 3, se dedica en exclusiva a los elementos lineales para naves y edificios, y nos da importantes pautas para el diseño. Así mismo el capítulo 7, se dedica a elementos para edificios con paneles.

El manual más reciente publicado en Europa sobre estructuras prefabricadas de hormigón es el **FIB Bulletin 74 de 2014, Planing and design handbook on precast building structures** de la FIB: The International Federation for Structural Concrete. En él nos fijaremos para ver los últimos avances reseñados.

Vemos cómo se explica en este manual el funcionamiento de los pilares empotrados en cimentación en los sistemas estructurales de esqueleto con vigas apoyados isostáticamente sobre ménsulas, disposición habitual en las estructuras del estudio de esta tesis.

Figura 2.132. Esquema de trabajo de pilares en ménsula con vigas simplemente apoyadas. FIB, 2014.

En lo referente a las realizaciones vemos que las fotos indican un predominio de las secciones en I o doble T, mostrando realizaciones de vigas delta con longitudes en torno a los 50 m en España.

Encontramos el uso de los sistemas de pórticos hasta los 50 m de longitud, o placas de cubierta hasta los 32 m de longitud. Como se muestra en la Figura 2.133 siguiente:

Figura 2.133. Sistema de pórticos con pilares y vigas (izquierda) y sistema de placas sobre vigas paralelas (derecha). Reproducida de FIB (2014).

Respecto a los sistemas estructurales en hormigón prefabricado, tenemos:

Type of building	PRECAST STRUCTURAL SYSTEM			
	Skeletal structure	Wall frame structure	Loadbearing façades	Mixed construction
Houses and apartments	<ul style="list-style-type: none"> • Gives flexible layout but beams are inside ceiling space 	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for low and medium-rise buildings 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizes structure • Good acoustics • Free choice of façade design 	<ul style="list-style-type: none"> • Generally suited to multi-use buildings
Offices	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces; offers flexibility. • Free choice of façade 	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for low-rise buildings and upper levels with lightweight roofs 	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces • Offers flexibility • Often combined with skeletal frames 	<ul style="list-style-type: none"> • Suited to steel frame system • Façade flexibility
Hotels and hospitals	<ul style="list-style-type: none"> • Offers flexibility • Free choice of façade 	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for areas with many walls 	<ul style="list-style-type: none"> • Economical solution • Often combined with load-bearing walls or skeletal frames 	<ul style="list-style-type: none"> • Suited to steel frame system • Façade flexibility
Educational buildings	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces • Offers flexibility • Free choice of façade 	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for low-rise buildings and upper levels with lightweight roofs 	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces • Offers flexibility • Often combined with skeletal frames 	<ul style="list-style-type: none"> • Suited to steel frame or loadbearing masonry system
Sports halls and gymnasiums	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces • Offers flexibility • Free choice of façade 	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for single-storey buildings and upper levels with lightweight roofs 		
Industrial buildings	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces • With/without intermediate floors • Lightweight roof • Simple façades 			<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for intermediate floors with/without high floor loading
Shopping centres	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces • Offers flexibility • Free choice of internal layout 	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for single-storey buildings and upper levels with lightweight roofs 	<ul style="list-style-type: none"> • Often combined with skeletal frames 	
Car parks	<ul style="list-style-type: none"> • Large open spaces and slender floor structure 			<ul style="list-style-type: none"> • Suited to steel frame or loadbearing masonry system
Grandstands	<ul style="list-style-type: none"> • Complex building structure • Free choice of layout 			<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for upper level seating areas using steel beams
General performances, such as fire resistance, are valid for all types of buildings and, therefore, not mentioned				

Figura 2.134. Sistemas estructurales en hormigón prefabricado. Reproducida de FIB (2014).

En cuanto a referencias de longitudes, en la Figura 2.135 vemos que tenemos algunas modificaciones por la evolución producida en los últimos 20 años, destacando la llegada de las vigas principales a los 50,00 m de longitud máxima y manteniéndose la longitud máxima de las correas en los 12,00 m y la de pilares en los 20,00 m.

Respecto a los óptimos vemos que oscilan entre los 15,00-30,00 m para las vigas principales, los 6,00-9,00 para las correas y los 12,00 m para los pilares. En estructuras de cubiertas que tengan plantas intermedias de forjados debajo, acota las placas alveolares entre los 6-18 m y las vigas pretensadas de forjado entre 7,20-9,60 m, en un criterio de viga corta y placa o losa alveolar larga.

Figura 2.135. Directrices de medidas en estructuras de esqueleto. Reproducida de FIB (2014).

En la siguiente tabla haremos un **resumen de las propuestas**, meras guías y no recomendaciones absolutas, de las longitudes máximas, mínimas y óptimas con los datos obtenidos de los manuales o guías para el proyecto de estructuras con hormigón prefabricado de referencia en España, para edificios industriales de una sola planta y grandes luces:

- Manual de Edificación con prefabricados de hormigón de IECA-ANDECE, 1996, en su capítulo 4.1.2, 5.1, tabla 5.1 y capítulo 8.3.1.2.
- Manual de estructuras de prefabricación de FIP-ATEP, 1996, en su capítulo 5: Sistemas estructurales con pórticos y esqueleto en sus Tabla 5.A.

- BOLETÍN 74 de la FIB, 2014: Planning and design handbook on precast building structures, en el Capítulo 6.2 Types of precast framed structures en la Tabla 6.1: Guidance for span lengths and beam heights of classical precast roof beams.

Tabla 2.10. Comparativa de valores orientativos y recomendados de longitudes de los elementos estructurales que componen las cubiertas ligeras, Datos de IECA-ANDECE (1996), FIP-ATEP (1996) y Boletín 74 de la FIB (2014).

Propuestas en las guías de diseño	Vigas principales (m)			Vigas secundarias o correas (m)			Pilares (m)		
	L _v mín	L _v ópt	L _v máx	L _c mín	L _c ópt	L _c máx	H _l mín	H _l ópt	H _l máx
IECA 1996 (Cap. 5.1/8.3)	8		50	4		12	4		20
FIP 1996 (Fig.5 A)	12	18-32	40	4	7-12	12	4	8	20
FIB 2014 (Fig 6.1)	12	15-30	50	4	6-9	12	4	12	20

En lo referente a la evolución de las vigas principales la longitud máxima se ha incrementado desde los 40,00 hasta los 50,00 m en los manuales de la FIP, actual FIB, y las dimensiones óptimas disminuyen ligeramente su rango de 18,00-32,00 m (1996), a los 15,00-30,00 m (2014).

Respecto a las correas, se mantiene la longitud máxima en 12,00 m, y las dimensiones óptimas disminuyen de los 7,00-12,00 m (1996) a los 6,00-9,00 m (2014), un 14% las longitudes óptimas mínimas y un 25% las longitudes óptimas máximas.

En lo referente a la altura libre de los pilares, se mantiene la altura libre máxima en los 20 m, aumentando las longitudes óptimas en un 50%, de los 8,00 m (1996) a los 12,00 m (2014).

2.3.2 Investigaciones precedentes.

2.3.2.1 Criterios de optimización en general.

Hemos observado en las múltiples publicaciones consultadas, que la preocupación por la optimización está siempre presente, en el sentido de hacer más con menos, cumpliendo los parámetros normativos, de uso y con las necesidades requeridas en la estructura.

Particularmente dentro de este esfuerzo, la defensa de la prefabricación en edificación residencial, con estudios económicos comparativos, organigramas para definir la obra, límites y grados de prefabricación ha sido ampliamente estudiado en Ferrater, J., 1975 y Atelier 3, 1973.

Koncz, T., 1977, en su Construcción industrializada muestra cómo la optimización está en el proceso de desarrollo de un elemento o proceso constructivo, desde la necesidad inicial al producto terminado.

Figura 2.136. Proceso de desarrollo de los sistemas constructivos. Reproducida de Kontz, T. (1977).

Viendo el trabajo desarrollado por algunos autores en lo referente a optimizar modelos estructurales, destaca el de Entrenas, J.A., 1987, con el que coincidimos en que trabaja sobre estructuras de esqueleto (entre otras) optimizadas mediante una función objetivo explícita (el coste o peso de la estructura) en función de las variables de diseño.

Figura 2.137. Tareas para resolución de un modelo de optimización estructural a partir de las condiciones iniciales. Reproducida de Entrenas, J.A. (1987).

En la tesis de Gómez Hermoso, J., 1997, titulada Análisis técnico-económico de la influencia que presenta el empleo de diferentes materiales y tipologías estructurales en el proyecto de estructuras de edificios, encontramos

un muy buen ejemplo de un análisis basado en obras realizadas en un periodo concreto de tiempo, para primero ver lo que se construye realmente y segundo buscar el óptimo desde el punto de vista técnico y económico.

Como bien señala el profesor Jesús Gómez Hermoso, en su Tesis Doctoral, el objetivo fundamental de los estudios de optimización es, por tanto, obtener unos criterios para poder definir la obra desde un punto de vista geométrico y de elección de materiales desde la fase inicial de diseño, que nos permita valorar y comparar las posibles alternativas. Advierte el autor, que las publicaciones precedentes específicas son escasas, cuestión que pasados veinte años, seguimos compartiendo en el desarrollo de esta tesis.

León, J. et al, 1997, realizan una aportación muy interesante y eminentemente práctica, realizando una encuesta sobre límites de esbeltez en vigas y forjados unidireccionales de estructuras de edificación, obteniendo los resultados por vía empírica, preguntando a los expertos con el fin de compendiar y analizar sus experiencias, y tomarlas como referencia para realizar propuestas. Este método lo vemos de gran utilidad para saber lo que se hace y las experiencias que tenemos sobre ello.

Entre los trabajos sobre optimización en estructuras son destacables el de Leps, M., 2003, sobre optimización de vigas de hormigón armado, con una metodología de optimización y simulación con Algoritmos genéticos (Genetic algorithm and Simulated annealing) y el de Papadrakakis, M., 2005, en diseño de la optimización de estructuras de acero considerando incertidumbres, analizando las mismas mediante los caminos de la optimización del diseño basado en la confiabilidad y la optimización del diseño robusto.

Entre los trabajos de optimización recientes, podemos destacar los realizados por Kravanjaa, S., 2010 y 2013, sobre diseño óptimo de estructuras en construcción de acero industriales de una sola planta, mediante la técnica de optimización de programación no lineal (MINLP: parametric mixed-integer non-linear programming).

El modelo de edificio de una sola planta es similar a los edificios que vamos a analizar con estructura prefabricada, son edificios compuestos principalmente por pilares, vigas y correas.

Figura 2.138. Modelo de estructura de acero para edificio de una sola planta
Kravanjaa, (2013).

Podemos ver en los modelos planteados cómo se discriminan las variables más importantes e influyentes con ayuda de un croquis: longitud de viga, longitudes de correas o separación de pórticos, separación de correas, altura libre y total de la edificación, cargas sobre las cubiertas, cargas sobre las fachadas. Los valores buscados de salida para optimizar la estructura serán, como en nuestro caso, las secciones de viga y correas que marcarán el consumo de materiales.

En la presente tesis, y como se verá más adelante, se trabaja con hormigón armado y hormigón pretensado, compuesto de dos materiales, acero y hormigón, lo que nos lleva a definir un concepto nuevo que denominaremos en la tesis hormigón homogeneizado, y que nos servirá para homogeneizar los dos materiales en función de rangos de cuantías de acero de los elementos.

El dimensionamiento en estructura metálica con perfiles normalizados, resulta en origen algo más sencillo por la inmediatez al obtener los valores resistentes de la sección, en el que prácticamente el único valor a variar para

cada sección es la calidad del acero S235 o S335. El estudio concluye con la propuesta de un edificio industrial óptimo de única planta realizado con pórticos de perfiles HEA e IPE.

Figura 2.139. Modelo de estructura de acero para edificio de una sola planta. Diseño óptimo del edificio industrial de única planta realizado con pórticos de perfiles HEA e IPE. Reproducida de Kravanjaa, (2010).

En lo referente a la optimización de estructuras, cabe señalar **las técnicas heurísticas**, como muestran numerosas publicaciones recientes, de las que reseñaremos aquí alguno de los trabajos como los de Perea, C., 2008, sobre técnicas de optimización heurísticas en el diseño marcos de puentes, y Martí, J. V., 2010, en pasarelas peatonales.

Figura 2.140. Diseño más económico para un marco de 13 m de paso libre, mediante técnicas heurísticas. Reproducido de Perea, C., (2008).

De forma similar, Alcalá. J, et al., 2014, abordan con técnicas heurísticas la optimización de forjados, permitiendo plantearse el problema de una manera más compleja, utilizando una definición completa del forjado mixto y sus componentes, mientras que al mismo tiempo satisface las restricciones de este tipo de estructuras. El proceso de obtención del diseño contiene diferentes funciones: generación de la estructura y solución constructiva, comprobación estructural y condiciones de confort, y evaluación económica o del consumo energético. Los algoritmos de optimización aplicados al elemento constructivo se basan en tres heurísticas, pertenecientes a los métodos de búsqueda secuencial por entornos: búsqueda local de descenso (DLS), simulado recocido (SA) y el umbral de aceptación (TA).

Figura 2.141. Planteamiento del diseño óptimo de forjados mixtos. Reproducida de Alcalá. J, et al. (2014).

Martí, J.V., et al., 2014, realizan el análisis de puentes isostáticos de vigas artesas prefabricadas pretensadas para puentes de carreteras con criterios económicos. Lo realizan mediante técnicas heurísticas, con un algoritmo que se aplica al coste económico y que incluye las etapas de fabricación, transporte y montaje. El análisis se hace para diferentes luces con el objetivo de que sea útil para el predimensionado de puentes. Se analiza la sensibilidad del coste de la estructura a la variación de los precios del hormigón y acero, donde se ve que una subida máxima de un 20% en los precios del acero conduce a un aumento del coste total del 11,82%, mientras que una subida del 20% en el precio del hormigón, produce un incremento de coste del 4,20%, 2,8 veces menos.

Figura 2.142. Análisis del incremento de coste con la variación de precios de hormigón y acero. Reproducida de Martí, J.V., et al. (2014).

Yepes, V., et al. 2014, en el diseño eficiente con estructuras no convencionales basados en criterios sostenibles multiobjetivo: HORSOT. Nos muestran una metodología que permite establecer criterios de diseño eficiente de forma que se maximice su contribución a la sostenibilidad.

Resulta especialmente interesante de este estudio el diagrama de extracción y difusión del conocimiento, por contraste de criterios de diseño.

Figura 2.143. Diagrama de extracción y difusión del conocimiento. Reproducida de Yepes, V., et al. (2014).

Alcalá, J. et al., 2014, aplican la técnica heurística en la optimización de forjados de losa pretensada (postesas con torones no adherentes) utilizando criterios económicos y de sostenibilidad, sacando conclusiones interesantes sobre la relación coste frente a luz en el vano central, como podemos ver en la figura.

Figura 2.144. Relación luz-coste en forjado de losa postesada. Reproducida de Alcalá, J., et al. (2014).

Otra estrategia se puede establecer con ayuda de **modelos paramétricos**, como muestran Pérez, J. et al., 2014, realizando un diseño óptimo de arcos mediante un modelo paramétrico general. Advierten que el diseño óptimo puede contar con múltiples objetivos, por ejemplo, el objetivo de analizar el gasto de material en fábrica. El procedimiento propone evaluar las variables que gobiernan el problema, establecer una estrategia de optimización y llevarla a cabo con un modelo paramétrico general de análisis. Esto nos permitirá resolver la aproximación al dimensionado y establecer relaciones entre las variables involucradas.

De los estudios de optimización, no debemos olvidarnos de todos los esfuerzos realizados en el ámbito de los **materiales**. Destacamos aquí a Rosado, S., 2014, que realiza un trabajo sobre la implementación de nuevos materiales en la fabricación de hormigón, analizando la viabilidad técnico-económica, mediante productos alternativos para generar nuevos hormigones optimizados teóricamente y estudiar su implantación real. Concluye el estudio que los productos alternativos no son muy utilizados debido principalmente a la normativa, al riesgo de inversión y al coste de los mismos.

2.3.2.2 Prefabricación industrial: desarrollo y optimización.

Vamos a reseñar en este apartado las investigaciones precedentes, ordenadas cronológicamente.

Dada la vinculación en el estudio del pasado de las técnicas de pretensado, nos parece muy interesante traer aquí el estudio realizado por **Torroja, J.A., 1966**, sobre **Dispositivos y sistemas de pretensado**. Posteriormente encontramos en este mismo número especial de la publicación Hormigón y Acero, los estudios de varios procedimientos, dispositivos y sistemas de pretensado, Barredo de Valenzuela, C. (1966) con el Sistema Barredo, Ripoll, J.B. (1966) con el Sistema C.C.L., y Angulo, L. (1966) con los procedimientos Freyssinet. Estas aportaciones son especialmente destacables pues, en las últimas décadas,

desaparecen por completo de la bibliografía los avances, por pequeños que fueran, y las descripciones de los sistemas.

En Gatz, K., 1968, los artículos incluidos en el libro por parte de R. Seelhorst, sobre las obras de hormigón y la ordenación de las dimensiones y el de Martin H. Burckhardt sobre construcción con elementos prefabricados de hormigón, sobre la importancia de considerar desde el arranque del proyecto la implantación de los sistemas prefabricados. La fabricación en serie y la ordenación de dimensiones es fundamental para optimizar la fabricación, así como lo es para el transporte y montaje el poder montar las piezas directamente en obra desde los camiones de transporte, para tener un montaje optimizado.

Uno de los manuales más importantes y completos publicados, y que cuenta con tres tomos, es el **Manual de la construcción prefabricada con elementos de hormigón armado y hormigón pretensado** de Koncz, T., 1968, al que ya se ha hecho referencia en la evolución histórica.

En su Tomo 1, en el apartado dedicado a los elementos de cubierta, podemos ver las secciones de correas que propone, todas ellas macizas con secciones rectangular, V, T y doble T, con cantos entre los 25 y los 55 cm. Las correas salvan luces entre los 5 y 10 m, con separaciones entre ellas de 2 a 3 m.

Figura 2.145. Tipologías de correas para cubiertas. Reproducida de Koncz, T., 1968.

Sobre las correas, lo habitual es colocar placas de cubierta de 0,50 a 1,00 m de ancho y que pueden cubrir luces de 2,00 a 6,50 m. Tenemos diferentes tipologías y en función de la luz a cubrir tienen un peso de 70 a 150 kg/m². En la siguiente figura podemos ver diferentes valores de las placas de cubierta, en función de la tipología y la distancia a salvar:

Tabla I.—Valores comparados de placas de cubiertas.

Separación de los pies derechos, en metros		Placas de hormigón de pómez	Placas de cubierta Durisol	Hormigón gaseoso Hebel GSB 35	Placas huecas de arcilla dilatada Leca 8 80, 8 100, 8 120	Placas huecas de hormigón pretensado (Sistema «Schöfer»)	Placas «Siporex» (Suecia)	Placas de cubierta de cerámica armada (Suiza)
2,00	Espeor en cm.	7			7		7	
	Peso en kg/m ²	65			60		48	
	$\Lambda = \frac{\lambda}{d} \text{ K cal/m}^2 \text{ h}^\circ$	3,58			4,28		2,00	
2,50	d	8 (l = 2,40)	8	7,5	8		8,7	8,5
	g	72	80	54	70		60	105
	Λ	3,13	1,52	2,00	3,75		1,61	1,85
3,00	d	10	10	10	8—9		10	
	g	88	95	72	72—74		67	
	Λ	2,50	1,18	1,50	3,33		1,40	
3,50	d	12	12		10—11			10,5
	g	100	116		84—90			135
	Λ	2,08	1,00		3,03—2,70			1,52
4,00	d		14	12,5	11—12	8	12	
	g		145	90	95—100	115	78	
	Λ		0,86	1,20	2,83—2,50	5,00	1,17	
4,50	d				12—13	10		
	g				100—105	135		
	Λ				2,50—2,30	4,55		
5,00	d			15	14—15	12	14,5	
	g			106	125—132	165	93	
	Λ			1,00	2,14—2,00	4,35	0,97	
5,50	d			17,5 (l = 5,40)	15—16	14	16	
	g			123	132—143	185	103	
	Λ			0,86	2,00—1,87	3,70	0,88	
6,00	d			20	16—18	16	18—20,7	
	g			140	143—154	205	116—133	
	Λ			0,75	1,87—1,67	3,33	0,78—0,68	
6,50	d				18	16		
	g				165	205		
	Λ				1,67	3,33		

Observación: El coeficiente de permeabilidad térmica «K» se calcula con la fórmula $1/K = 1/\alpha_1 + 1/\Lambda + 1/\alpha_2$.

Figura 2.146. Valores de placas de cubierta. Reproducida de Koncz, T., 1968.

Para la cubrición de grandes luces, con elementos de cubierta de gran formato, se dan algunas recomendaciones por economía, como son el empleo de placas de casetones de gran ventaja por su ligereza, con espesores de 2,5 cm para luces menores de 9,00 m y placas nervadas o placas de artesa para luces hasta los 9,00 m.

Las placas T y TT, conllevan un gran empleo de material (tabla de compresión de 5 / 7,5 / 10 cm), llegando con las placas TT hasta 15,00 m y con las placas T hasta los 24,00 m.

DISTANCIA ENTRE APOYOS 1 (EN METROS)		PLACAS DE CASILLONES	PLACAS DE ARRESA	PLACAS -T-	PLACAS -TT-
6,00	Altura de constr. α (en cm)	25 a 30	20	20	30
	Peso propio kg/m ²	150	160	165	255
	Acero de pretensar kg/m ²		1,90	2,00	2,20
	Acero de alta calidad kg/m ²	6,00	2,80	3,20	3,50
9,00	Altura de constr. α (en cm)	36 a 40	30	35	40
	Peso propio kg/m ²	180	190	200	280
	Acero de pretensar kg/m ²		2,20	2,20	2,50
	Acero de alta calidad kg/m ²	7,00	3,00	3,50	3,80
12,00	Altura de constr. α (en cm)	45 a 50	35	35	50
	Peso propio kg/m ²	210	200	200	300
	Acero de pretensar kg/m ²		2,40	2,50	3,00
	Acero de alta calidad kg/m ²	8,50	3,30	3,50	3,80
15,00	Altura de constr. α (en cm)		45	50	60
	Peso propio kg/m ²		260	225	320
	Acero de pretensar kg/m ²		3,30	3,00	3,60
	Acero de alta calidad kg/m ²		3,70	3,90	3,80
18,00	Altura de constr. α (en cm)				70
	Peso propio kg/m ²				340
	Acero de pretensar kg/m ²				5,00
	Acero de alta calidad kg/m ²				4,00
24,00	Altura de constr. α (en cm)				90
	Peso propio kg/m ²				380
	Acero de pretensar kg/m ²				7,50
	Acero de alta calidad kg/m ²				4,00

Figura 2.147. Elementos de cubierta para grandes luces. Reproducida de Koncz, T., 1968.

Koncz, T., 1968, en su Tomo 1, habla de sistemas portantes para cubiertas de nave única, con construcciones de esqueleto con elementos lineales con tres tipos de soluciones (Figura 2.148 izquierda):

- apoyos empotrados con jácena unida mediante articulaciones, hasta los 30 m de luz.
- apoyos empotrados con la jácena transversal, limitado a 30,00 m de luz.
- pórticos a base de pequeñas unidades, montados sobre andamios o estructuras auxiliares y luego unidos mediante pretensado para formar un conjunto portante, hasta los 40,00 m de luz.

Respecto a las construcciones de esqueleto con piezas porticadas, en la Figura 2.148 derecha, tenemos:

- a) los pórticos articulados (con una o tres articulaciones), para luces menores de 12,00 m
- b) pórticos triarticulados formados por semipórticos de dos piezas, para luces de 20,00 a 40,00 m
- c) el sistema "Lambda", con jácena articulada en los puntos de momento nulo, para luces de 10,00 a 30,00 m.

Figura 2.148. Sistema de esqueleto con elementos lineales (izquierda), sistemas de esqueleto con piezas porticadas (derecha). Reproducida de Koncz, T., 1968.

Para nave única, reseña la serie tipificada de IMBAU, con vigas delta con luces desde 12,50 a 25,00 m, como muestra la Figura 2.149.

Figura 2.149. Nave única. Serie tipificada de IMBAU GmbH. Desde 12,50 a 25,00 m, con 7,50 m entre pórticos y 5,00 m de altura libre. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Dentro de la tipificación de secciones realizadas, destacamos aquí la tabla de la Stahlton AG de Zurich, para jácenas a dos aguas para diferentes longitudes en función de la carga útil admisible en Mp/m para el armado de pretensado máximo de cada sección.

Figura 2.150. Tabla de la Stahlton AG de Zurich para jácenas a dos aguas, en función de la carga útil admisible. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Para naves múltiples con elementos rectilíneos, nos manejamos entre los 12,00 y 30,00 m, como se detalla en la Figura 2.151 (superior):

- a1) con apoyo isostático sobre los pilares
- a2) apoyo con continuidad (unión rígida o semirrígida)

Vemos la importancia que se daba en esta época a la forma de las naves en función del sistema de claraboyas elegido para el proyecto, en un intento de optimizar el aprovechamiento de la luz natural. En la actualidad contamos con múltiples recursos para llevar la luz natural dentro de las naves.

Figura 2.151. Esquema de cubierta de naves con elementos lineales, con unión en nudo A, apoyada o empotrada / semiempotrada. Ejemplo de Nave múltiple. Serie tipificada de IMBAU GmbH. 2x17,50 m. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Koncz también presenta distintos ejemplos de sistemas portantes de cubiertas de naves múltiples, marcados en gran medida por los lucernarios, con luces ente 12,00 y 30,00 m y separación de pórticos de 5,00 m hasta 12,00 m, con elementos lineales, representado en la Figura 2.152.

Reproducida de Koncz, T. (1968).

Con elementos de pórticos hasta 20,00 m de luz y hasta 12,00 m de separación en la Figura 2.153.

Figura 2.153. Sistema de cubiertas con pórticos. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Soluciones con sistemas de esqueleto con vigas de canales y cubiertas en dientes de sierra, para entrada de luz, para diferentes luces y separaciones, como se muestra en la Figura 2.154.

Figura 2.154. Sistema de cubiertas. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Es digno mencionar la referencia que hace el autor a los sistemas estructurales con celosías, arcos y estructuras portantes curvas para luces entre los 12,00 y los 60,00 m, en función del sistema elegido: celosías triangulares, parabólicas, vigas pórticos, de una o varias piezas o formada por el ensamble de elementos sueltos, como lo mostrado en la Figura 2.155.

Figura 2.155. Sistemas de celosías. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Vemos que, con la celosía parabólica compuesta por elementos prefabricados individuales mediante pretensado, se hacían propuestas para luces de hasta 60,00 m.

Figura 2.156. Soluciones de estructuras de celosía con jácena articulada hasta 60,00 m y con uniones rígidas hasta 30,00 m. Pórticos rígidos de celosía hasta 20,00 m y triarticulados hasta 30,00 m. Estructuras volumétricas de celosía hasta 50,00 m. Koncz, T. 1968.

Se nos refiere, que los arcos de hormigón funcionan muy bien, por su tipología estructural y por la economía de material. Mostramos algunos ejemplos en la Figura 2.157, con luces hasta los 50,00 y 60,00 m, en función de la tipología.

Figura 2.157. Sistema de pilares empotrado y jácena/arco articulado en cabeza de pilar. a₁ y a₂) arcos bi o triarticulados con tirante, b₁ y b₂) pórticos bi o triarticulados con tirante, c₁) arco de tres cordones, c₂) arco con estructura romboidal de celosía. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Para estructuras portantes superficiales del tipo viga, desde las placas de casetones hasta 9,00 m, las placas U hasta 12,00 m, las TT hasta 15,00 m y las placas en T hasta 35,00 m, según la Figura 2.158.

Figura 2.158. Sistemas de placas portantes en forma de vigas. Reproducida de Koncz, T. (1968).

También tenemos los elementos tipo viga hueca con diferentes secciones y luces entre los 20,00 y los 35,00 m, en la Figura 2.159.

Figura 2.159. Placas portantes superficiales con elementos de vigas huecas. Tipos: perforaciones múltiples, cajas huecas procedentes de estructura plegada, cajas huecas con alas voladas. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Para estructuras plegadas, cubrimos luces en función de la sección y canto, entre los 20,00 y los 30,00 m en la Figura 2.160.

Figura 2.160 Estructuras plegadas en U. Sistema Koncz. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Con cáscaras con comportamiento portante como vigas, en función de las secciones tenemos luces máximas alrededor de los 20,00 m, en la Figura 2.161.

Figura 2.161. Estructura tipo cáscara. Tonel, ondulada y con refuerzo de vigueta inferior. Reproducida de Koncz, T. (1968).

Respecto a la economía de las secciones sometidas a flexión, como las del estudio que estamos realizando, Koncz, T., 1968, relaciona la economía con el material empleado, hormigón y acero activo y pasivo, y su coste de producción.

El grado de eficacia lo define como la relación entre el momento admitido por la viga entre su peso propio. Muestra el índice de rendimiento de las secciones con un diagrama, para vigas de hormigón pretensado, en la Figura 2.162. Se nos indica que la sección más económica es la que presenta la máxima distancia entre núcleos en relación con su altura. Tendremos que tener en cuenta también la cantidad de armadura y los costes de producción, aunque a priori ya vemos que las secciones más económicas de vigas trabajando a flexión, por forma y consumo de hormigón, son las de doble T, secciones que también resultan de las más sencillas de producir, lo que las ha convertido en las secciones predominantes en la actualidad.

Figura 2.162. Capacidad de rendimiento de secciones de hormigón pretensado.
Reproducida de Koncz, T. (1968).

Apuntamos aquí, que este mismo concepto, sigue estando muy presente, como bien se explica en Kuprenas, J. et al, 2016, donde se nos dice que la mejor forma para una viga es una sección en doble T: *Cuando una viga flexiona al someterla a carga, la parte superior se acorta y la inferior se alarga. Las tensiones de compresión y tracción son máximas en los extremos superior e inferior respectivamente y disminuyen hacia el centro, donde las tensiones llegan a cero en el eje neutro. Como podemos ver en la Figura 2.163 siguiente, una viga rectangular colocada en orientación vertical (viga B) es más eficiente que una viga colocada en horizontal (viga A), porque un mayor porcentaje de su material está situado donde las tensiones son mayores, más lejos del eje neutro. Esto supone colocar la mayor parte del material donde tiene que hacerse la mayor parte del trabajo, y por la misma razón, una viga en forma de I o doble T (viga C), es todavía más eficiente.*

Figura 2.163. Explicación de eficiencia de vigas sometidas a flexión.

Reproducida de Kuprenas, J. et al. (2016).

Encontramos en Payá, M., (1968), un apartado sobre cerchas en el que nos ofrece ejemplos de cerchas desmontables (Figura 2.164), reseñando que la separación de cerchas en obra oscila de 4,00 a 5,00 m, y vemos ya imágenes de movimiento de grandes piezas prefabricadas en taller.

Figura 2.164 Detalle de cercha desmontable de hormigón. Reproducida de Payá, M., (1968).

En un importante artículo, Moneo, M., 1970, nos hace una buena introducción a las necesidades de la prefabricación, a nivel de **bancos de prefabricación** de los que describe su disposición y planteamiento de diseño, sistemas de tensión de cables, gatos y anclajes.

En Oliveri, G.M., 1972, en su Prefabricación o metaproyecto constructivo, encontramos pautas y reflexiones sobre la problemática que se plantea en la construcción industrializada, en los sistemas de prefabricación y en la prefabricación en serie, y cómo abordarlos y superarlos. Las reflexiones sobre edificios de catálogo o elementos de catálogo, los conceptos de prefabricación cerrada o abierta, así como la **importancia de la retícula** y el camino hacia lo que llama metaproyecto constructivo, como un sistema a caballo entre el *metadesign* y la prefabricación abierta, que admite cambios en su estructura.

Figura 2.165. Camino hacia el “metaproyecto” constructivo, según Oliveri, G.M.
Reproducida de Oliveri, G.M. (1972).

Respecto a los trabajos de optimización de estructuras prefabricadas, cabe señalar lo apuntado por Vasconcelos, J., 1972, donde destaca la importancia del estudio, no sólo a nivel de reducción de materiales empleados, dimensiones o mejora de rendimiento de las piezas prefabricadas utilizadas, sino que **incide en la importancia que tiene a nivel de la organización de la fabricación industrial, el reducir el número de piezas o elementos que es necesario producir**, al descartar los que menos ventajas ofrecen.

La llegada de los **programas informáticos**, ha dado numerosas posibilidades en el avance de análisis de casos y en el rendimiento de la exploración para la optimización. Verde, A., 1973, nos muestra la importancia de las aplicaciones informáticas específicamente planteadas en la optimización de forjados pretensados, destacando la versatilidad, rapidez y potencia. A nuestro entender cabe destacar la practicidad del método propuesto, con curvas de coste por secciones, lo que permite acotar los campos de utilización de cada uno.

En Tatum C.B. et al., 1987, se nos proponen cuatro niveles en los que puede producirse la prefabricación: **prefabricación total de edificios**, prefabricación de sistemas, prefabricación de componentes y prefabricación de elementos.

Figura 2.166. Niveles de prefabricación, según Tatum C.B. Reproducida de Tatum C.B. et al. (1987).

Otro de los manuales más importantes y completos publicados, son los dos tomos de **Prefabricación: teoría y práctica. Seminario de prefabricación. J.A. Fdez. Ordóñez. Tomo I y II**, de Fernández Ordóñez, J.A., et al, **1974**. donde nos cuenta las inquietudes del momento en las cubiertas de los edificios industriales:

- Iluminación, condiciones acústicas y de ventilación
- Puentes grúa
- Tipos de uniones entre elementos
- Prefabricación
 - Por prototipos (tipificación y universalidad de utilización)
 - Simplicidad formal
 - Aspecto económico: Estudio de 1971 en Alemania de Loef y Sommer, que asegura que la solución más cara son las cubiertas en diente de sierra (Shed), un 32% respecto a las cubiertas planas iluminadas artificialmente. Indica ya una tendencia a las cubiertas planas o casi planas.

Nos ofrecen en el libro un resumen de los resultados de una encuesta de la Comisión de Prefabricación de la FIP, Federación Internacional del Pretensado, entre sus 11 países miembros, entre los que se encuentra España, con las siguientes conclusiones:

- Tipologías estructurales predominantes:

Figura 2.167. Tipologías estructurales predominantes, según encuesta FIP en 1971. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

- Modulación:
 - Separación de pórticos: 6,00 m
 - Altura libre bajo jácena: 3,00-5,00 m
- Cimentaciones: Zapatas aisladas preferiblemente. Empotramiento de pilar en zapatas sencillo.
- Transporte y elevación.
 - Transporte por carretera, con limitaciones de
 - Altura máxima: 2,50-3,00 m
 - Longitud máxima: 20,00-24,00 m
 - El medio de elevación más empleado son las grúas móviles de 50 t.
 - Montaje: cuadrilla de 4 a 8 operarios
 - Unión ideal: simplemente apoyado (superpuesto), con un mínimo atado
- Elementos:
 - Jácenas rectangulares, I, y TT son las más empleadas.
 - Clima cálido: sección recta y clima lluvioso: sección peraltada.
 - Tendencia al empleo de placas de cubierta apoyadas directamente sobre jácenas
 - Uniones según la figura 2.168:

	SOLDADURA ELECTRICA	CON HORMIGON	CON RESINAS SINTETICAS	TORNILLOS Y ROBLONES
USA	50%	20%	—	30%
URSS	Generalmente	Poco	—	—
Alemania Federal	Pocas veces	Generalmente	—	—
Suiza	UTILIZA TODOS LOS MEDIOS			
Bélgica	—	100%	—	En conexiones viga-columna con elementos en TT.
Dinamarca	—	Generalmente	Cada vez más en construcciones no portantes	—
Hungría	Mucho	Mucho	—	—
Países Bajos	35%	35%	Pocas veces	10%
Australia	Generalmente	Poco	—	—
España	Sí	Sí	—	—

Figura 2.168. Tabla de uniones según encuesta FIP, en 1971. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

- La F.I.P presenta un esquema, a la vista de los resultados de la encuesta, del tipo de nave con mayor futuro:

Figura 2.169. Esquema de las naves de mayor futuro, según encuesta FIP en 1971. Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

Se presentan las soluciones de pórticos más universales, con vigas pretensadas con armaduras pretesas hasta 30 m y postesas hasta 40 m, en las tres figuras que reproducimos a continuación dado el interés, Figura 2.170, Figura 2.171 y Figura 2.172.

En las tablas por tipo de pórtico y elemento de viga principal, se dan las características apropiadas de uso en cuanto a luces, determinando estos valores geométricos más económicos de acuerdo con el consumo de materiales, siguiendo el criterio de Koncz, a sabiendas de que la economía de los materiales no es siempre el factor determinante en la prefabricación, teniendo el montaje y la ejecución aspectos decisivos, según Fernández Ordóñez, J.A., 1974.

Aporta también un detallado análisis del montaje, para el que se contaba en la época con cuadrillas de 4 a 8 trabajadores con una grúa auxiliar, dando el montaje por elemento (que integra parte de un pórtico) por estructura (pórtico completo),

y también se referencia el peso de los elementos en toneladas. En la tabla no encontramos mención al transporte.

PORTICO	ELEMENTOS	CARACTERISTICAS APROPIADAS	MONTAJE ELEMENTO (TIEMPO EN HORAS)	PESO ELEMENTO (TONELADAS)	MONTAJE PORTICO (TIEMPO EN HORAS)
$L: 12 - 30 \text{ m}$		$3 - 30 \text{ t}$	$4 - 10 \text{ h}$
	$L: 20 - 40 \text{ m}$	$5 - 10 \text{ h}$	$13 - 60 \text{ t}$	$8 - 15 \text{ h}$
	$L: 12 - 30 \text{ m}$ $a: L/5 - L/8$	$10 - 20 \text{ h}$	$3 - 24 \text{ t}$	$13 - 25 \text{ h}$
	$L: 30 - 60 \text{ m}$ $a: L/16 - L/18$	$15 - 25 \text{ h}$	$12 - 60 \text{ t}$	$18 - 30 \text{ h}$
	$L: 20 - 40 \text{ m}$	$8 - 16 \text{ h}$	$5 - 48 \text{ t}$	$10 - 20 \text{ h}$
	$L: 20 - 30 \text{ m}$	$5 - 12 \text{ h}$	$6 - 30 \text{ t}$	$8 - 17 \text{ h}$
	$L: 12 - 30 \text{ m}$ $a: L/10 - L/14$	$5 - 10 \text{ h}$	$3 - 25 \text{ t}$	$8 - 13 \text{ h}$
	$L: 20 - 50$ $f: L/6 - L/10$	$15 - 30 \text{ h}$	$6 - 30 \text{ t}$	$17 - 34 \text{ h}$
	$L: 12 - 25 \text{ m}$ $f: L/6 - L/10$	$20 - 30 \text{ h}$	$3 - 10 \text{ t}$	$23 - 33 \text{ h}$

Figura 2.170. Soluciones de sistemas de pórticos más universales (1/3).

Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

PORTICO	ELEMENTOS	CARACTERISTICAS APROPIADAS	MONTAJE ELEMENTO (TIEMPO EN HORAS)	PESO ELEMENTO (TONELADAS)	MONTAJE PORTICO (TIEMPO EN HORAS)
L: 22 – 30 m f: L/6 – L/12	20 – 30 h	6 – 15 t	23 – 33 h
L: 10 – 12 m H < 12 m		5 – 10 t	5 – 15 h
	L: 20 – 40 m H < 12 m		2 – 10 t	10 – 20 h
	L: 18 – 30 m		6 – 20 t	10 – 20 h
L: 6 – 12 m H < 8 m		15 – 30 t	0,5 – 2 h
	L: 12 – 30 m H < 18 m		3 – 30 t	2 – 8 h
	L: 20 – 40 m H < 35 m	6 – 12 h	13 – 60 t	9 – 18 h
	L: 12 – 30 m	5 – 12 h	10 – 25 t	8 – 18 h
	L: 18 – 20 m		6 – 15 t	10 – 20 h

L: luz; f: flecha; H: altura de pórticos.

Figura 2.171. Soluciones de sistemas de pórticos más universales (2/3).

Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

PORTICO	ELEMENTOS	CARACTERISTICAS APROPIADAS	MONTAJE ELEMENTO (TIEMPO EN HORAS)	PESO ELEMENTO (TONELADAS)	MONTAJE PORTICO (TIEMPO EN HORAS)
		L: 10 - 12 m H < 18 m	5 - 15 h	10 - 20 t	1 - 5 h
		L: 20 - 40 m H < 18 m		2 - 10 t	3 - 10 h
		L: 10 - 30 m H: 10 - 30 m	12 - 22 h	3 - 20 t	15 - 25 h
		L: 10 - 20 m H < 8 m		3 - 30 t	4 - 10 h
		L: 12 - 30 m H < 18 m	10 - 30 h	16 - 30 t	0,5 - 1 h
		L: 10 - 30 m H < 12 m		1 - 5 t	5 - 15 h
		H < 12 m		2 - 6 t	
		H < 30 m	4 - 8 h	20 t	
		H < 18 m		6 t	

L: luz; H: altura de pórticos.

Figura 2.172. Soluciones de sistemas de pórticos más universales (3/3).

Reproducida de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

Como ya vimos en el apartado de realizaciones, se van produciendo cambios en España en lo que respecta al transporte, debido a la creciente prefabricación en instalaciones fijas.

Fernández Ordóñez, J.A. (1974), en el tomo 2 de su Seminario de Prefabricación ya nos habla de transportar piezas largas en vehículo corto y plataforma unida (Dolly)

- Con distancias frecuentes entre 200 y 300 km
- Cargas de hasta 40 t.
- Esta forma de transporte es actualmente la mayoritaria para piezas de gran longitud en España.

Nos ofrece unas tablas de pesos máximos en toneladas (Figura 2.173) y medidas de largo y ancho del transporte (Figura 2.174).

PESO MAX. EN CARGA (en t)								
PAISES	Peso máx. por eje simple	Peso máx. por eje tandem	Camión aislado	Remolque aislado	Camión + rem.	Vehículo articulado	Autobús	Aut. articulado
Alemania Oc.	10	16	2 ejes, 16 t más de 2 ejes 22 t	1 e - 10 2 e - 16 3 e - 22	38	38	1 eje 16 2 ejes 22	28
Bélgica	13	20	2 ejes 19 t más de 2 ejes 22 t	1 e - 13 2 e - 20 3 e - 26	—	36	2 ejes 19 3 ejes 26	36
Holanda	10	16	—	—	50	50	—	50
Francia	13	—	2 ejes 19 t más de 2 ejes 26 t	1 e - 6 2 e 3 e	35	35	2 e 19	35
Italia	10	14,5	2 ejes 14 t 3 ejes 18 t más de 3 ejes 22 t	1 e - 6 2 e - 14 3 e - 18	—	3 ejes 18 4 ejes 28	2 e 15 3 e 19	—
Luxemburgo	13	20	2 ejes 19 t más de 2 ejes 26 t	—	40	35	2 e 19 2 26	—

Figura 2.173. Tablas de pesos máximos en toneladas del transporte en diferentes países europeos. Reproducidas de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

LONGITUDES Y ANCHOS EN LOS DISTINTOS PAISES EN 1956					
PAISES	LONGITUD MAXIMA				ANCHO MAXIMO — metros
	VEHICULO SOLO		CAMION CON		
	Dos ejes — metros	Más de dos ejes — metros	Semirremolque — metros	Remolque — metros	
Bélgica	7,0	12,0	14,0	21,0	2,50
Francia	11,0	—	14,0	18,0	2,50
Italia	—	—	20,0	20,0	2,50
Luxemburgo	10-11	12,0	14,0	20,0	—
Países Bajos	10,0	—	14,0	18,0	2,50
Suiza	9,5	—	18,0	18,0	2,40
Gran Bretaña	9,1	—	16,0	16,0	2,30-2,40
Alemania Occidental	10,0	—	14,0	16,0	2,50
Argentina	11,0	—	14,0	18,0	2,50
Australia	10,0	—	13,7	15,2	2,40
Brasil	10,5	—	15,0	15,0	2,60
Turquía	10,0	—	18,0	22,0	2,50
España	11,0	12,0	16,5	16,5	2,50 *

* Con permiso especial permanente: longitudes, 14 m vehículo y 16 m camión con semirremolque o remolque; ancho, 3,50 m.

Figura 2.174. Tablas de largo y ancho, para el transporte en diferentes países europeos. Reproducidas de Fernández Ordóñez, J.A. et al. (1974).

Destacar aquí, la importancia de la figura de J.A. Fernández Ordóñez, con dos referencias bibliográficas imprescindibles: CICCIP., 2001; JAFO y Navarro, J.R. (editor), 2009; Pensar la ingeniería, y el carácter enciclopédico y extraordinario de la obra del Seminario realizado junto a M. Aguiló, F. Echevarría, J.F. López, y J. Salas.

Nos indica Lozano G., **1979**, en su artículo, Construcción de naves y edificios industriales, presentado en la IX Asamblea Técnica Nacional de la ATEP los diferentes sistemas del grupo Rubiera para la construcción de edificios industriales. Haciendo una distinción por luces de vigas:

- Hasta 13 m: Vigas armadas.
- Hasta 21 m: Vigas armadas. Sección en T.
- Hasta 30 m: Sección doble T de inercia variable. Vigas pretensadas. Las pendientes del 5%.

Las secciones habituales en doble T, para luces hasta 30 m y secciones en T hasta 21 m, con separaciones de pórticos de hasta 6 m, con correas de sección rectangular y de 10 a 12 m, con correas de sección en T. Los paneles de fachada muestran secciones en U o TT, con nervios vistos hacia el exterior.

Figura 2.175. Realizaciones de nave con vigas peraltadas y paneles con nervios. Reproducida de Lozano G. (1979).

Respecto a los apoyos, plantea uniones húmedas pilar-viga y continuidad de correas, para el control de los esfuerzos horizontales. El empotramiento del pilar a cimentación mediante una conexión en pozo o cáliz.

Figura 2.176. Foto y esquema de empotramiento de pilares en cáliz en cimentación. Reproducida de Lozano G. (1979).

Figura 2.177. Esquema de uniones húmedas pilar-viga y continuidad de correas. Reproducida de Lozano G. (1979).

Dada la flexibilidad de los pilares largos y que soportan varios elementos, se recomienda hacer varios aplomados. En la actualidad lo habitual es: los pilares se montan, se aploman, se acuñan y se hormigonan.

Figura 2.178. Montaje de pilares y vigas. Reproducida de Lozano G. (1979).

Como se explica en los artículos, los procedimientos no ofrecen apenas novedades, queriendo profundizarse en las posibilidades del hormigón pretensado. Ciertamente desde entonces, hace ya 40 años, llevamos diciendo lo

mismo, pero sí que hay que reseñar cambios que por obvios nos pueden pasar desapercibidos:

- El traslado de la fabricación a instalaciones fijas progresivamente.
- Las uniones isostáticas siempre que las acciones lo permitan.
- El uso de correas tubulares.
- El mayor espaciamiento de pórticos.
- La desaparición de las placas de fibrocemento en las cubriciones de cubierta.
- La generalización del montaje con grúas móviles.
- El cambio de las condiciones de montaje, limitando al máximo las labores en obra y priorizando la seguridad de las operaciones.
- La normalización de los transportes por carretera por la mejora de las vías y de los camiones y plataformas.

Seguimos apuntando en estos años novedades, tal vez de menor calado, que por tenerlas a día de hoy siempre delante, parece que siempre estuvieron ahí.

Como vimos en las realizaciones, en Vilagut, F., **1975**, encontramos para resolver estructuras de luces medias, piezas de sección en T (preferible en hormigón armado) o doble T (preferible en hormigón pretensado) y para grandes luces, soluciones de hormigón armado y pretensado de arcos, cerchas de celosía, vigas de alma calada (montantes y diagonales), vigas tipo Vierendeel, placas HP de ancho 2,50 m y de 10 a 23,50 m de largo y espesor variable de 5 a 8 cm.

En Nissen, H., **1976**, en su Construcción industrializada y diseño modular, encontramos algunos ejemplos de tipologías de naves industriales con cubiertas realizadas con elementos prefabricados de hormigón. Son ejemplos de instalaciones estandarizadas de la firma danesa Hojgaard y Schultz, con pilares empotrados en cimentación, jácenas de hormigón y losas nervadas de cubierta. Vemos que los módulos de crecimiento de las naves 2,4 m y 4,8 m, marcan las

dimensiones finales, para encajar las cubriciones entre pórticos con placas de hormigón ligero, placas nervadas de hormigón y placas TT.

Figura 2.179. Instalaciones estandarizadas de la firma danesa Hojgaard y Schultz, módulos de crecimiento de las naves 2,4 m y 4,8 m. Reproducida de Nissen, H., (1976).

Ya se indica la tendencia de ir cada vez a vanos mayores, con sistemas de jácenas y pilares, con áreas de retícula o cuadrícula básica libres de 100 a 150 m², con clara tendencia a aumentar, para luces de vigas entre 10,00 y 25,00 m. Indica que con vigas de acero es posible llegar a luces de 40,00 m y con cerchas metálicas o de madera entre 50,00 y 70,00 m.

Röhm, W., **1977**, nos indica en su capítulo dedicado a la construcción de naves, que la altura de alero suele variar de 3,00 a 12,00 m, para luces de hasta 40 m dentro de soluciones económicas. La separación de vigas está en torno a los 6,00 m para colocar directamente sobre ella el forjado de cubierta, y si el forjado apoya sobre vigas transversales puede llegar a 10,00 m. Nos ofrece una recomendación para el uso de vigas T pretensadas, en el rango de 10,00-20,00 m, con relaciones canto/luz de 1/14 para 10,00 m de luz y 1/18 para 20,00 m de luz. Para una viga de 20,00 m, tendremos un canto de $20,00/18=1,11$ (tomaremos 1,15 si vamos de 5 en 5 ó 1,20 si vamos de 10 en 10 para predimensionar).

Figura 2.180. Relaciones canto/luz en vigas T pretensadas, en el rango de 10-20 m. Reproducida de Röhm, W.,(1977).

Para vigas doble T en hormigón pretensado, nos ofrece un rango de 20,00 a 40,00 m, con relación canto/luz de 1/20. Para una viga de 30,00 m, tendremos un canto de $30,00/20=1,50$ m.

El capítulo 11 dedicado a los costes, nos indica que en el año 1.973 se tomaba entre 23.000 y 25.000 pesetas por metro cúbico de volumen de hormigón de elemento prefabricado montado, es decir entre 138,23 y 150,26 € (1€ = 166,396 Ptas). Ya nos indica que hay algunas medidas que ayudan a economizar, como la modulación unitaria y repetitiva, con un replanteo uniforme de pilares y fachadas, y reducir al máximo las tipologías de elementos a emplear. Se habla de hormigones con resistencias muy heterogéneas, entre H-15 y H-55 Mpa.

En el capítulo 21, nos da pautas sobre el transporte normal: ancho menor a 2,50 y largo menor de 15,00 m, y especial para anchos 3,00-4,00 m (a partir de 3,00 m con acompañamiento policial), y largos de 15,00-40,00 (a partir de 19,00 m con acompañamiento policial) y montaje.

Hay un ejemplo que hemos visto en realizaciones y que presentaba, Atienza, J.R., **1989**, en su artículo sobre el sistema estructural prefabricado para la construcción de naves aporricadas de grandes dimensiones. Es el caso de un concurso para una estructura para el muelle de Levante del Puerto de Valencia. La estructura cubre una superficie de 45,00m x 135,00m y 8,00 m de altura libre, con vuelos laterales de 2,00m, sacados de los pilares. Al concurso se presentaron cuatro empresas, tres con soluciones metálicas y una con solución en hormigón, que fue la que ganó el concurso con el pórtico principal biarticulado de 45,00 m de luz. Los condicionantes del pliego, las condiciones propias del ambiente marino y la luz de 45,00 m, hicieron que la estructura óptima fuese una de hormigón fabricada en parque.

Respecto a los análisis de cálculo de los diferentes elementos, han seguido apareciendo mejoras dentro del ámbito del diseño y dimensionado de estas estructuras, como es el caso de Morán, F., **1994**, donde propone un dimensionamiento de pilares que salve las simplificaciones que pueden dejarlos del lado de la inseguridad, así como los métodos excesivamente conservadores. Se trabaja en teoría de segundo orden para pilares prefabricados de sección rectangular usados habitualmente en edificios industriales.

Figura 2.181. Definición de pilares prefabricados propuesta por Morán, F.

Reproducida de Morán, F. (1994).

En lo referente a los sistemas de uniones, queremos señalar aquí los trabajos de García, S., et al, 1996, con un estudio sobre el diseño de uniones prefabricadas viga-columna, haciendo especial énfasis al diseño y análisis de modelos de la unión sometida a acciones dinámicas de viento y sismo

Figura 2.182. Detalle constructivo de la unión viga-columna por encastre seca (izquierda) y unión por encastre modificada (derecha). Reproducida de García, S., et al, (1996).

Tanto en lo referente a las uniones, como a las mejoras e innovaciones producidas en el uso de los materiales, Maya, L.F, **2011**, hace un importante aporte con un estudio de estructuras de pórticos prefabricados con uniones basadas en hormigones con fibras, en el que considera que en las construcciones prefabricadas las conexiones representan un punto crítico, clave en el proceso de montaje o instalación, y que condiciona el comportamiento de la estructura. La línea de investigación estudió las uniones de continuidad entre elementos prefabricados, mediante el uso de los hormigones con fibras de muy alta resistencia (High Performance Fibre Reinforced Cement Composites, HPFRCC), realizando un análisis y evaluación concretos de las posibilidades en las uniones viga-pilar.

A nuestro humilde entender este estudio aborda dos de los grandes temas del futuro de la prefabricación, el análisis de las uniones, y la implementación de los avances de los materiales en soluciones concretas.

Araujo, R., **1996**, ya señala cómo aparece junto a la idea de prefabricación, de piezas lineales como pilares y vigas, la importancia de centrar los esfuerzos en el **modo de unión**. Con sistemas de uniones simplemente apoyadas se han alcanzado soluciones muy ingeniosas como la propuesta por Angelo Mangiarotti en los años 60 para un edificio industrial en Milán. Edificio de una sola planta, con elementos apoyados, estabilizado por su propio peso y el empotramiento de los pilares o pilas en la cimentación.

Figura 2.183. Detalle constructivo de la unión viga-columna unión simplemente apoyada propuesta por Angelo Mangiarotti en los años 60 para un edificio industrial en Milán. Reproducida de Araujo, R. (1996).

Araujo, R. (1996), también referencia los tipos de uniones en sistemas porticados sacados de Koncz, T., 1975, como un magnífico ejemplo de los tipos de conexiones habituales en las estructuras de pórticos, como las que son objeto de esta tesis, que veinte años después siguen estando conceptualmente vigentes, con algunas modificaciones o variantes de ejecución.

En la época, se reseñaba que las uniones más sencillas son las de apoyos sobre cartelas, regularizando los apoyos con morteros de nivelación o chapas metálicas. En la actualidad los apoyos isostáticos son mayoritariamente ejecutados con apoyos sobre neoprenos o neoprenos zunchados según la carga.

Figura 2.184. Detalle constructivo de tipos de uniones pilar-viga propuesta por Koncz, T., 1975. Reproducida de Araujo, R. (1996).

Burón, M., et al, **1997**, en sus artículos sobre la **prefabricación abierta y el programa de industrialización de edificios comerciales**, mediante elementos prefabricados, la definen como aquella que está al servicio de cualquier proyectista o constructor, posibilitando la libre combinación de los elementos prefabricados, en el proyecto y en la ejecución de la obra. Esto implica, la posibilidad de singularizar cada obra, combinando libremente elementos prefabricados, lo que exigirá un proyecto detallado en cada caso.

Es propio de este tipo de prefabricación que los elementos puedan desempeñar varias funciones, que sean aplicables a diferentes tipos de construcciones (naves logísticas, centros comerciales entre otras), capaces de resolver diferentes variantes (huecos, recogida de aguas...), y disponer de dimensiones según los requerimientos específicos del proyecto. La premisa de la modulación en la concepción del proyecto, como garantía de buena conexión entre elementos, y optimización de diseño, a través del módulo, retícula o **cuadrícula básica** como la definimos en la tesis, que es la unidad adoptada en cada diseño para definir el proyecto.

Calavera, J. et al., **1999**, es una monografía sobre prefabricación de edificios y naves industriales, en la que encontramos un estudio sobre las diferentes tipologías de cubiertas. Empezando por la que ahora predomina, que es la de vigas paralelas, de la que se nos dice que las vigas pueden ser armadas o pretensadas y que las secciones más utilizadas son en T, rectangular y doble T, tanto en canto constante como variable.

En la figura siguiente podemos ver estructuras de pórticos donde sitúa la luz máxima en los 40 m, con separación de pórticos o luz de correa máxima de 10 m (figura a) y el caso de naves con vigas de cubierta en dos direcciones, por ejemplo placa T ó TT en una dirección alcanzando un máximo de 35 m y vigas secundarias en T, doble T o rectangulares en la otra hasta 20 m (figura b).

Figura 2.185. Esquema de naves con vigas peraltadas y con vigas de sección constante y placas TT. Nave de pórticos con vigas de sección constante y peraltadas de PACADAR. Reproducida de Calavera, J. et al., 1999.

Respecto a otras tipologías, encontramos naves de pórticos con luces habituales entre 12 y 18 m, con 6 m de separación de pórticos y una altura hasta 8 m. Naves de cerchas habituales en hormigón armado, con el cordón inferior armado, pretensado o formado por un tirante de acero. Naves de arcos, hasta luces del orden de los 30 m, con o sin tirantes. La altura de la flecha suele ser del orden de $1/5$ de la luz, para separaciones entre arcos en torno a los 6 m. Las naves en diente de sierra, la forman alineaciones de vigas sobre las que apoyan en su dirección perpendicular los dientes de sierra. Son habituales separaciones de vigas del orden de los 10 m y una luz de viga variable en función del tipo empleado.

En las naves de placas en cubierta, estas suelen apoyar sobre los paneles o muros de cerramiento, con formas en TT, T, ó U. En las naves de láminas, la forma puede ser muy variada y formada por superficies desarrollables. Dada la complejidad, se usan para grandes luces y superficies (hangares), y la prefabricación suele desarrollarse a pie de obra.

Figura 2.186. Esquema cubierta con cerchas y pares y tirantes (superior). Foto de cerchas de PACADAR, arcos de CADE y esquema en dientes de sierra (medio). Esquema de cubiertas laminares (inferior). Reproducida de Calavera, J. et al., 1999.

Aunque nosotros nos vamos a centrar en estructuras de una única planta y nudos articulados en la conexión viga-pilar, es interesante reseñar aquí otras soluciones sobre estructuras prefabricadas de nudos rígidos, como nos cuentan Burón, M. & et al., **2000** y Burón, M. & et al., 1995, donde nos hablan sobre la importancia que tienen las conexiones rígidas, especialmente en edificios de varias plantas, donde podemos tener esfuerzos horizontales considerables, y que tenemos que controlar en la mayoría de los casos sin la colaboración de núcleos rígidos, y con la presencia de juntas en las estructuras, y luces y sobrecargas importantes. Para el dimensionado de los pilares, y dado los grandes axiles, será muy importante controlar su longitud de pandeo y el grado de translacionalidad global de la estructura, siendo requerida la utilización de nudos rígidos para poder limitar las secciones, adaptándonos a las dimensiones requeridas, como en el ejemplo mostrado del Centro Comercial Continente en Aluche-Madrid, como vimos en la Figura 2.95 en este Capítulo 2.

El análisis realizado por Sánchez Hurtado, J.F., **2010**, sobre paneles prefabricados de hormigón en fachadas, ya nos advierte que actualmente existen pocos documentos publicados sobre el tema, y aprecia una industria que parte con un gran desamparo teórico y experimental. Este estudio se ofrece como referencia a la hora de tomar decisiones para usar el sistema de fachadas prefabricadas de hormigón, y conocer las consideraciones de diseño.

En Bachmann, H., **2011**, en el apartado correspondiente a vigas de cubierta, plantea diferentes alternativas de vigas, dando referencias de vigas en T, y doble T de anchos inferior y superior diferentes. En el apartado de conexiones encontramos un detalle de conexión de correa maciza.

Figura 2.187. Soluciones de vigas de cubierta. Reproducida de Bachmann, H., 2011.

Figura 2.188. Secciones de vigas de cubierta I y T. Reproducida de Bachmann, H.,2011.

En las referencias sobre pilares, empieza con secciones mínimas de 200 x 300 mm. En España en edificación industrial, hemos visto que el valor mínimo habitual, exceptuando pórticos ganaderos y estructuras de pequeña entidad, es la sección de 400 x 400 mm.

Figura 2.189. Secciones de pilares. Reproducida de Bachmann, H.,2011.

En el apartado de paneles de fachada, encontramos un ilustrativo gráfico de los factores climáticos y funciones del cerramiento de fachada, así como un esquema de los tipos de configuraciones de fachada.

Figura 2.190. Factores climáticos y funciones del cerramiento de fachada.

Reproducida de Bachmann, H.,2011.

Figura 2.191. Esquema de diferentes configuraciones del cerramiento de fachada. Reproducida de Bachmann, H., 2011.

En el libro sobre prefabricación de Díaz, E., 2010, encontramos referencias a las longitudes de vigas delta entre 8,00-35,00 m, jácenas I entre 10,00-35,00 m y correas tubulares entre 8,00-12,00 m. También hallamos un análisis de ventajas y desventajas de la prefabricación, consideraciones de diseño, análisis de sistema estructurales mediante pórticos y estudio de elementos de cubierta y fachadas.

Díaz, A., 2011, en su libro sobre el concepto de prefabricación en Le Corbusier, da algunas pautas del pensamiento: como que la prefabricación impone un lenguaje, la importancia de las juntas en su definición visual, y cómo siente la prefabricación al servicio de la arquitectura, adaptándose con los avances que se van produciendo.

En Le Corbusier, 2016, Hacia una arquitectura (Vers une architecture, 1923) se nos dice: *“Hay que crear el estado de espíritu de la serie. El estado de espíritu de construir casas en serie. El estado de espíritu de habitar casas en serie. El estado de espíritu de concebir casas en serie”*.

Aunque no es el objeto de esta tesis, en el análisis global de la optimización, nos parece muy importante destacar los esfuerzos en reseñar la importancia del vínculo en el diseño entre el proyectista y las empresas de prefabricados, para

maximizar la flexibilidad del diseño, unificando elementos y teniendo en cuenta las limitaciones de producción como nos muestra Khalili, A. et al., 2014; donde se incide en la **optimización de recursos de la producción prefabricada**, mediante configuración integrada de prefabricación y agrupación de componentes. Mediante el uso de matrices de adaptabilidad de moldes y optimización de recursos por agrupación, nos reseña reducciones de los costes en un 13%. En este artículo encontraremos muchas referencias a estudios de optimización de la planificación en prefabricación.

También resultan muy interesantes los trabajos sobre **estandarización de edificios industriales**, destacando el de O'Connor, J. T. et al, 2015; en el que trabajan sobre las ventajas e inconvenientes de la estandarización de modelos de diseño y la influencia de la modularización.

Figura 2.192. Dos enfoques para integrar la estandarización del diseño con la modularización. Reproducida de O'Connor, J.T., 2015.

Realiza un análisis gráfico en la Figura 2.193, de cómo ve los niveles alcanzados actualmente en cuanto a estandarización y modularización en el sector de la construcción actual, en función del tipo de construcción. En la Figura 2.194 hace un análisis de costes-beneficios del enfoque modular estandarizado de plantas.

Figura 2.193. Modularización versus estandarización: niveles aproximados del sector actual. Reproducida de O'Connor, J.T. (2015).

Figura 2.194. Costes y beneficios del enfoque modular estandarizado de plantas (MSP). Reproducida de O'Connor, J.T. (2015).

En Ching, F.D.K., et al, 2014, para estructuras con grandes luces que podemos ver en la Figura 2.195, a nivel de vigas de hormigón, refleja las vigas prefabricadas pretensadas en sección en doble T hasta luces de 22 m y las de sección en T hasta 30 m o más.

También incide en la importancia para el proyecto de la elección de una retícula estructural adecuada. Dentro del análisis de diferentes retículas, se señala lo adecuado de retículas rectangulares, cuando una dirección domina claramente sobre la otra, donde habrá que analizar proporciones, dimensiones, escala, ajuste espacial, como vemos en la Figura 2.196.

Figura 2.195. Estructuras de grandes luces. Reproducida de Ching, F.D.K. (2014).

Figura 2.196. Planteamientos de retícula estructural. Reproducida de Ching, F.D.K. (2014).

Engel, H., 2018, en su *Sistemas de estructuras*, en el apartado dedicado a los sistemas de estructuras, presenta diferentes tipologías; vigas, pórtico, retícula y losas. En el apartado de estructuras de vigas, encontramos el uso de vigas armadas para un solo vano en el rango de uso hasta los 15,00 m, y para vigas continuas pretensadas en un rango de hasta los 30,00 m, como vemos en la Figura 2.197.

Sistema estructural / Sistema de estruturas		Material básico	Matéria prima	Luz en metros / Vãos em metros																			
				0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	400	500		
Estructuras de VIGAS	<div>3.1</div> <div>Sistemas de VIGAS</div>		madera metal (acero) hormigón armado	madeira metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>4</div><div>8</div><div>12</div></div>	<div><div></div><div>5</div><div>7</div><div>20</div><div>25</div></div>	<div><div></div><div>4</div><div>10</div><div>15</div></div>																
			madera laminada metal (acero) hormigón armado pretensado	madeira metal (aço) concreto protendido	<div><div></div><div>7</div><div>10</div><div>20</div><div>25</div><div>30</div><div>35</div></div>	<div><div></div><div>5</div><div>8</div><div>25</div><div>30</div></div>	<div><div></div><div>7</div><div>10</div><div>25</div><div>30</div></div>																
			madera metal (acero) hormigón armado	madeira metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>4</div><div>8</div><div>12</div></div>	<div><div></div><div>5</div><div>7</div><div>20</div><div>25</div></div>	<div><div></div><div>4</div><div>8</div><div>12</div></div>																
Estructuras de PÓRTICOS	<div>3.2</div> <div>Sistemas de PÓRTICOS</div>		madera laminada metal (acero) hormigón armado	madeira laminada metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>40</div><div>50</div></div>	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>60</div><div>80</div></div>	<div><div></div><div>7</div><div>10</div><div>25</div><div>30</div></div>																
			madera laminada metal (acero) hormigón armado	madeira laminada metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>45</div><div>55</div></div>	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>65</div><div>85</div></div>	<div><div></div><div>8</div><div>10</div><div>25</div><div>35</div></div>																
			madera laminada metal (acero) hormigón armado	madeira laminada metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>15</div><div>20</div><div>50</div><div>60</div></div>	<div><div></div><div>15</div><div>20</div><div>70</div><div>90</div></div>	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>40</div></div>																
Estructuras de RETÍCULA DE VIGAS	<div>3.3</div> <div>Sistemas de MALHA DE VIGAS</div>		madera laminada metal (acero) hormigón armado	madeira laminada metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>10</div><div>12</div><div>25</div><div>30</div></div>	<div><div></div><div>10</div><div>12</div><div>25</div><div>30</div></div>	<div><div></div><div>5</div><div>8</div><div>10</div><div>20</div></div>																
			madera laminada metal (acero) hormigón armado	madeira laminada metal (aço) concreto armado	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>40</div><div>55</div></div>	<div><div></div><div>10</div><div>15</div><div>40</div><div>55</div></div>	<div><div></div><div>5</div><div>8</div><div>20</div><div>25</div></div>																
			madera laminada hormigón armado	madeira laminada concreto armado	<div><div></div><div>8</div><div>10</div><div>20</div><div>25</div></div>	<div><div></div><div>5</div><div>8</div><div>15</div><div>18</div></div>																	
Estructuras de LOSAS	<div>3.4</div> <div>Sistemas de LAJES</div>		madera (tablones) hormigón armado	pranchas de madeira concreto armado	<div><div></div><div>0</div><div>5</div><div>6</div></div>	<div><div></div><div>0</div><div>6</div><div>6</div></div>																	
			hormigón armado	concreto armado	<div><div></div><div>5</div><div>7</div><div>15</div><div>20</div></div>																		
			hormigón armado	concreto armado	<div><div></div><div>5</div><div>4</div><div>9</div><div>12</div></div>																		

A cada tipo de estructura le corresponde un estado de tensiones específico en cada uno de sus componentes. De aquí se desprenden unas condiciones vinculantes en la elección del material básico de construcción y en las luces que pueden alcanzarse.

Para cada tipo de estrutura há uma condição inerente de tensão específica de seus componentes. Essa característica essencial submete o projeto das estruturas à associações racionais na escolha do tecido da estrutura principal, e na atribuição da capacidade de vão.

Figura 2.197. Sistemas de estructuras. Reproducida de Engel, H. (2018).

Incluimos una tabla resumen simplificada de las diferentes aportaciones publicadas a lo largo de los años, en lo referente a longitudes de vigas y correas para la construcción de edificios de prefabricados de planta única y grandes luces:

Tabla 2.11. Tabla resumen simplificada de diferentes elementos estructurales para estructuras de cubiertas y longitudes máximas, mínimas y óptimas propuestas.

Autor	año	Tipología	Lmín	Lópt	Lmáx	Correa	Lmín	Lópt	Lmáx
Koncz, T.	1968	Vigas	12,00		30,00	Maciza	5,00	7,50	10,00
		Celosías	24,00		60,00				
		Arcos	30,00		60,00				
		Placa TT			35,00				
		Placa T			15,00				
		V. hueca	20,00		35,00				
		Plegada	20,00		30,00				
		Cáscara			20,00				
F.Ordóñez, J.A.	1974	Vigas	12,00		30,00	Correas		6,00	
		Postesadas	20,00		40,00				
		Celosías	20,00		40,00				
		Arcos	20,00		50,00				
Nissen, H.	1976	Vigas	10,00		25,00				
Walter, R.	1977	Vigas			40,00	Correas			6,00
Lozano, G.	1979	Jácnas I	13,00		30,00	Rectangular			6,00
		Viga T			21,00	Sección T	10,00		12,00
Calavera, J.	1999	Vigas			40,00	Correas			10,00
		Placa T/TT			35,00				
		Pórticos	12,00		18,00				
		Arcos			30,00				
Díaz, E.	2010	Deltas	8,00		35,00	Tubular	8,00		12,00
		Jácnas I	10,00		35,00				
Ching, F.D.K	2014	Jácnas I			22,00				
		Placa T			40,00				
Engel, H	2018	Viga armada	4,00	10,00	15,00				

Hemos visto cómo hemos llegado al predominio actual de las secciones doble T para vigas, pues trabajando a flexión presentan un alto grado de eficacia, entre el momento admitido y su peso propio. La inercia aumenta con la distancia al eje al cuadrado, cuanto más alejemos la masa del centro, más eficaces en flexión son los elementos.

Respecto al predominio actual de las correas tubulares, nos permiten alcanzar grandes luces, con una sección eficaz por peso y por la forma de tubo rectangular, la cual le confiere capacidad transversal y estabilidad en la fase de montaje, aumentando considerablemente la longitud de uso de soluciones de las viguetas tradicionales.

Los paneles prefabricados de fachada, con sus diferentes composiciones y posibilidades de acabados superficiales y texturas, se integran para conformar una solución para los edificios industriales de planta única y grandes luces para solucionar cubiertas ligeras, conformada por una estructura con pilares, vigas doble T de canto constante o variable (δ), correas y paneles de fachada prefabricados.

Capítulo 3

Plan de investigación: Análisis de tipologías, variables de diseño y geométricas. Fichas de estructuras y base de datos.

3.1 Introducción.

La presente tesis se articula en torno a un plan de investigación que permita progresar en el conocimiento para el diseño y optimización de la construcción de edificios industriales de hormigón prefabricado. Hemos considerado dos aspectos fundamentales: la estructura (incluyendo la tipología estructural, los elementos y su disposición en el edificio) y el cerramiento de fachada, cuando este se realiza también con hormigón prefabricado.

Para la optimización de las estructuras, partimos de la realización de una base de datos que nos permite observar tendencias en la construcción de estos edificios industriales, luces habituales y proporciones luz-canto. La base de datos se explica en este capítulo 3.

Para la construcción de la base de datos, empezaremos por identificar y clasificar los sistemas y las tipologías estructurales, para centrarnos, dentro de los edificios prefabricados, en **los edificios industriales (según definición IECA-ANDECE, 1996) de una sola planta para salvar grandes luces** con tipologías de estructuras de cubierta ligera de hormigón prefabricado y en los cerramientos de fachada. Estos edificios también son llamados habitualmente naves industriales y **conforman el perímetro del estudio**.

Para ello realizaremos una presentación de los modelos y tipologías a analizar y exponemos las condiciones de contorno intervinientes en el diseño de edificio, para posteriormente pasar a definir los parámetros y variables por tipología de estudio.

Una vez definidos los parámetros y variables, realizaremos un esquema de cada tipología que nos servirá de base para el análisis de los proyectos constructivos. Para cada proyecto se elaborará una ficha de cada estructura, incluyendo las variables geométricas de longitudes, cantos y secciones, así como las cargas de diseño, para que nos sirva de soporte para elaborar la base de datos de la tesis.

El objetivo de este capítulo es ordenar y estructurar en una hoja de cálculo, la base de datos de los proyectos seleccionados, para posteriormente en el capítulo 4, avanzar en su análisis estadístico y en las propuestas de optimización.

En el capítulo 4 se encuentra la investigación de optimización propiamente dicha, centrada en cuadrículas básicas de estructura.

El capítulo 5 estudia los cerramientos de fachada en términos de optimización tanto termoacústica como a nivel de ratio de fachada construida. Se trata de parámetros íntimamente relacionados, ya que el menor ratio de fachadas tiene una repercusión positiva en el intercambio térmico y acústico con el exterior, al tiempo que permite una optimización de costes.

Con los datos obtenidos de la investigación en cuadrículas básicas de estructura y de la repercusión de los cerramientos, realizamos una extensión de la optimización en el capítulo 6, donde pasamos a contemplar edificios completos analizando la repercusión de estructura y fachada al gasto total, en función de la forma en planta en planta del edificio y de su altura.

Las propuestas de optimización más actualizadas y que nos servirán de referencia, son las que describe el boletín 74 de la FIB, Planning and design handbook on precast building structures de 2014, que supone una evolución del FIP-Manual de estructuras de edificación prefabricadas, publicado en España en 1996. También se han encontrado referencias de rangos de luces recomendadas en el Manual de Edificación con prefabricados de hormigón de IECA-ANDECE de 1996.

3.2 Clasificación general de sistemas estructurales en edificios prefabricados en función de la tipología de los elementos y del tipo de uniones.

Si se analizan los edificios desde el punto de vista de la bibliografía existente podemos encontrar diferentes sistemas, y para cada uno de ellos los principios de diseño son los mismos independientemente del fabricante. Por este motivo, se hace necesario repasar aquí los sistemas estructurales **por tipologías de elementos constructivos intervinientes y por tipos de sistemas de unión**, para facilitar la tarea al proyectista, objetivo de la presente investigación. Para esta clasificación, trabajaremos con información aportada por los manuales y guías de diseño reseñados: FIB Bulletin 74, 2014, ACHE E-10, 2004, FIP-ATEP, 1996 e IECA-ANDECE, 1996.

3.2.1 Clasificación general de tipologías por elementos constructivos.

Siguiendo con las recomendaciones de los manuales y guías de diseño mencionados, puede hacerse una primera clasificación de las estructuras prefabricadas, **en función del sistema estructural al que responden**, la tipología de elementos constructivos para cubrir las necesidades de diseño marcadas por la geometría y las cargas actuantes.

Vamos a plantear una primera clasificación de los sistemas, teniendo en cuenta que muchos se pueden combinar dentro de un mismo edificio:

- **Estructuras de esqueleto con pórticos o sistema de pórticos:**
Las que de forma habitual el sector denomina “estructuras de pórticos o cubiertas ligeras”.
 - Compuestas por pilares, vigas principales y vigas secundarias o correas.
 - Adecuadas para resolver cubiertas con grandes luces, y obtener grandes superficies libres de pilares y muros, en edificios industriales y comerciales.
 - Construyen cubiertas o tejados para proteger de la entrada de agua, que deben resistir las cargas de viento y nieve, generalmente solo accesibles para mantenimiento.
 - Preparadas para soportar su peso propio, cargas de nieve y viento, pequeñas sobrecargas de instalaciones y unas sobrecarga de uso normativa CTE, para categoría G/ subcategoría G1, cubiertas ligeras sobre correas, de $0,4 \text{ kN/m}^2$ / $1,0 \text{ kN}$, no concomitante con el resto de acciones variables.
- **Estructuras de esqueleto con entramado:** El sector habitualmente las denomina como “entramados o forjados”.
 - Compuestas por pilares, vigas de forjado y placas alveolares habitualmente.

- Son adecuados para resolver cubiertas de gran carga o terrazas, plantas intermedias, oficinas, aparcamientos. Construyen zonas habitables y transitables, por lo que deben soportar una sobrecarga según su uso.
- A parte de su peso propio, son valores habituales de carga muerta de 1,0 a 3,0 kN/m² y sobrecargas según normativa, uso o especificación de 2,0 a 20,0 kN/m².
- **Muros de carga:**
 - Compuestos por muros de carga macizos y placas alveolares.
 - Los muros de hormigón prefabricado sustituyen a la solución clásica de muros de mampostería de ladrillo.
 - Son de uso en viviendas y edificios de oficinas.
- **Sistemas celulares:** Llamados también en el sector “estructuras modulares”.
 - Conformados por células que resuelven pequeñas zonas completas con paredes, suelo y techo de un edificio.
 - Son de uso para resolver zonas de viviendas y en casetas, y rara vez se aplican a grandes edificios industriales.
- **Fachadas resistentes:** También denominadas “paneles de carga”.
 - Se pueden considerar una variante de los muros de carga, con el valor añadido de quedar vistos en fachada.
 - El sistema está conformado por paneles macizos de hormigón y placas alveolares.
- **Fachadas de cerramiento:** denominados habitualmente “paneles de fachada o cerramiento de panel prefabricado”.
 - El sistema lo forman exclusivamente los paneles de hormigón, y tiene una función de cerramiento, aislamiento y acabado estético del edificio, no soportando cargas verticales de forjados ni de cubierta, más allá de su peso propio (autoportantes).

3.2.2 Clasificación general de tipologías por conexiones de los sistemas constructivos.

Estos sistemas se definirán a su vez **por el tipo de conexión (sistema de unión) elegida para la unión de las piezas prefabricadas**, y la conformación o no de núcleos rígidos, que tendrá una gran relevancia en su comportamiento, especialmente frente a acciones horizontales.

- **Sistema traslacional con nudos articulados:** Es habitual hablar en el sector de sistema “simplemente apoyado o isostático”.
 - El sistema consiste en pilares empotrados en cimentación trabajando en ménsula, con vigas biapoyadas generando nudos articulados.
 - Las uniones pilar-viga no transmiten momentos flectores y por lo tanto los nudos se consideran articulados.
 - Es la solución más habitual en estructuras prefabricadas de una o dos plantas, y ofrece simplicidad y rapidez de montaje.
 - La viabilidad del sistema está condicionada al control de deformaciones en pilares por esfuerzos horizontales, y a la ubicación del edificio en zona no sísmica.
 - Los nudos entrarían en la denominación de juntas secas.
 - Se confiere un sistema totalmente autoportante donde no es necesario la presencia de apuntalamientos en la fase de montaje.

- **Sistema traslacional con nudos rígidos:** Es habitual hablar en el sector de “nudos rígidos o sistema hiperestático”.
 - El sistema consiste en pilares empotrados en cimentación, e interrumpidos en su longitud con vigas principales, conectadas mediante nudos rígidos generando nudos empotrados.
 - Las uniones pilar-viga son capaces de transmitir el momento flector total o parcialmente, dando una continuidad estructural a través de los nudos.

- La estructura trabaja como hiperestática.
 - Es la solución utilizada para mejorar la deformabilidad de la estructura, y es de uso habitual en zonas sísmicas, en casos donde sea necesario reducir las secciones de pilares, y en edificios en altura de normalmente hasta 5 plantas.
 - El sistema de montaje es más lento y complejo al estar condicionado por la ejecución en obra del nudo (ferrallado y relleno con grout) . Aumento de coste y plazo.
 - Si el sistema se diseña autoportante, hay que definir bien las entregas de las vigas en los apoyos, para que se pueda trabajar con seguridad en la fase de montaje.
 - Los nudos entrarían en la denominación de juntas húmedas.
- **Sistemas intraslacionales:** También denominados “Sistema de pantallas o núcleos rígidos”.
 - Este tipo de sistema añade, a alguna de las configuraciones anteriores, la construcción de un núcleo o pantalla anclado a cimentación, y que ofrece una zona poco deformable frente a esfuerzos horizontales. Por lo tanto, este sistema se puede dar combinado con nudos rígidos o nudos articulados, estando indicado para zonas de alta sismicidad y edificios de gran altura (mayor a seis plantas).
 - Para la conformación de las pantallas puede contar con muros in situ o elementos prefabricados unidos rígidamente.
 - Una definición habitualmente utilizada, es que una estructura puede clasificarse como intraslacional, cuando su rigidez lateral es suficiente para que la influencia de los efectos de segundo orden pueda ser considerada despreciable en su respuesta estructural, cuyo análisis global puede realizarse según la teoría en primer orden.

3.3 Clasificación de las tipologías de estructuras de hormigón prefabricado en edificación industrial objeto de investigación.

Vamos a centrar el estudio en los **edificios industriales**, que tienen usos como naves industriales, taller, parque de medianas, almacén, centro logístico, centro de distribución, cross-docking, centro comercial, al ser de los que tienen una mayor proliferación de todas las estructuras de edificación construidas con hormigón prefabricado en España.

Por lo tanto, según se ha indicado **el perímetro de estudio quedará enclavado en los edificios prefabricados que denominaremos edificios industriales o naves industriales, con una sola planta y vigas de gran luz habitualmente.**

Estas estructuras están conformadas por los siguientes elementos prefabricados de hormigón: los pilares, las vigas de cubierta, las correas de cubierta y las fachadas, que en un gran número de casos son de panel de hormigón.

Estos edificios están contruidos con estructuras de esqueleto de pórticos para cubierta ligera, en el interior pueden tener una pequeña superficie, normalmente en torno al 10-15%, de entreplantas para almacén y oficinas contruidas con entramados de forjado alveolar, **y las fachadas suelen están conformadas por paneles de cerramiento en su totalidad o en parte de la superficie de fachada.**

Hemos visto que podemos encontrar multitud de soluciones estructurales en hormigón prefabricado, para resolver los retos o necesidades que se nos presentan. Partimos de la base de que, para unas mismas necesidades y requerimientos, tenemos varias soluciones posibles. Se observa en la bibliografía presentada en el Capítulo 2 y en la búsqueda de proyectos para elaborar la base de datos, que el sistema más extendido para resolver edificios industriales de planta única y grandes luces, siempre que las condiciones de ubicación (sismo),

geometría (altura) y cargas actuantes lo permitan, es el de **estructuras de esqueleto de pórticos traslacionales con nudos articulados**.

Las dos **tipologías principales** que suelen emplearse en los edificios industriales reseñados son:

Tabla 3.1. Tipologías principales objeto de investigación en edificios industriales de planta única y vigas de gran luz con prefabricados de hormigón.

Tipología	Solución estructural	Elementos principales
1. Cubierta Ligera	Estructura porticada	Pilares + vigas de cubierta + correas
2. Paneles	Cerramiento de fachada	Paneles prefabricados de hormigón

La presente investigación se orienta a los edificios industriales contruidos con la tipología de cubiertas ligeras y paneles de hormigón autoportantes para conformar las fachadas del edificio. No se contemplan los forjados intervinientes como tipología auxiliar para resolver pequeñas zonas dentro del edificio (altillos, oficinas, cuartos auxiliares), con estructuras de entramado con pilares, vigas de forjado y losas o placas alveolares.

Los edificios estudiados se han seleccionado para permitir la comparación, con ubicación en zonas de sismicidad baja o nula, y con unas alturas de pilares que permitan ir en todos los casos a un sistema de vigas biapoyadas de forma isostática, con uniones articuladas en los apoyos, correspondientes al sistema previamente definido como pórticos traslacionales con nudos pilar-viga articulados.

Los pilares en todos los casos se consideran empotrados en cimentación mediante cáliz a efectos de esta tesis.

3.3.1 Hipótesis de diseño del modelo estructural

Para la construcción de edificios industriales de planta única y grandes luces, para conformar cubiertas ligeras, se utilizan habitualmente y siempre que las acciones, ubicación y geometría lo permitan, **sistemas de pórticos** formados por pilares y vigas principales (viga delta y vigas I), con uniones que conforman un **sistema traslacional con nudos articulados**. Entre pórtico y pórtico, se colocan las correas biapoyadas sobre las vigas.

Es habitual, el diseño con **pilares trabajando en ménsula**, empotrados en cimentación, y ejerciendo de elemento estabilizador en la estructura de pórticos. Los pilares resistirán en ménsula tanto los momentos generados por el apoyo excéntrico de las vigas apoyadas, como los esfuerzos horizontales de viento (en nuestros casos de estudio).

Para los **testeros de los edificios, es habitual disponer de vigas de hastial de menor longitud y pilares intermedios**, para repartir adecuadamente las acciones de viento sobre ellos. Ya vemos que será importante en la optimización que trabajen en la estabilización los pilares interiores, bien por medio de conexiones correa-viga estudiadas a tal efecto o con arriostramiento diagonales en los pórticos exteriores que ayuden en la transmisión de los esfuerzos correspondientes.

Las vigas serán de sección doble T, de canto constante y variable, con **uniones articuladas viga-pilar**, siendo lo más habitual que las vigas vayan apoyadas sobre neoprenos o neoprenos zunchados según la carga, y conformar la unión con un sistema de vaina y varilla ó pernos.

Las correas apoyadas sobre la viga, también llevarán un sistema de atado a la misma a efecto de succión de viento, y la definición de esta conexión tendrá importancia en el comportamiento del modelo a efecto de reparto de cargas sobre los pilares.

Ya vemos que las conexiones son una parte primordial del sistema estructural, para transmitir las acciones a la estructura estabilizante y como ya

hemos visto las compresiones se transmiten a través de neoprenos y las fuerzas horizontales por efecto pasador de las barras de acero.

Los elementos prefabricados conformarán una estructura evolutiva, y tendremos que prestar atención a las cuatro etapas del proceso constructivo: fabricación (desmoldeo/acopio), transporte, montaje y servicio.

3.3.2 Tipología de pórticos-cubiertas ligeras.

A partir de ahora, siempre que se hable en la presente investigación de pórticos, nos estaremos refiriendo a pórticos traslacionales con nudos articulados.

A la vista de los edificios industriales estudiados, puede afirmarse que se trata de la tipología más extendida, y está presente en el 100% de los casos de los edificios industriales de planta única y grandes luces analizados en esta tesis. La encontramos en casi la totalidad de naves industriales, almacenes y centros comerciales, siempre que las condiciones de geometría y carga actuante lo permitan. Como ya hemos comentado, sirve para salvar grandes luces y dejar superficies entre los 200 - 300 m² o más, sin pilares intermedios.

En la Figura 3.1 podemos ver un diseño de un edificio industrial con estructura de cubierta ligera: pilares, vigas I principales y correas tubulares.

Figura 3.1. Perspectiva del interior de una estructura de pórticos para cubierta ligera.

3.3.2.1 Principales usos y características de edificios con la tipología de pórticos-cubierta ligera.

La solución de pórticos o estructuras con cubierta ligera es de aplicación habitual en los edificios industriales de:

- Almacenes
- Naves industriales en general
- Centros o naves logísticas
- Granjas o naves ganaderas
- Hangares
- Bodegas
- Centros comerciales
- Polideportivos

Las principales características de esta tipología, conforme a una primera observación de los datos recopilados, son:

- Sirve para cerrar espacios amplios, cubiertos y protegidos de las inclemencias meteorológicas. Por ello se conforman con cubiertas ligeras, no transitables, cuya función principal es la cubrición de superficies.
- Es práctica para resolver grandes luces.
- Permite tener pocos pilares intermedios.
- Geometría de la estructura:
 - Luces de Viga principal: de 5,00 m a 50,00 m.
 - Cantos de Viga principal: de 0,40 m a 3,00 m
 - Luces de vigas secundarias: 5,00 m a 12,00 m (Correa tubular)

3.3.2.2 Piezas prefabricadas en la tipología de pórticos-cubierta ligera.

Las piezas prefabricadas que intervienen para conformar esta tipología son; pilares, vigas o jácenas principales, y vigas secundarias o correas. Vamos a definir estas piezas en lo referente a su tipo de armadura, su posición de montaje, su tipo de uniones, secciones.

Tabla 3.2. Tabla de elementos estructurales que conforman una cubierta ligera.

Elemento estructural	Esquema	Sección
Pilares		Rectangular o cuadrada. Sección transversal constante (más habitual) o variable.
Vigas delta		Doble T. Canto variable.
Vigas I		Doble T. Canto constante.
Correas		Tubular. Canto constante.

- **Pilares:**

- Tienen habitualmente solo armadura pasiva: piezas armadas. Excepcionalmente, por necesidades de gran longitud o trabajo sin vigas en cabeza, se pueden desarrollar pilares también con armadura activa o piezas pretensadas.
- Posición vertical de montaje.
- Unión empotrada a cimentación. Las uniones más habituales son mediante cáliz o cajón, mediante vainas o ductos y mediante tornillos de anclaje (p.ej. sistema Peikko). Esta unión requiere el relleno en obra normalmente con un mortero u hormigón para conformar el empotramiento (según 3.5.3.1, ACHE E-10, 2004).
- Resto de uniones: articuladas con apoyos sobre elementos elastómeros o neoprenos (edificios traslacionales con uniones articuladas en estructuras estudiadas en esta tesis).
- Longitud habitual en sistemas traslacionales de nudos articulados entre 4,00 y 12,00 m de altura libre, dando longitudes totales aproximadas de pilar de 5,30 y 15,80 m.
- Secciones: habitualmente rectangulares o cuadradas y con una dimensión mínima de 40 cm. Lo más general es su construcción en sección constante, aunque por motivos arquitectónicos o en pilares de gran longitud y/o grandes cargas, es posible ejecutarlos con sección variable.
- Fabricación en molde.
- Pilares continuos de un solo tramo es lo más habitual, aunque también encontramos edificios contruidos con pilares en varios tramos con conexión húmeda en obra (vainas + armadura + *grout* o unión atornillada + *grout*)

Figura 3.2. Montaje de pilares en edificio industrial.

- **Vigas principales de cubierta:**

Las vigas principales son las que, junto a dos pilares colocados en sus extremos, definen el pórtico tipo del edificio.

- Encontramos múltiples tipos, de los que definiremos aquí cinco sub-tipologías en función del tipo de viga: Vigas peraltadas o delta, vigas I, vigas en T, vigas Y, V o canal y vigas *boomerang*.
 - Vigas delta: Sección doble T de canto variable. La viga da la pendiente de la cubierta.
 - Vigas I: Sección doble T de canto constante. La inclinación de la viga, por apoyo en pilares a diferente cota, da la pendiente de la cubierta.
 - Vigas en simple T de sección constante: De uso habitual para vigas cortas o vigas de testero.
 - Vigas Y, V o canal de sección constante: La inclinación de la viga marca la zona de desagüe. No llevan correas. Van con chapa curva. Según su replanteo, y si este no coincide con

la posición de los pilares, será necesario colocar vigas cargadero o salvapilar para su apoyo.

- Vigas *boomerang* para pórticos articulados y soluciones rígidas pilar-dintel. La pendiente la da la inclinación del dintel unido rígidamente al pilar. El sistema lleva correas y en la actualidad es casi de uso exclusivo en edificios de pequeña altura, en granjas y explotaciones agrícolas.
- Tienen armadura pasiva y activa: piezas pretensadas. Excepcionalmente en vigas cortas, y en vigas de hastiales o testeros podemos encontrar piezas armadas.
- Posición horizontal de montaje en vigas peraltadas, y con pendiente en vigas I o con sección doble T.
- Pendiente: Vigas deltas o peraltadas con pendientes entre 6-12% en función del molde. En las vigas planas o Jácenas I o doble T, la pendiente se da modificando su cota de apoyo en los pilares.
- Uniones: vigas simplemente apoyadas sobre elementos elastómeros o neoprenos (edificios traslacionales con uniones articuladas). Sin transmisión de momentos.
- Secciones: habitualmente en doble T y con un canto entre los 0,40 y 3,00 m. Sección variable en vigas peraltadas y constante en vigas doble T.
- Fabricación en molde y en pistas, o bancos de pretensado.
- Aparece el concepto de pérdida de pista: Los cables se anclan en las cabezas de principio y fin de la pista. Si no completamos la pista con moldes de fabricación (medidas habituales entre los 60 a los 150 m) se producirá un desperdicio de cable de pretensado.
- Las vigas de hastial o testero serán más cortas y su longitud dependerá del replanteo de los pilares de fachada. Suelen ser de sección rectangular, sección en T, en U invertida, deltas de pequeño canto o dobles T.

Figura 3.3. Estructura de pórticos - cubierta ligera, terminada la fase de montaje.

Figura 3.4. Detalle de estructura con viga delta en cubierta.

- **Vigas secundarias o correas:**

Las vigas secundarias o correas, son las que van de pórtico a pórtico en sentido transversal a las vigas principales. Es común en el sector que se las denomine también viguetas, tubulares o simplemente correas.

Reseñamos cinco sub-tipologías en función del tipo de viga secundaria o correa: correas o viguetas tubulares, viguetas en T autorresistentes, rectangulares, doble T y sección V, vigas canal, canalón o portacanalón y artesas.

- Viguetas tubulares: son las de uso más extendido, por capacidad resistente, alta capacidad transversal y estabilidad en montaje. Con sección rectangular tubular, formadas normalmente por dos nervios verticales y un alveolo central. Existen en el mercado también correas de doble alveolo y tres nervios. Los cantos habituales van de 20 a 40 cm, con saltos de 5 en 5 cm: 20, 25, 30, 35, 40. Son pretensadas y de fabricación en “sistema continuo”. La luz máxima habitual, para evitar elementos excesivamente armados, suele ser de aproximadamente 13,00 m.
- Viguetas en T autorresistentes: De uso más extendido en forjados de vigueta y bovedilla, también han sido muy empleadas en edificios industriales. Actualmente de uso casi exclusivo en estructuras de pórticos separados menos de 6.00 m. De canto máximo habitual hasta 22 cm, en saltos de 2 cm: 16, 18, 20, 22 cm. Son pretensadas y de fabricación en “sistema continuo”.
- Rectangulares, doble T y V macizas: De uso extendido para grandes luces (hasta 22.00 m) y grandes cargas en cubiertas (bancadas de instalaciones, fotovoltaica). Es una solución aplicada normalmente en zonas puntuales de las cubiertas, para salvar una necesidad excepcional. Son pretensadas y de fabricación en molde. Con cantos desde 0,40 m hasta 1,20 m, es habitual que vayan apoyadas a media madera sobre las vigas.
- Vigas canal, canalón o portacanal. Son vigas usadas como soporte del canalón y como última correa del faldón. También se usan como

apoyo en caso de cerramiento de fachada con paneles prefabricados colocados en posición vertical, y como vigas de atado transversal al pórtico colocadas en cabeza de pilar. Son pretensadas y de fabricación en molde.

- Vigas artesa: Son vigas usadas como soporte del canalón en la limahoya entre dos naves. También se usan de forma general en cubierta cuando queremos mejorar la transmisión de esfuerzos entre pórticos, y como vigas de atado transversal al pórtico colocadas en cabeza de pilar. Según el diseño pueden estar coladas boca arriba o boca abajo sobre las vigas principales. Pueden colocarse espaciadas a un intereje dado o colocadas pegadas. Son pretensadas y de fabricación en molde.

Algunas características de las correas para cubiertas de edificios industriales incluyen:

- Tienen armadura pasiva y activa longitudinal: piezas pretensadas. Según la tipología llevarán o no, estribos o armadura transversal.
- Posición horizontal de montaje. Excepcionalmente se puede dar la pendiente colocando las correas inclinadas.
- Uniones: habitualmente articuladas con apoyos sobre elementos elastómeros o neoprenos (en el caso de estudio de edificios traslacionales con uniones articuladas) y atornilladas a las vigas principales. Según la unión a las vigas, pueden hacer trabajar los pórticos de forma conjunta.
- Secciones: son de sección constante. Habitualmente entre 20 y 40 cm. En el caso de las correas macizas para usos excepcionales, se puede llegar a cantos de 100-120 cm
- La fabricación depende del tipo de correa. En el caso de las vigas canal, correas macizas y V, y correas artesas, se hacen en molde y en pistas de presentado. En las correas tubulares la fabricación se realiza con sistema continuo. Aparece el concepto de ponedoras

- o extrusión: las maquinas que fabrican estas piezas son de encofrado deslizante o máquinas de extrusión.
- o Se fabrica en pista: Los cables se anclan en las cabezas de principio y fin de la pista. Aquí se fabricará toda la pista, y cuando el hormigón tenga la resistencia adecuada para recibir la fuerza del pretensado, se cortarán las piezas en las medidas necesarias.

Figura 3.5. Foto de acopio y transporte de correas pretensadas.

Figura 3.6. Perspectiva interior y exterior de estructura de pórticos con correas de entrevigado.

3.3.3 Tipología de cerramientos de fachada. Paneles prefabricados de hormigón.

A partir de ahora, siempre que hablemos de cerramientos de fachada o paneles prefabricados en este estudio, nos referiremos a paneles prefabricados de hormigón autoportantes.

A la vista de los edificios industriales estudiados, esta tipología es la más habitual y está presente en más del 90% de los casos de los edificios analizados en la base de datos. En solo el 10% de los casos, las fachadas están ejecutadas con cerramientos de bloque de hormigón, chapa metálica simple, muros cortina, chapa sándwich u otras soluciones.

En las figuras siguientes podemos ver varios ejemplos de fachadas que se han proyectado con paneles prefabricados de hormigón.

Figura 3.7. Hueco para ventana en fachada proyectada con paneles prefabricados de hormigón.

Figura 3.8. Ventanales corridos en zona de oficinas y fachadas ciegas proyectadas con paneles prefabricados de hormigón en edificios industriales.

3.3.3.1 Principales usos y características de edificios con cerramientos de fachada con paneles prefabricados.

La solución de paneles de fachada prefabricados es de aplicación habitual en todo tipo de edificios prefabricados: edificios industriales, edificios de oficinas, edificios residenciales, aparcamientos, uso docente, edificios en altura. Las principales características de la tipología de cerramientos prefabricados de fachada para edificios industriales son:

- Sirven para conformar cerramientos de fachada o divisiones interiores.
- Tienen distintas propiedades de comportamiento a fuego, aislamiento térmico y acústico, en función de la composición del panel.
- Con los proyectos analizados pueden resumirse los distintos valores geométricos habituales:
 - Luces de Panel: de 5,00 a 14,00 m.
 - Espesor de panel: de 12 a 24 cm.

- Altura total de panel: de 5,00 a 14,00 m (y mayores).

3.3.3.2 Piezas prefabricadas en la tipología de cerramientos de fachada con paneles prefabricados.

Las piezas prefabricadas que intervienen para conformar esta tipología son exclusivamente los paneles. Excepcionalmente puede ser necesaria la presencia de vigas de apoyo o cuelgue, como las vigas para apoyo en cabeza de los paneles colocados en posición vertical, o para sujetar los paneles en las zonas con grandes huecos.

Encontramos dos subtipologías en función de su composición interna:

- Macizos: Conformados exclusivamente por hormigón armado y/o pretensado. Tienen una gran resistencia mecánica. Son de uso habitual en edificación residencial y en fachadas arquitectónicas.
- Con aislamiento interior: Estos a su vez se pueden dividir en los denominados en el sector paneles “sándwich”, con aislante interior y nervios macizos de hormigón, y paneles sin puente térmico, bicapa o de aislamiento continuo. En la actualidad, el panel denominado “sándwich” en el sector es la solución más habitual en el sector de los edificios industriales en España.
- Los paneles alveolares pretensados, por motivos de coste principalmente, se han usado en algunos proyectos en fachada, siendo actualmente una solución poco habitual en fachadas de edificios industriales.

Las principales características de estos paneles pueden resumirse en:

- Pueden tener sólo armadura pasiva o llevar también armadura activa.
- Posición horizontal o vertical de montaje.
- Las uniones más habituales en los paneles horizontales son: apoyados en su base y unos sobre otros, para transmitir su carga de peso propio, trabajando como autoportantes. Habitualmente van machihembrados y retenidos a los pilares para soportar las acciones horizontales. En caso de ser necesario por carga, para dejar huecos o ventanales corridos, los paneles pueden colgarse de los pilares.
- Longitud habitual en sistemas traslacionales de nudos articulados: entre 6.00 m y 14.00 m de longitud.
- Fabricación en molde o pista.
- Espesor: los espesores clásicos habituales son 12, 16, 20 y 24 cm.
- Composición: macizos o aislados tipo “sándwich” con poliestireno expandido EPS, XPS, PIR, PUR, lana de roca y configuraciones “sin puente térmico”, de aislante continuo.
- Colocación: horizontales o verticales. Exteriores o entre pilares “acanalados”.
- Acabado exterior: liso, árido visto-piedra-china, matriz de goma.
- Posición en el edificio: panel de fachada exterior, o panel de interior de división o medianera
- Tipo de sujeción: apoyado o colgado.

Figura 3.9. Foto de paneles prefabricados de hormigón para fachada: con acabado exterior en árido blanco Macael y lisos con ventanales verticales pintados en blanco y matriz texturizada en zona inferior.

3.4 Justificación del modelo y de las tipologías a analizar en este estudio.

Tal y como se ha indicado ya, se ha centrado y acotado el estudio en **proyectos de edificios industriales para conformar naves de una planta y grandes luces**, contruidos básicamente en zonas con sismo de aceleración básica menor o igual a 0,04 g.

La justificación es que las naves de planta única contruidas con estructuras de hormigón prefabricado, tienen un uso muy extendido, al ser estructuras que han demostrado ser muy competitivas desde diferentes puntos de vista: económico (llegando como industria al menos es más), sostenible (economía de materiales, reutilización, etc), calidad (proceso industrial) y fiabilidad (técnica, precio cerrado y plazo).

Para tener la mayor amplitud de datos posibles, se decide recurrir a **130 proyectos de construcción** provenientes de diferentes fuentes a lo largo del proceso de investigación para conformar la base de datos. Los proyectos en estudio, muestran diferentes fases: proyectos de ejecución, proyectos básicos, estudios de viabilidad y estudios de licitación. Los proyectos provienen de estudios propios, aportados por propiedades, estudios de ingeniería y arquitectura, organismos de control y empresas prefabricadoras.

Los datos, se muestran en las fichas que integran el Anexo II, a nivel de cargas y definición geométrica. El resto de datos, se incluyen en el apartado 3.8.4 Base de datos.

Por respeto a la confidencialidad de los datos, no se han aportado la localización concreta, ni los datos de los clientes solicitantes de los estudios.

La base de datos es lo suficientemente representativa de los edificios contruidos de esta tipología de naves de planta única y grandes luces, pues hubo razones para diseñar esas estructuras, fuera de las soluciones exclusivas o únicas.

El estudio busca analizar qué es lo que se está proyectando y construyendo, y buscar los rangos de soluciones óptimas dentro de las estructuras analizadas, para manejar el orden de magnitud y servir de herramienta en la fase de predimensionado, todo ello con prudencia al ser un modelo cargado con los proyectos que hemos visto, pero que no hemos diseñado-calculado nosotros, ni conocemos las razones específicas del diseño.

También reseñar que no se podrán hacer extrapolaciones fuera de los rangos de los proyectos de la base de datos, pues dado el carácter profundamente estructural de la cuestión, hay fenómenos a controlar como las transferencias o la inestabilidad lateral entre otros.

De los 130 proyectos analizados, 129 cuentan con estructuras traslacionales de nudos articulados, 126 tienen cerramientos de fachada con paneles prefabricados de hormigón. También tenemos 122 casos donde la estructura principal está conformada con pórticos de cubierta ligera, y de estos, 119 casos corresponden a vigas principales peraltadas (Delta) o jácenas doble T (jácena I) y 118 a estructura traslacional con nudos articulados.

De modo que un 90,8% de los proyectos analizados corresponden al modelo estructural más extendido de que es el de estructuras traslacionales con nudos articulados, para conformar naves de una sola planta y grandes luces, resultas con una solución de estructuras de pórticos de cubierta ligera de deltas o jácenas I, con correas tubulares y cerramientos de fachada prefabricados.

Somos conscientes de que hay algunas ideas que no se han considerado en el estudio, como son el fuego, el sismo, la sostenibilidad, las cimentaciones, los cerramientos de cubiertas, los modelos de pilares en función de las conexiones de correas, las secciones en función de las diferentes resistencias características de los hormigones, pero para poder avanzar teníamos que hacer simplificaciones de factores que conocemos, pero que no consideraremos de este estudio.

Presentamos en las tablas siguientes un análisis de los proyectos.

Tabla 3.3. Proyectos constructivos analizados.

Modelo/ Tipología	Pórticos-cubierta ligera	Entramado-forjado	Total	Incluye fachada prefabricada
Traslacional de nudos articulados	121	8	129	125
Traslacional de nudos rígidos	1	0	1	1
Intraslacional	0	0	0	0
Total	122	8	130	126

Tabla 3.4. Proyectos por subtipología o modelo de cubiertas ligeras.

Modelo de cubierta	Viga Delta	Viga I	Viga Y	Total
Traslacional con nudo articulados	70	49	3	122

Tabla 3.5. Casos particulares de cubiertas ligeras por nudos rígidos o vigas Y.

Casos de cubiertas ligeras base de datos	Nudos rígidos	Vigas Y sin correas	Total casos generales de estudio
122	1	3	118

3.5 Condiciones de contorno para el diseño del edificio.

3.5.1 Uso.

El uso es la variable de diseño que influye en un mayor número de factores, pues marcará unos requerimientos espaciales de distribución interna que pueden condicionar la elección de la cuadrícula básica, del tipo de pórtico simple o múltiple. También influirá en las cargas a considerar, estabilidad al fuego, y ambientes general y específico de exposición del hormigón.

Desde el punto de vista de las etapas iniciales del diseño, y del proyecto en general, el uso de la nave será determinante para definir la altura libre y la cuadrícula o separación de pilares, muy condicionada, por ejemplo, por la presencia de muelles de carga en fachadas.

3.5.2 Cargas.

Uno de los primeros aspectos que debe contemplar el proyectista, son las cargas para las que se va a dimensionar la estructura. El uso del edificio y la normativa en vigor dan los valores de partida para las acciones. Podemos decir como regla mnemotécnica que, para el cálculo de elementos horizontales se empieza el diseño “por el tejado”, comenzando por definir las cargas.

Las sobrecargas de uso e instalaciones vendrán definidas por el uso y necesidades del edificio dentro de las acciones variables reflejadas en la Tabla 3.1 del CTE DB SE-AE.

Una carga importante a tener en cuenta es saber si la instalación va a contar o no con puente/es grúa y de qué capacidad. En esta tipología de cubiertas ligeras no transitables, aparte de las cargas por zona climática a efectos de sobrecarga de nieve y de viento, se deben tener en cuenta las cargas de instalaciones previstas y las sobrecargas de uso o mantenimiento.

En zonas con aceleración sísmica inferior a 0,04, como en el caso de todos los edificios analizados, no se tendrán en cuenta las cargas sísmicas a efectos de dimensionado estructural.

3.5.3 Estabilidad al fuego.

El uso del edificio y la normativa en vigor nos darán unos valores que deberán cumplir los distintos elementos de la estructura. Es habitual que tengamos normativas específicas en ciertas regiones y actividades. En general el comportamiento de las estructuras de hormigón es bueno, y modificando recubrimientos y secciones, se alcanzan los valores solicitados, sin tener que aplicar normalmente tratamientos excepcionales.

Influirá la disposición externa e interna del edificio y la posición sobre rasante o bajo rasante (sótanos).

3.5.4 Distribución externa e interna.

Estará marcada por condicionantes como las necesidades de uso, comunicación interior y accesos exteriores, la presencia de forjados intermedios, sótanos y la solución de fachadas propuesta.

Esta distribución es la que más va a condicionar las posibilidades de optimización, pues va a influir en la planta general del edificio y en el replanteo de los pilares, que condicionará las longitudes de vigas y correas a utilizar.

3.5.5 Definición de la retícula, celda o cuadrícula básica.

Ya hemos visto en diferentes autores en el Capítulo 2 del estado del Arte, que es conveniente diseñar los edificios con plantas rectangulares y ortogonales, y que también resulta conveniente buscar la repetición y regularidad de la cuadrícula básica. La estandarización y repetición de elementos por longitudes y secciones, es un paso clave en la optimización de la estructura.

Vamos a definir la cuadrícula básica, como la superficie en planta rectangular y ortogonal, formada por dos vigas contiguas paralelas separadas la longitud de correa. La conformarán 4 pilares, 2 vigas y las correas correspondientes al reparto sobre la viga para el intereje dispuesto.

3.5.6 Pórtico simple o pórtico múltiple.

Es uno de los factores a tener en cuenta a la hora de iniciar el diseño de un edificio industrial. Valorar si se va a plantear la estructura con un pórtico simple formado por una sola viga y dos pilares, o con pórticos múltiples de n vigas y $(n+1)$ pilares. Conocer las ventajas de tener varios pilares por pórtico, los rangos de uso y las soluciones más óptimas nos ayudarán a tomar esta decisión.

3.5.7 Ambiente. Clases específicas de exposición ambiental.

Las clases específicas de exposición ambiental suponen uno de los factores a tener en cuenta a la hora de iniciar el diseño de un edificio industrial. Aplicando la normativa en vigor, necesitamos saber si hay agresión química débil (Qa), media (Qb) o fuerte (Qc), heladas con ataque hielo-deshielo (F) o con sales fundentes (G), o un estado de erosión, abrasión o cavitación (E), ya que ello afectará a la elección del tipo y dosificación del cemento, así como en el recubrimiento mínimo de las armaduras.

3.5.8 Superficie en planta.

Es un dato básico de las necesidades del proyecto, en función de sus necesidades, y del suelo disponible según el caso. Para diseñar necesitamos saber qué superficie mínima necesita la actividad. Este factor suele tener gran influencia, pues en muchos casos, sobre todo en terrenos pequeños, achafanados o alargados, la planta general estará prácticamente predeterminada. Dentro del ámbito de este estudio, las plantas serán siempre rectangulares de dimensiones: largo (L) en la dirección de las correas, por ancho (A) en la dirección de las vigas.

Podemos intuir que la forma general tendrá una gran influencia en el gasto, pues la superficie de cerramiento de fachada es directamente proporcional al perímetro del edificio.

3.5.9 Altura libre.

La altura del edificio depende directamente de su uso. Según el tipo de instalación o industria a instalar, tendremos unas alturas libres bajo viga de cubierta mínimas recomendadas, que oscilarán entre los 4,00 y los 12,00 m habitualmente.

La presencia de puentes grúa también condicionará este valor, al tener que dejar unas distancias libres desde la cota de apoyo del puente grúa en la ménsula, hasta bajo viga de cubierta en el punto más desfavorable, entre 1,50 y 2,00 m, según el equipo a colocar.

En casos excepcionales, se proyecta con la altura máxima permitida por la normativa regional, municipal o específica de polígono industrial aplicable. En estos casos tendremos que tener en cuenta que a mayor altura, mayor sección y armado de pilares, y sobre todo, mayor superficie de fachada a cubrir. Agotar la altura máxima permitida por las condiciones urbanísticas de la parcela, es una decisión que suele venir motivada, por perseguir una mayor versatilidad ante posibles cambios de uso durante la vida útil del edificio.

También el uso del edificio, la carga de fuego y la presencia de rociadores, puede condicionar la altura libre. Un valor habitual es limitar la altura bajo cubierta en el punto más alto (cota superior de correa) a 13,70m, lo que implica que en una nave en la que se quiera llevar la altura libre el máximo, para un ejemplo de estructura con correas de canto 0,40 m, y vigas de sección constante de canto 1,20 m, de 22 m de luz, y pendiente del 2% para una cubierta Deck, nos daría una altura libre de 11,66 m.