



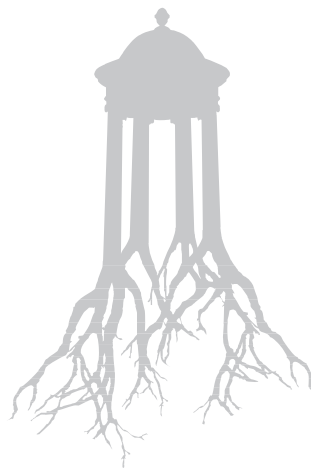
UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

→ **UPCPOSTGRAU**

Analizando la construcción →

Agustí Portales Pons





UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



iniciativa
digital politècnica
Publicacions Acadèmiques UPC

→ **UPCPOSTGRAU**

Analizando la construcción →

Agustí Portales Pons

Primera edición: octubre de 2013

Diseño y dibujo de la cubierta: Jordi Soldevila
Diseño maqueta interior: Jordi Soldevila

© Agustí Portales Pons, 2013

© Iniciativa Digital Politècnica, 2013
Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC
Jordi Girona 31,
Edifici Torre Girona, D-203, 08034 Barcelona
Tel.: 934 015 885
www.upc.edu/idp
E-mail: info.idp@upc.edu

Depósito legal: B-25220-2013
ISBN: 978-84-7653-991-0

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede realizarse con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista en la ley.



Prefacio

Este libro es el resultado de la recopilación de material y de las reflexiones derivadas de impartir, desde el curso 2008-2009 hasta la actualidad, la asignatura Análisis Funcional de Sistemas Constructivos, del Máster Universitario en Edificación de la EPSEB.

La motivación que me impulsa a escribir libros técnicos –este es el quinto– ha sido siempre la misma: facilitar a los lectores mecanismos de análisis y de comprensión orientados a la resolución de cuestiones de carácter profesional, como también lo hicieron algunos autores que me precedieron.

Debo reconocer que, en este caso, el primer impulso surgió de la dirección de la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB), cuando tuvo a bien confiarme la nueva asignatura mencionada, la cual, a su vez, era una de las que inauguraron el Máster Universitario de Edificación.

Ante tan gran compromiso, recurrí a tres fuentes para dar forma y contenido a la asignatura y, posteriormente, al libro: en primer lugar, a las enseñanzas y a las ideas clarividentes del catedrático Fructuós Mañà; en segundo, a la experiencia profesional, y, por último, al trabajo específico para recopilar nuevos materiales, organizarlos en PowerPoint y exponerlos en las clases. Todo ello, bajo un denominador común orientado a transmitir, detallar, desarrollar y aplicar principios de sostenibilidad en todas las actuaciones de la construcción.

A medida que, con el paso de los cursos, maduraban los contenidos y la cohesión interna de la asignatura, se iban sentando las bases para confeccionar el libro.

Del profesor Mañà tomé los conceptos de construcción empírica y de construcción científica. Igualmente son suyos los modelos “cueva”, “cabaña” y “tienda”;



tan útiles para clasificar estructuralmente el comportamiento y las formas de un edificio, una vez catalogado dentro de uno de los tres modelos. Simplemente los he desarrollado y los he estructurado en función de las necesidades específicas de la asignatura.

Las exposiciones y los comentarios relativos a la “construcción obscena” y a la “construcción tecnológica” son aportaciones personales. La primera, para hacer la pertinente denuncia de casos flagrantes de malos usos sistemáticos de los recursos del planeta en el ámbito de la edificación. La segunda responde a la necesidad de atestiguar la existencia de un nuevo ciclo en la forma de entender y de practicar la construcción de edificios, que va desde principios de los años cincuenta del siglo XX hasta la actualidad, cuando, como hecho diferencial con respecto a épocas precedentes, es posible contar con el uso de los ordenadores y la energía del átomo. Si bien la situación derivada de la existencia de ambos parámetros ha evolucionado, de forma exponencial en algunos ámbitos, el marco general de análisis sigue siendo el mismo.

El desarrollo expositivo y el alcance de las herramientas de análisis –auditorías de proyecto y planes maestros– son fruto de los últimos años de mi experiencia profesional trabajando en equipo en una empresa especializada en la dirección integrada de proyectos (DIP). La exposición y el ulterior dominio de los esquemas teóricos que los soportan deben consolidarse y expandirse con la práctica, para que enraícen profundamente en la idiosincrasia de cada individuo y se conviertan en parte de su bagaje académico y profesional. Ello permite concluir que es más sencillo transmitir conocimientos que experiencia.

La selección de los ejemplos constructivos se ha caracterizado por el análisis de situaciones extremas que, por su dificultad, constituyeron en su día la punta de lanza para logros futuros. A tal efecto, se analizan los procesos desarrollados para la resolución de grandes luces, la edificación en altura y la construcción de viviendas masivas.

Se efectúan, además, pequeñas referencias a algunas de las formas de construir menos comunes, con el propósito de obtener una pincelada de conjunto que permita realizar un análisis, necesariamente somero, sobre cómo y por qué se ha construido y se construye en cada época, y qué valores de cada forma de construir pueden aplicarse para la consecución de otros logros.

El análisis de los distintos modelos constructivos se ha planteado siempre desde una perspectiva histórica, puesto que la construcción nace y se desarrolla con la experiencia. No es posible entender y valorar los logros de una época sin conocer sus bases de partida y las razones por las cuales se plantearon en su momento.

La selección de los ejemplos y el análisis de los modelos son el resultado de un trabajo de recopilación a partir de numerosas fuentes bibliográficas y páginas web.

Por último, quisiera, agradecer a los estudiantes del máster sus observaciones e inquietudes, puesto que han incidido positivamente en el contenido final de este trabajo. Ellos tienen ante sí el reto de dar respuesta a la construcción del futuro.

Para lograr sus propósitos, disponen de nuevos instrumentos de análisis, de carácter tecnológico, que facilitan la toma de decisiones. A ellos les corresponde también desarrollar, sobre la base de los precedentes, nuevos instrumentos de análisis y normativas para seguir practicando, de forma positiva, el “menos es más” que ha caracterizado el apasionante mundo de la construcción a lo largo de su milenaria historia.

Barcelona, mayo de 2013





Índice

| | |
|---|-----|
| Prefacio | 5 |
| 1. Analizando la construcción | |
| 1.1. El análisis de la construcción desde la perspectiva de la arquitectura y de la edificación..... | 15 |
| 1.1.1. Razones para llevar a cabo este análisis..... | 15 |
| 1.1.2. Construcción obscena. Algunas reflexiones sobre prácticas que deberían evitarse..... | 17 |
| 1.2. La génesis y el progreso de la construcción en el tiempo. Construcción empírica, construcción científica y construcción tecnológica | 21 |
| 1.2.1. Construcción empírica | 25 |
| 1.2.2. Construcción científica | 54 |
| 1.2.3. Construcción tecnológica | 71 |
| 1.3. Los modelos estructurales en la construcción de edificios | 97 |
| 1.3.1. Modelo “cueva” | 99 |
| 1.3.2. Modelo “cabaña” | 103 |
| 1.3.3. Modelo “tienda” | 105 |
| 1.3.4. Las otras formas de construir..... | 114 |
| 1.3.5. Algunas formas curiosas de construir | 124 |
| 1.3.6. Los modelos avalados por la evolución, la difusión técnica y la práctica profesional..... | 128 |
| 1.3.7. La evolución espacial y constructiva de las viviendas plurifamiliares entre medianeras | 129 |
| 2. Las herramientas para el análisis constructivo del proceso de diseño de los proyectos arquitectónicos: Auditorías de proyecto y planes maestros | |
| 2.1. Introducción..... | 135 |



| | | |
|--------|---|-----|
| 2.1.1. | Auditorías de proyecto | 136 |
| 2.1.2. | Planes maestros..... | 136 |
| 2.1.3. | El proyecto: definición y alcance | 136 |
| 2.2. | Auditorías de proyecto..... | 142 |
| 2.2.1. | Introducción | 142 |
| 2.2.2. | La situación de la legalidad vigente y su grado de indefinición en lo referente al control de proyectos | 142 |
| 2.2.3. | El concepto de proyecto integral..... | 143 |
| 2.2.4. | Equipo necesario para llevar a cabo una auditoría de proyecto | 144 |
| 2.2.5. | Principios operativos | 145 |
| 2.2.6. | Defectos comunes que se detectan en las auditorías de proyecto | 146 |
| 2.2.7. | Cómo llevar a cabo una auditoría de proyecto arquitectónico. | 148 |
| 2.2.8. | Consideraciones finales. | 152 |
| 2.3. | Planes maestros..... | 153 |
| 2.3.1. | Planes maestros: conceptos generales | 153 |
| 2.3.2. | Aspectos de prediseño | 155 |
| 2.3.3. | Estimación de los costes unitarios y totales | 162 |
| 2.3.4. | La consideración del tiempo | 164 |
| 2.3.5. | Algunos mecanismos de análisis y comparación | 165 |
| 2.4. | Algunos ejemplos..... | 169 |
| 2.4.1. | Introducción | 169 |
| 2.4.2. | Constatación de otras realidades | 169 |
| 2.4.3. | Observaciones y conclusiones finales del capítulo | 181 |

3. Los retos de la construcción de grandes luces y las técnicas para su resolución

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.1. | Introducción..... | 185 |
| 3.2. | El concepto de gran luz | 185 |
| 3.2.1. | Las características mecánicas de los materiales | 186 |
| 3.2.2. | Los modelos constructivos | 186 |
| 3.2.3. | Las formas de los modelos constructivos..... | 187 |
| 3.2.4. | La técnica constructiva empleada, los procesos y los procedimientos para su ejecución..... | 188 |
| 3.2.5. | La época de construcción | 192 |
| 3.3. | Construcciones de grandes luces, elaboradas con materiales pétreos | 193 |
| 3.3.1. | Introducción a la construcción elaborada con materiales pétreos | 193 |
| 3.3.2. | Arcos de diafragma | 194 |
| 3.3.3. | Bóvedas de cañón. Mejoras introducidas en su construcción . | 200 |
| 3.3.4. | El Panteón de Agripa | 207 |
| 3.3.5. | La cúpula de Santa Sofía de Constantinopla | 209 |
| 3.3.6. | La cúpula de Santa Maria dei Fiore | 212 |
| 3.3.7. | La cúpula de San Pedro del Vaticano | 218 |
| 3.3.8. | La cúpula de la catedral de San Pablo de Londres | 221 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.3.9. | La cúpula del Panteón de Hombres Ilustres de París | 226 |
| 3.4. | La construcción de grandes luces con hierro y con acero..... | 233 |
| 3.4.1. | Introducción | 233 |
| 3.4.2. | Puentes colgantes. Introducción..... | 236 |
| 3.4.3. | Puentes colgantes de cadenas | 237 |
| 3.4.4. | Puentes colgantes con cables | 240 |
| 3.4.5. | El Crystal Palace de Londres..... | 244 |
| 3.4.6. | Techar más de cien metros sin apoyos intermedios. La Galérie des Machines, 889..... | 251 |
| 3.4.7. | Una solución de corto recorrido | 254 |
| 3.4.8. | Observaciones finales a la construcción de grandes luces con hierro y con acero..... | 259 |
| 3.5. | Introducción al hormigón armado | 261 |
| 3.5.1. | El contexto del hormigón armado | 261 |
| 3.5.2. | El cemento de Pórtland..... | 262 |
| 3.6. | El hormigón armado, una nueva manera de salvar grandes luces. De la masividad a las láminas. La esbeltez como objetivo | 272 |
| 3.6.1. | Introducción y ejemplos tipológicos..... | 272 |
| 3.7. | La madera laminada encolada y sus aplicaciones estructurales en grandes luces | 294 |
| 3.7.1. | Introducción | 294 |
| 3.7.2. | Los precursores de la madera laminada encolada | 294 |
| 3.7.3. | El concepto actual de madera laminada encolada..... | 301 |
| 3.7.4. | Materiales y elementos que conforman una pieza estructural de madera laminada encolada | 302 |
| 3.7.5. | Normativa básica sobre la madera laminada encolada..... | 307 |
| 3.7.6. | Ejemplos | 308 |
| 3.7.7. | Conclusiones finales sobre la madera laminada encolada | 312 |

4. La construcción, aplicada a la edificación en altura

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.1. | Introducción..... | 315 |
| 4.2. | Análisis de los aspectos formales y tecnológicos, tipológicos y estructurales de los edificios en altura | 319 |
| 4.2.1. | Introducción | 319 |
| 4.2.2. | Sobre los aspectos formales y tecnológicos..... | 321 |
| 4.2.3. | Aspectos tipológicos | 335 |
| 4.3. | En relación con la altura y la esbeltez..... | 347 |
| 4.4. | Los edificios en altura como laboratorio experimental de la construcción..... | 352 |
| 4.4.2. | El conocimiento del comportamiento mecánico del suelo y su incidencia en el desarrollo de la construcción bajo rasante..... | 353 |
| 4.4.3. | Seguridad y mantenimiento | 359 |
| 4.4.4. | Modulación, flexibilidad y ergonomía | 360 |
| 4.5. | Tres edificios, tres planteamientos, tres soluciones constructivas: Turning Torso, Torre Agbar y Gherkin..... | 362 |
| 4.5.1. | Turning Torso | 362 |



| | |
|---|-----|
| 4.5.2. Torre Agbar. Aspectos generales | 368 |
| 4.5.3. Gherkin. Génesis..... | 373 |
| 4.6. ¿Cómo serán los edificios en altura del futuro?..... | 379 |
| 4.6.1. Análisis del presente | 380 |
| 4.6.2. Prospectivas de futuro | 381 |
| 4.6.3. Aventurando una respuesta | 390 |

5. Diseño y construcción de la vivienda colectiva

| | |
|--|-----|
| 5.1. Introducción..... | 397 |
| 5.2. Antecedentes. Los edificios colectivos de viviendas urbanas, a partir del siglo XVIII..... | 398 |
| 5.3. La vida urbana durante la primera revolución industrial y la organización y las condiciones de trabajo | 401 |
| 5.4. Las aportaciones de los utopistas | 403 |
| 5.5. Los modelos constructivos precursores del bloque lineal. La vivienda colectiva obrera desde mediados del siglo XIX hasta las propuestas racionalistas | 405 |
| 5.6. Primeras propuestas racionalistas para la vivienda colectiva | 409 |
| 5.7. La actuación del CIAM en la extensión del concepto racionalista de la vivienda colectiva..... | 415 |
| 5.8. Mecanismos políticos de análisis y de creación de la vivienda colectiva y social..... | 417 |
| 5.9. Actuaciones para la creación de vivienda colectiva en Inglaterra y Francia tras la Segunda Guerra Mundial | 418 |
| 5.10. La vivienda colectiva entre 1960 y 1975..... | 421 |
| 5.10.1. La vivienda colectiva en época de bonanza..... | 422 |
| 5.10.2. Prefabricados y semiprefabricados aplicados a la vivienda colectiva durante los años setenta..... | 425 |
| 5.10.3. Algunos ejemplos de prefabricados residenciales de los años setenta..... | 428 |
| 5.10.4. Encofrados de túnel. Una tercera vía | 434 |
| 5.11. Singularidad y masividad. Dos ejemplos: los edificios Corviale en Roma y Walden 7 en Sant Just Desvern, Barcelona | 439 |
| 5.11.2. Edificio Walden 7..... | 441 |
| 5.12. La vivienda colectiva ante las nuevas realidades sociales 1975-2006 | 443 |
| 5.12.1. Cambios sociales y su incidencia sobre el diseño y la construcción de vivienda colectiva (1975-2006) | 443 |
| 5.12.2. Justificación del período temporal | 445 |
| 5.12.3. Los marcos técnicos normativos del período y las estrategias políticas | 445 |
| 5.12.4. El caso del polígono de la Mina..... | 448 |
| 5.12.5. La adaptación de un modelo antiguo a las nuevas necesidades: el bloque lineal con patios interiores | 449 |
| 5.12.6. Las tipologías y las alturas propias de la vivienda colectiva y su relación con la construcción masiva. Bloques lineales | |

| | |
|---|-----|
| y bloques en torre | 454 |
| 5.13. Conclusiones | 456 |
| 5.13.1. Planeamiento | 457 |
| 5.13.2. Racionalidad | 457 |
| 5.13.3. Depuración de modelos y de técnicas constructivas | 457 |
| 5.13.4. Atención al parque residencial edificado | 458 |
| 5.13.5. Respuesta amable del edificio | 459 |
| 5.13.6. La vía de los semiprefabricados | 459 |
| 5.14. Epílogo..... | 463 |

6. Tubos, cables y membranas. Construcción y creatividad

| | |
|---|------------|
| 6.1. Introducción | 465 |
| 6.2. Los tubos, una solución fascinante para conducir fluidos y esfuerzos mecánicos | 466 |
| 6.3. El desarrollo de tubos estructurales y sus aplicaciones en las construcciones arquitectónicas..... | 467 |
| 6.4. Las construcciones tubulares en la actualidad | 475 |
| 6.4.1. Cubierta del estadio de fútbol Cornellà–El Prat..... | 477 |
| 6.4.2. Cubierta del velódromo de Berlín..... | 478 |
| 6.5. Construcción mediante cables de acero | 479 |
| 6.5.1. Introducción | 479 |
| 6.5.2. Particularidades de la construcción mediante cables estructurales..... | 481 |
| 6.5.3. Algunos hitos en la historia de los cables estructurales..... | 483 |
| 6.5.4. Primeros usos estructurales de los cables, con independencia de los puentes colgantes. Vigas Fink y Bollman, cerchas Pratt y vigas lenticulares..... | 484 |
| 6.5.5. Conceptos básicos para el diseño de vigas de cable | 485 |
| 6.5.6. Un caso singular de cubierta circular resuelta mediante cables. El Cilindro Municipal de Montevideo..... | 487 |
| 6.5.7. Las vigas de cable en la actualidad | 488 |
| 6.5.8. La rueda de bicicleta, un modelo estructural interesante poco aplicado en construcción | 490 |
| 6.5.9. Ruedas de bicicleta gigantes..... | 492 |
| 6.5.10. El concepto estructural de las ruedas de bicicleta aplicadas a la arquitectura | 494 |
| 6.6. Arquitectura tensotextil. Algunas tipologías constructivas realizadas con tubos, cables y membranas..... | 499 |
| 6.7. Elementos y condiciones necesarios para el desarrollo de la arquitectura tensotextil..... | 509 |
| Bibliografía | 513 |

→ 1



Analizando la construcción

1.1. El análisis de la construcción desde la perspectiva de la arquitectura y de la edificación

1.1.1. Razones para llevar a cabo este análisis

Arquitectura, construcción, edificación son vocablos con connotaciones muy amplias. Constituyen el marco general en que se desarrolla una actividad humana milenaria; imprimen una huella profunda sobre las personas, en sus gustos estéticos, en la concepción y en la percepción de los espacios y en la forma en que se desarrollan sus relaciones sociales. Dicho marco aglutina un amplio espectro de conocimientos y de sensaciones en el cual confluyen líneas de pensamiento, épocas, estilos arquitectónicos, técnicas constructivas y tipologías edificatorias diversas.

Tradicionalmente, la arquitectura, la construcción y la edificación se han estudiado por separado. Es momento de romper esquemas al objeto de disponer de una visión de conjunto nutrida con informaciones procedentes de diversos orígenes y planteamientos.

La lectura de un libro de historia de la arquitectura informa sobre estilos, autores o fechas. Difícilmente detalla aspectos relacionados con los materiales, las técnicas constructivas o los medios auxiliares empleados en la construcción. Aún más difícil resulta encontrar datos sobre luces, secciones, pesos, o referencias a los medios auxiliares para poner en obra los materiales.

El trabajo pendiente de análisis científico del patrimonio construido es inmenso. Igualmente, el estudio racional sobre los materiales, los procesos y las técnicas ha de tener mayor cabida, tanto en las fases de diseño como en las de construcción.



En los tratados de construcción, se encuentran descripciones y dibujos sobre cómo llevar a cabo determinados elementos arquitectónicos, los materiales a emplear y su preparación correcta para alcanzar el fin deseado. Sin embargo, carecen de la capacidad de análisis. Simplemente describen un método, "el método".

En ellos, no se establecen comparaciones entre distintos sistemas y procedimientos aptos para conseguir un mismo fin o resultado, con el fin de mostrar las ventajas y los inconvenientes de cada uno. Cabe decir que, a lo largo de la historia, en la mayoría de los casos las alternativas han sido mínimas o inexistentes. Solo en la actualidad una misma necesidad constructiva puede resolverse con materiales y disposiciones espaciales y estructurales muy diversas.

Hasta principios de siglo xx, resultan extraordinariamente escasos, en la bibliografía especializada en construcciones arquitectónicas, los valores numéricos en forma de ratios, como los pesos per metro cuadrado de pavimentos, forjados, cubiertas y superficie construida/superficie útil, o las relaciones canto-luz de los elementos flectados, por citar algunos ejemplos significativos.

Las colecciones decimonónicas de tipos edificatorios de los profesores de proyectos se limitaban a una función de catálogo-guía de diseño. Los aspectos prestacionales, relativos a los aislamientos térmico, acústico, de accesibilidad o de seguridad frente al fuego, eran los que permitía la técnica constructiva de la época aplicada a los edificios, poco más allá del vitruviano "*firmitas, utilitas, venustas*".

Puede concluirse que, para tener un mejor conocimiento integrado de la arquitectura y la construcción, es necesario realizar estudios pormenorizados, basados en principios científico-técnicos (comparativos, dimensionales, prestacionales...). Solo así será posible obtener conclusiones fiables y contrastadas sobre los objetivos y los propósitos de estudio previamente establecidos.

El siglo xxi está aportando nuevos y variados criterios en la forma de construir, basados en las prestaciones y en la capacidad de análisis que ofrecen los sistemas informáticos, así como en la incorporación de nuevos materiales. Todos estos criterios responden, o deberían responder, a un compromiso común: atender el principio de sostenibilidad. Ello ha de permitir no solo construir mejor, sino también consumiendo menos energía, tanto en la fase de construcción propiamente dicha, como en las de uso y mantenimiento, a lo largo de la vida útil del edificio.

El profesional que quiera o necesite tener una visión conjunta de los aspectos arquitectónicos, constructivos y edificatorios, deberá adquirir una visión poliédrica, en la cual no pueden estar ausentes los aspectos técnicos, artísticos y sociales. Solo desde esta óptica es posible analizar, interpretar y realizar en plenitud la edificación de proyectos arquitectónicos, mediante la elección y la utilización de las técnicas constructivas más apropiadas a cada caso, situación y circunstancia.

Las páginas siguientes tratan de potenciar la capacidad profesional del lector técnico e informar al curioso sobre cuestiones de análisis y de crítica, organizadas bajo la triple vertiente arquitectónica, constructiva y edificatoria. El punto de partida son unas reflexiones sobre la historia de la construcción, que dan paso a la exposición y al comentario de ejemplos de obras significativas, de distintas épocas, que por sus características especiales han constituido un hito, aunque solo sea en algunos casos, en la pequeña historia de los apasionados por la arquitectura, la construcción y la edificación.

Son también un toque de atención para las generaciones futuras. Los conceptos “tradicionales” comparten protagonismo con aspectos que hasta “ayer” eran objeto de escasa atención, como el impacto ambiental de la industria de la construcción y su vinculación con la gestión de residuos, el consumo energético, las emisiones de CO₂, el ciclo de vida de los materiales o la deconstrucción como acto final del ciclo de vida útil de un edificio.

Es preciso considerar que los datos objetivos, las ratios, las programaciones y los análisis comparativos aumentan, y aumentarán aún más en el futuro, su peso específico en los procesos tradicionales de toma de decisiones.

Dichos procesos, basados en aspectos de carácter voluntarista y sensitivo, se sustentan en líneas de pensamiento con capacidad para crear escuela y acaban siendo matizados por los criterios personales de cada autor, como mecanismo último de creación y adopción de formas, y por aspectos de mayor detalle, como la elección de los materiales, de sus texturas y de sus colores.

Es preciso tomar conciencia de que concluye una época de diseño asociado a la edificación, la cual, sin renunciar a la creatividad, ahora ha de seguir los cauces que impone la sostenibilidad, unida a la reducción de los impactos medioambientales.

1.1.2. Construcción obscena. Algunas reflexiones sobre prácticas que deberían evitarse

El perfil profesional de los agentes implicados en la edificación debe sustentarse en principios éticos para lograr una utilización racional de los recursos naturales. Es preciso garantizar la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente en todas las actuaciones. Debe prescindirse de la arquitectura que genera construcción “obscena”, del urbanismo obsceno y de aquellas prácticas cotidianas que se dan en algunas obras que, aunque a menor escala, resultan igualmente nocivas para el medio ambiente.

Expuesto el calificativo, es preciso argumentar su justificación. La construcción obscena es aquella que dilapida recursos técnicos y energéticos de forma innecesaria en un edificio. El urbanismo obsceno es aquel que permite el hacinamiento de personas en urbes, con el simple propósito de obtener el máximo



beneficio del suelo. En las fotos siguientes (a la izquierda, Shanghái; a la derecha, Bogotá), se ilustran dos ejemplos que, por desgracia, no son casos aislados.



Las malas prácticas cotidianas en las obras se traducen en infracciones a las normativas ambientales, con la intención de reducir los costes y acelerar los trabajos. Consideradas individualmente, estas infracciones pueden parecer nimiedades; sin embargo, en conjunto, pueden llegar a constituir serios problemas. Como ejemplo de este tipo de actitudes, basta con citar los vertidos inadecuados a las redes de saneamiento, la generación innecesaria de polvo y de ruido, o la utilización de materiales de relleno con restos de toda índole, para evitar la separación en origen y el transporte al vertedero.

El autocontrol de las capacidades tecnológicas basadas en el conocimiento, en el sentido común y, naturalmente, en el genio son determinantes para construir edificios de elevadas prestaciones, a un coste razonable, estéticamente significativos e integrados en un paisaje urbano correctamente estructurado.

Efectuada la exposición general, a continuación se enumeran algunas de las "obscenidades" comunes de la edificación, que tienen una mayor incidencia ambiental. Recuérdese la frase: "Es de necio confundir valor con precio." El hecho que algo *se pueda pagar* no significa que, necesariamente, *deba ser pagado* sin considerar antes las posibilidades que pueden ofrecer otras alternativas más racionales, económicas y respetuosas con el medio ambiente.

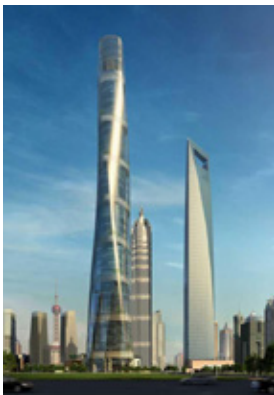
- Los costes de construcción y de mantenimiento se disparan exponencialmente con la altura. La foto siguiente izquierda reproduce una imagen del centro de negocios de Shanghái en que la construcción de gran altura adquiere un papel predominante.
- Tratar de realizar sótanos a la orilla del mar o en zonas con el nivel freático próximo a la superficie obliga a un consumo ingente de energía para su abatimiento, complica la cimentación y aumenta el riesgo de filtraciones. En la fotografía siguiente derecha, un equipo de WellPoint abate el nivel freático en el interior de un vaso de edificación para permitir su rebaje y poder realizar las operaciones de cimentación en seco.



- Desafiar la ley de la gravedad por medio de voladizos o formas espectaculares. La foto inferior derecha muestra el edificio “Veles e vents” en el puerto de Valencia, en servicio desde 2006, obra del arquitecto David Chipperfield (1953), que curiosamente ganó los LEAF Awards, premios europeos de arquitectura, en una Europa que, paradójicamente, entiende como políticamente correcta la defensa del medio ambiente. Los párrafos siguientes están extraídos de una descripción oficial del citado edificio:

“Cada una de sus plantas tiene tamaño, vuelo y formas diferentes, lo que dificultó especialmente las labores de cimbrado, ya que en algunas zonas del edificio la cimbra nacía en planta baja y llegaba hasta la cubierta, salvando más de 25 metros de altura. Otras veces, cada una de las plantas no se apoyaba directamente en la inferior...”

“Como singularidad, la conjunción de un entramado estructural necesariamente complejo, al tener que salvar luces de vano del orden de los 30 metros y voladizos de hasta 14 metros que soportan elevadas cargas inherentes al uso público.”



- Incorporar planos inclinados o alabeados en las fachadas, que incrementan, de forma injustificada, el coste de la estructura y la adaptación de los cerramientos. En la fotografía superior izquierda, la Torre de Shanghai, cuya terminación está prevista para 2014, une, a su extraordinaria altura de 632 m y 128 pisos, los planos alabeados de su fachada.



- Utilizar materiales de procedencia lejana (como, por ejemplo, determinados materiales pétreos o maderas exóticas), gravados por aranceles y costes de transporte, cuyas características intrínsecas son similares a las de los materiales autóctonos.
- Dimensionar los edificios más allá de las necesidades reales, establecidas a partir de criterios racionales. En la fotografía superior, puede apreciarse el colosal tamaño del Palacio de Congresos de Oviedo, obra del arquitecto Santiago Calatrava. Tiene una superficie total de 30.000 m², con un auditorio para 2.150 localidades, en servicio desde 2011. La ciudad de Oviedo tiene 226.000 habitantes. Por desgracia, no se trata de un hecho aislado, sino que es un ejemplo más, entre los otros muchos que pueblan nuestro país, de políticas de planificación en que los intereses de algunos particulares prevalecen sobre las realidades.

De todo ello, cabe concluir que, desde las primeras fases de gestación de un proyecto, son convenientes la reflexión y el diálogo entre los distintos agentes participantes, bajo un prisma de conocimientos técnicos y de solvencia profesional. A tal fin, en este trabajo se describen dos mecanismos de control del proyecto, integrados en el ciclo de mejora continua de todo proceso de trabajo basado en la experiencia: los planes maestros (o *master plans*, en su versión anglosajona) y las auditorías de proyecto.

En las decisiones de proyecto que se adopten, deben imperar los principios de perdurabilidad y trascendencia. El esfuerzo técnico, económico y ambiental que supone la construcción de un edificio ha de repercutirse a lo largo de su vida útil.

A diferencia de lo que sucedía en otras épocas, en que un edificio se construía “para siempre”, los edificios actuales tienen fecha de caducidad en razón de su período de amortización, si bien su vida útil, con un mantenimiento adecuado, puede prolongarse de forma sustancial. El período de amortización ha de ser,

necesariamente, inferior al de obsolescencia de los materiales y a los déficits funcionales que puedan generarse por la evolución de las necesidades y de la normativa a lo largo de la vida útil del edificio.

Un edificio es una pieza del paisaje habitado. Su presencia durante varias decenas de años en un enclave determinado incide en la vida cotidiana de las varias generaciones que interaccionarán con él, según su calidad intrínseca, en una amplia escala de sentimientos que va de la admiración al desagrado, y cuyo punto medio es la indiferencia.

El conocimiento y la valoración de la trascendencia en el lugar y en el tiempo de los edificios deberían contribuir positivamente a considerar aspectos fundamentales del discurso que sustenta el diseño, como su integración con el entorno, la búsqueda del contraste o la aplicación de valores de referencia.

1.2. La génesis y el progreso de la construcción en el tiempo. Construcción empírica, construcción científica y construcción tecnológica

La observación de una terminal de un aeropuerto, de un gran hospital o de un edificio de servicios de gran altura, por citar tres ejemplos significativos, permite concluir fácilmente que se trata de edificios complejos y, en algunos casos, prácticamente se trata de miniciudades.

Su diseño y las técnicas constructivas aplicadas en los mismos son resultado de la depuración de modelos, del análisis de necesidades, de la experimentación, de la actuación de equipos pluridisciplinarios de personal técnico muy cualificado y de la iniciativa privada y/o pública. Igualmente, para llevar a cabo su edificación, son necesarias la coordinación y la colaboración de técnicos e industriales de muy diversos ramos.

La complejidad funcional y técnica de los edificios se genera, en buena medida, como consecuencia de la necesidad de incorporar a los mismos las energías, los servicios y los suministros necesarios para abastecer tanto las necesidades derivadas de su funcionamiento orgánico como los sistemas de control ambiental de su interior.

Las exigencias, cada vez mayores, se refieren fundamentalmente a:

- La estanqueidad y, en general, la intervención en el ciclo del agua.
- Los aislamientos térmicos y acústicos, como base del confort.
- La salubridad y la calidad del aire.

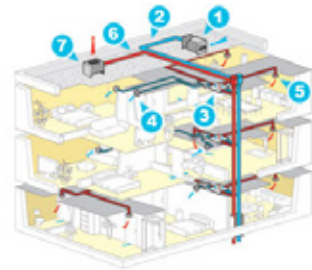
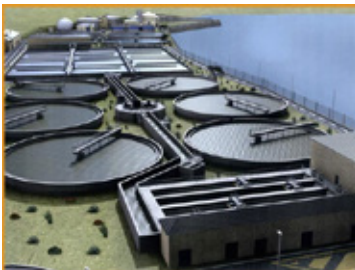


- La seguridad de utilización, la seguridad activa y pasiva frente al fuego y ante la intrusión.
- La accesibilidad para hacer frente común a todo tipo de discapacidades.
- La reducción de los impactos ambientales y de los consumos energéticos.
- La incorporación de energías alternativas, como una de las respuestas posibles a la exigencia anterior.

Las seis fotografías siguientes muestran los aspectos reseñados hasta el momento. La primera de la izquierda, correspondiente a una planta depuradora, ilustra el ciclo del agua; la central, un aislamiento acústico como elemento básico de confort; la de la derecha, un esquema de ventilación separativo del interior de un edificio de viviendas. En la fila inferior, de izquierda a derecha, se ilustran la prevención frente al riesgo de fuego, la necesidad de efectuar diseños constructivos aptos para todas las personas, considerando sus posibles limitaciones de movilidad, de visión o acústicas, y la generación y utilización de energías alternativas limpias en los propios edificios.

Los aspectos citados son solamente algunos de los más significativos y genéricos que ha de cumplir un edificio proyectado y construido de acuerdo con la normativa vigente. En España, el marco de referencia vigente para los edificios de viviendas es el Código Técnico de la Edificación (CTE).

Requerimientos y prestaciones son los conceptos que dan respuesta al marco de necesidades para un edificio. El umbral mínimo de cumplimiento es estable-





cido por ley (CTE). A partir del mismo, las necesidades del promotor y su sentido de la racionalidad, y la profesionalidad del proyectista, configurarán el edificio.

Los requerimientos suponen la definición, por parte del equipo técnico promotor del edificio, de los parámetros, tanto objetivos como sensibles, que debe cumplir el edificio. La plasmación estructurada de los requerimientos se recoge en un documento denominado *plan maestro* (o *master plan*, en versión anglosajona).

Las prestaciones se establecen documentalmente mediante el proyecto, en sus distintos apartados: anteproyecto, proyecto básico y proyecto ejecutivo. El proyecto, en su conjunto, determina la configuración espacial de las soluciones constructivas y los aspectos sensibles necesarios para dar respuesta estructurada y coordinada a los requerimientos establecidos en el plan maestro.

Una vez construido el edificio, es necesario verificar instrumentalmente que determinadas prestaciones del edificio cumplen con los requerimientos. Por ejemplo, hay que comprobar la eficiencia energética de determinadas instalaciones, de las renovaciones de aire o del comportamiento acústico de los cerramientos.

Ello supone la necesidad de dotar la edificación de unos requisitos de calidad basados en parámetros objetivos y, paralelamente, establecer los mecanismos necesarios para su verificación, control y certificación, esta última como garantía frente a terceros de las prestaciones reales que ofrece el edificio. Aspectos tales como la eficiencia energética, los aislamientos térmico y acústico o la salubridad derivada de las renovaciones de aire adquieren especial significancia en las construcciones desarrolladas con mayor rigor tecnológico.

Contrariamente a la complejidad técnica impuesta por los requerimientos y las prestaciones, los principios constructivos fundamentales han evolucionado relativamente poco, y conceptualmente son muy simples, puesto que responden, de forma combinada, a la consecución de un cobijo estanco, sobre la base de la absorción de los esfuerzos de tracción, compresión, flexión cortante y torsión.

Los cambios más significativos, a lo largo de la historia de la construcción, se han producido por la incorporación de materiales de mayores y mejores prestaciones, la creación de nuevos modelos estructurales y la aportación de los algoritmos en el diseño estructural. Esto último permitió, a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, dejar a un lado el limitado y engorroso sistema de ensayo y error a escala natural, que fue sustituido inicialmente por tanteos numéricos y esbozos realizados manualmente y, posteriormente, con el auxilio de las máquinas calculadoras.

A partir de las teorías desarrolladas durante el siglo XVIII, el Siglo de las Luces, sobre la geometría de las secciones, es posible determinar sus momentos de inercia y conjugarlos con otros parámetros derivados de la experimentación, con el propósito de determinar, de forma económica y sin riesgo para las personas,



la validez o no de las hipótesis establecidas para un determinado elemento con función estructural.

El empirismo imperante en la construcción durante siglos, periodo conocido en la actualidad como “construcción empírica”, da paso al cientifismo o “construcción científica” y esta, tras la Segunda Guerra Mundial, a la denominada “construcción tecnológica”.

Es significativa la relación entre la los anales de la construcción y la disponibilidad y el manejo de la energía a lo largo de la historia. La construcción empírica se llevó a cabo mediante la energía muscular de hombres y animales, y con la madera como combustible. La construcción científica basa su aportación mecánica en la energía derivada del carbón y del petróleo. La construcción tecnológica nace en paralelo con el control de la energía nuclear asociada a la producción eléctrica. El potencial enorme de la energía nuclear, junto con la utilización masiva de otras fuentes energéticas, ha generado indudables beneficios, pero también graves problemas, como la alteración de la capa de ozono y el calentamiento global del planeta.

En la actualidad, la producción de energía está experimentando un proceso de reconversión hacia las llamadas energías *limpias*, cuya meta es la fusión nuclear. La disposición de energía limpia e ilimitada deberá, en todo caso, orientarse y regularse con vista a una mejor conservación ambiental de nuestro planeta, conocido desde hace años como la “aldea global”.

El gran salto hacia la aplicación del conocimiento científico a la construcción se produce con la caracterización de las propiedades resistentes de los materiales, mediante el módulo elástico o el de deformación, según se trate de materiales elásticos o plásticos, y los momentos de inercia.

Conjugando ambos valores (momento de inercia y módulo elástico) con las sollicitaciones sobre un determinado elemento estructural, es posible dar respuesta a aspectos físicos, expresables numéricamente, que informan sobre el estado de sollicitación en que se encuentra un material con relación a sus capacidades potenciales, como la rigidez, el pandeo o las flechas, por citar los mas significativos. Así pues, dichos conceptos, asociados a cada material y sección resistente, son básicos para diseñar y dimensionar, de forma eficiente, las estructuras asociadas a la edificación, entre otras.

La potencia de cálculo de los ordenadores ha introducido de nuevo, y a otra escala, la posibilidad de retomar el método de ensayo y error mediante modelizaciones de todo tipo: estructurales, térmicas, acústicas, económicas, temporales o estéticas, por citar las más usuales. En las modelizaciones estructurales, se fijan las sollicitaciones, los parámetros geométricos de la estructura a verificar y las características resistentes del material o de los materiales a emplear. Con dichos datos, mediante tanteos e iteraciones, se determina la bondad o no de la solución propuesta. Esta situación no deja de ser un estadio hacia programas

más completos, que establecerán directamente el diseño óptimo para una estructura sujeta a unas especificaciones y a unas solicitaciones determinadas.

Igualmente, mediante el empleo de ordenadores, es posible, a partir de estados de mediciones detallados, determinar los consumos energéticos o las emisiones de CO₂ y, basándose en ellos, fijar los criterios de aceptación o de rechazo de determinadas técnicas o soluciones constructivas.

En la misma línea, es factible determinar los balances energéticos de los edificios o simular el resultado y los períodos de retorno resultantes de modificar las condiciones térmicas de los cerramientos de un determinado edificio, por citar alguna de las aplicaciones más significativas en dicho campo. La construcción científica da paso a la construcción tecnológica.

Frente al dinamismo de los aspectos descritos en los párrafos anteriores, destaca la escasa evolución de los aspectos estructurales de los sistemas constructivos. Estos están acotados, entre otros, por factores tan invariables como la gravedad y los esfuerzos generados por los fenómenos naturales: los sismos, el viento y los empujes de aguas y/o de tierras.

Por tanto, son los parámetros derivados de la física de nuestro planeta los que condicionan, en primer término, el diseño de los elementos resistentes de los edificios. En consecuencia, es determinante seleccionar aquellos materiales cuyo perfil de prestaciones mecánicas se adapte, en cada punto de la estructura, a los requerimientos de los esfuerzos de respuesta de la misma: tracciones, compresiones, esfuerzos cortantes y momentos flectores y torsores, junto con sus efectos combinados.

Si bien los criterios y las unidades para estimar los condicionantes físicos han variado a lo largo del tiempo, de la simple constatación física sensorial a los análisis ponderados científicamente, resulta evidente que no lo han hecho sus valores ni sus efectos reales sobre cada sistema constructivo en particular.

Ha sido colosal el esfuerzo de la especie humana para desarrollar los conocimientos y las capacidades de que disfruta en la actualidad. Las líneas siguientes son una reflexión sobre cómo y bajo qué criterios y mecanismos se ha desarrollado el trinomio que responde a los conceptos asociados de construcción, arquitectura y edificación.

1.2.1. Construcción empírica

La construcción empírica, como su nombre indica y se ha detallado de forma general en el apartado anterior, es aquella que se lleva a cabo sin soporte científico para organizar el diseño de los elementos constructivos que la componen. En la misma, resulta complejo separar el papel del diseñador del del constructor, y la función resistente de los muros de la de cerramiento.



La construcción empírica se presenta, a causa de su relativa simplicidad, como un todo compacto. Basta con recordar los requisitos de *utilitas, firmitas, venustas*, enunciados por Leone Battista Alberti (1404-1472) en su tratado *De re aedificatoria*, de 1450, como compendio de los valores que debían caracterizar un edificio, y compararlos, por ejemplo, con los requerimientos del Código Técnico de la Edificación.

El ámbito temporal de la construcción empírica abarca desde la época prehistórica hasta mediados del siglo XVIII, cuando los algoritmos, junto con el desarrollo de la ciencia relativa a la resistencia de los materiales, empiezan a tomar carta de naturaleza en las decisiones de diseño y de dimensionado de los elementos constructivos.

Es interesante señalar que tanto la construcción de base científica, como su heredera, la construcción tecnológica, si bien discurren por caminos conceptuales singulares mantienen con frecuencia, en la concepción de sus edificios, principios y parámetros generadores propios de la construcción empírica, cuya validez se ha mantenido inalterable a lo largo del tiempo, como se indica y se analiza en los apartados siguientes.

La construcción científica es un paso evolutivo significativo hacia la búsqueda de un mayor rigor en la definición de requerimientos y prestaciones de los edificios, la aplicación y el empleo de nuevos materiales, y la creación de formas y modelos, sin solución de continuidad con respecto a la tradición constructiva secular.

La construcción científica ha dado paso a la construcción tecnológica, basada en una organización avanzada del trabajo, sustentada en equipos pluridisciplinarios. En ellos, los conocimientos y la información fluyen con mayor caudal y de formas mucho más ágiles y eficientes que en los modelos precedentes. Cabe añadir la disponibilidad de máquinas, equipos y sistemas cada vez más sofisticados, eficientes y potentes. Sus aplicaciones abarcan tanto el diseño, el cálculo y el replanteo, como la ejecución física de los trabajos de edificación.

La industria de la construcción, incluso perdiendo el papel puntero del conocimiento humano que representaron los constructores de catedrales del gótico, ha evolucionado más en los últimos cincuenta años que en los cinco siglos precedentes y ha dado cumplida respuesta a los nuevos requerimientos sociales.

Volviendo a la construcción empírica, esta se fundamenta en la creación de modelos. A partir de ellos, empleando el procedimiento de ensayo y error a escala natural, se producen evoluciones de los distintos parámetros de la construcción hasta su agotamiento y abandono. El resultado es la creación de un nuevo modelo, de mejores prestaciones, que a su vez evolucionará, será abandonado y sustituido.



Elementos generadores de la construcción empírica

Los elementos generadores de los modelos constructivos propios de la construcción empírica, observados bajo la óptica tecnológica actual, son muy simples:

- La experiencia adquirida por el contacto directo con la obra
- La transmisión oral maestro-discípulo
- El ingenio y la intuición, entendidos como ingredientes de la capacidad para afrontar y resolver nuevos retos
- La creación de un estilo para dar respuesta a la necesidad emocional de otorgar significación jerárquica de los edificios

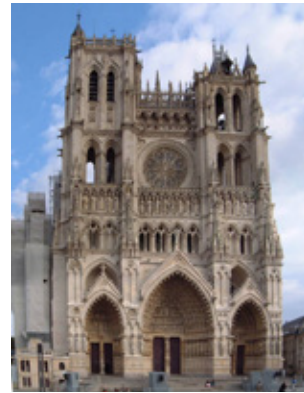
A continuación, se desarrollan los conceptos expuestos.

La experiencia como generadora del desarrollo de un modelo. Desde el primer acto consciente de “construir” de los hombres prehistóricos, cada constructor posterior se ha basado, de algún modo, en la experiencia, en la técnica, en los conocimientos y en los fracasos de sus predecesores. En base a ellos, se llega a desarrollar y a depurar un determinado modelo, capaz de responder, de forma satisfactoria para su época, a los requerimientos para los que ha sido concebido y construido.

Una vez conseguido un modelo fiable, el paso siguiente, para dar respuesta a la insatisfacción permanente de la especie humana, se orienta hacia el crecimiento dimensional y, en paralelo, a la depuración formal. Podría traducirse como “experimentar sobre lo conocido para hacerlo más grande y más bello”. Tal es el caso, por ejemplo, del incremento de la altura de las naves de siete de las catedrales góticas francesas más significativas, construidas todas ellas entre los siglos XII y XV, asociando la elevación de la altura de sus bóvedas a la depuración estilística de sus formas.

- Laon, iniciada a mediados del siglo XII, 26 m
- Chartres, iniciada durante el primer tercio del siglo XII, 36 m
- Bourges, finales del siglo XII, 37,50 m
- Reims, siglo XIII, 38 m
- Metz, construida durante los siglos XIII y XIV, 41,14 m
- Amiens, siglo XIII, 42,30 m
- Beauvais, catedral inconclusa, construida entre los siglos XIV y XV, al final del período gótico, tiene el record de altura de la nave, con 48 m

Las fotografías siguientes están colocadas en el mismo orden que la enumeración anterior. La tercera fila corresponde a la fachada y al interior de la catedral de Saint-Pierre de Beauvais, con sus bóvedas extraordinarias.



La transmisión oral maestro-discípulo. La transmisión oral maestro-discípulo es el mecanismo más simple de transmisión de conocimientos de carácter teórico, cualesquiera que sean la profesión o el oficio escogidos. Los conocimientos prácticos son adquiridos por contacto directo con la actividad cotidiana, que en el caso de los maestros constructores es la obra.



La transmisión oral es, a la vez, el procedimiento más limitado, tanto por el número potencial de receptores como por las propias limitaciones del emisor.

También es limitado el libre acceso a los conocimientos, puesto que depende exclusivamente de la voluntad del maestro. De hecho, se fomentaba el secretismo profesional para reducir la competencia y asegurar los encargos, de modo que en muchas familias los conocimientos del oficio eran transmitidos, de forma prácticamente exclusiva, de padres a hijos.

El paso natural siguiente es la agrupación de individuos con conocimientos similares, para compartirlos, acrecentarlos y controlar el mercado. Entran así en funcionamiento las organizaciones gremiales, que perdurarán, la mayoría de ellas, hasta bien entrado el siglo XVIII y que, en algunos casos, aun hoy se conservan. Una de sus funciones es establecer pruebas de conocimiento entre los aspirantes a acceder a los distintos grados de la profesión: aprendiz, oficial o maestro.

Como ejemplo de la pervivencia gremial, durante el año 2011 se celebró en el Saló de Cent del Ayuntamiento de Barcelona el 800 aniversario del Gremi de Constructors de Barcelona, que, pese a su avanzada edad, goza de buena salud, puesto que la entidad ha sabido adaptarse a los tiempos. De la original solo conserva el nombre y algunos de los rasgos de exclusividad. El gráfico inferior izquierdo muestra el anagrama del Gremi de Constructors de Barcelona, mientras que el de la derecha corresponde a L'Associació de Promotors de Barcelona, creada en 1969.



A escala estatal, la Confederación Nacional de la Construcción (CNC) es la organización empresarial máxima del sector de la construcción en España. Agrupa la gran mayoría de las organizaciones empresariales de este sector. Constituida en 1977 al amparo de la Ley 19/1977, de 1 de abril, sobre Regulación del Derecho de Asociación Sindical, tiene como objetivo la representación del sector ante los poderes públicos u otros entes nacionales e internacionales, públicos o privados. En este caso, es aplicable la frase de Giuseppe Tomasi di Lampedusa (1896-1957) en su novela *Il Gattopardo*: "Todo tiene que cambiar para que nada cambie."

La construcción empírica no fue más allá en cuanto a su organización interna y a los procedimientos para la promoción de sus miembros, natos o agregados.



Las construcciones de base científica y tecnológica, en cambio, han de disponer de un sistema de formación reglada para poder transmitir a los aspirantes la diversidad de aspectos de carácter humanístico, científico y técnico que las componen. Las escuelas técnicas universitarias responden a este perfil, y además facilitan el libre acceso a los conocimientos profesionales a las personas con más vocación y más capacitadas, con independencia, en teoría, de su cuna o de su posición social.

Su heredera, la construcción tecnológica, requiere, como elemento distintivo, la especialización de los individuos a partir de un tronco común de conocimientos. Las enseñanzas están armonizadas, en nuestro caso, a escala europea por el denominado Plan Bolonia.

Curiosamente, se siguen estructurando, igual que en la Edad Media, en tres niveles: grado, máster y doctor. La construcción tecnológica precisa, además, como se indica más adelante, del trabajo de equipos multidisciplinares.

El ingenio y la intuición. El ingenio y la intuición, entendidos como ingredientes de la capacidad para afrontar y resolver nuevos retos, son valores universales, aplicables a cualquier época, situación o circunstancia.

Durante el largo periodo temporal de la construcción empírica, su valor era superior, debido a la limitación de recursos y a la lentitud con que circulaba la información.

Comparando un arco diafragmático con una jácena (v. fotos inferiores izquierda y derecha, respetivamente), una bóveda con un forjado o el conjunto formado por arbotante y pináculo con un tirante (v. fotos siguientes izquierda y derecha, respectivamente), es fácil llegar a la conclusión de que cada par de los elementos citados podría cumplir unas funciones estructurales similares.



Del mismo modo y con la misma facilidad, por lo obvio de las cuestiones planteadas, se concluye que construir un arco diafragmático es más complejo que ubicar en el mismo lugar un perfil de acero o una sección de hormigón armado, si se dispone de los medios tecnológicos necesarios para ello. El mismo criterio es igualmente aplicable a los dos ejemplos restantes.



Es evidente que los constructores empíricos actuaron de la mejor manera posible para la época. Realizaron soluciones constructivas mostrando una creatividad y un ingenio que sigue causando admiración, haciendo de las limitaciones virtud.

El estilo. La palabra *estilo* en arquitectura es el resultado de un conjunto integrado de formas, técnicas y materiales producidos en un período temporal acotado y en una localización geográfica concreta.

En el pasado, los constructores de una determinada época y lugar levantaron sus edificios según sus posibilidades técnicas, al estudio de lo que habían realizado sus antepasados, el conocimiento de lo que estaban edificando sus coetáneos y su propia concepción de la belleza. Evidentemente, estaban construyendo de acuerdo con un determinado estilo y, al hacerlo, contribuían a consolidarlo, aunque, posiblemente no, eran plenamente conscientes de ello.

A partir del siglo XVII, los estudios analíticos realizados por eruditos, desde una perspectiva histórica, del arte en general y de la arquitectura en particular se encargaron de clasificar, valorar y dar nombre a las distintas concepciones que, en el caso de la arquitectura, inspiraron la construcción de edificios a lo largo de los siglos. Dichos trabajos fueron iniciados por Johann Joachim Winckelmann (1717-1768) y seguidos, de forma continuada, por numerosos autores, hasta nuestros días. En su conjunto, constituyen una base de conocimientos de primer nivel, que describen y definen la cultura y la tradición de los pueblos y las naciones.

El proceso de creación de los llamados *estilos arquitectónicos*, asociados al desarrollo de modelos, propio de la construcción empírica, es resultado del perfeccionamiento sucesivo de una determinada forma de expresión artística y técnica. Se trata de un proceso repetitivo, a lo largo de la historia, que responde al esquema siguiente:

- **La creación** de un modelo constructivo. Dicho modelo responde a unas nuevas formas y/o a unos materiales que han de experimentarse en el tiempo mediante unas fases iniciales de ensayo y tanteo.



- **El crecimiento** del modelo. Superados los titubeos iniciales, se procede al perfeccionamiento progresivo de las formas, de las técnicas constructivas y, en su caso, de la ornamentación. Es el llamado estilo pleno, coincidente con la época de mayor esplendor del modelo.
- **El agotamiento** del modelo se produce por la imposibilidad de introducir en él mejoras técnicas sustanciales. Ello da lugar al manierismo, que es tratado en el apartado siguiente.
- **El abandono** del modelo. Este se produce, en ocasiones, según se desprende de la historia, tras experimentar algún colapso estructural. A través de las experiencias positivas y, especialmente, de las negativas, el modelo define los límites de sus posibilidades dimensionales.
- **La creación de un nuevo modelo** asociado a una nueva concepción estructural, al empleo de nuevos materiales y aparejos y, también, habitualmente, a un nuevo estilo, a nuevas formas.

El manierismo. Cuando el conocimiento y el control de ejecución sobre un modelo constructivo perfeccionado por la experiencia son muy elevados, la fiabilidad estructural conseguida lleva a los proyectistas a centrar sus esfuerzos en aumentar la ornamentación, manteniendo inalterables los principios y los recursos estructurales.

Llega un tiempo en que no se logra mejorar el modelo estructural, debido al agotamiento de las posibilidades del mismo. Siguiendo el esquema utilizado al tratar de la experiencia como generadora del desarrollo del modelo, la situación sería equivalente a enunciar que el manierismo es “hacer conceptualmente aquello que es conocido, incidiendo fundamentalmente solo en la mejora de los aspectos decorativos”; tal sería el caso del primer gótico con respecto al gótico florido o flamígero (siglo XVI) o del barroco (siglos XVII-XVIII) con respecto al rococó (siglo XVIII).





A título ilustrativo de los excesos decorativos de los planteamientos manieristas, la fotografía izquierda anterior muestra la filigrana en piedra de la fachada del Colegio de San Gregorio de Valladolid (finales del siglo xv), de estilo gótico flamígero; la de la izquierda corresponde al interior de la basílica de Wilten (1751-1756) en Innsbruck, en que puede apreciarse su profusa decoración rococó.

Bases técnicas de la construcción empírica

A continuación, se exponen las bases técnicas de la construcción empírica, tanto por la necesidad de su conocimiento, como por su validez intrínseca como elementos de análisis de edificios de cualquier época y estilo, así como por la conveniencia y la necesidad de aplicarlas en la concepción de los edificios futuros.

A modo de esquema, las bases de la construcción empírica a través de las cuales se ha estructurado la exposición son los siguientes:

- Conceptuales – sentido artístico
 - Proporción y medida
 - Modulación
 - Ejes de simetría
 - Trazados reguladores
- Limitaciones dimensionales
- Técnicas
 - Planos generales, representaciones esquemáticas y perspectivas
 - Planos de monteá
 - Maquetas
- Estilísticas

A continuación, en los apartados siguientes, se desarrolla el esquema enunciado.

Aspectos conceptuales – sentido artístico. La concepción de un edificio es un proceso intelectual e interactivo complejo, en el cual se combinan aspectos técnicos, pragmáticos y estéticos. Como mecanismos de partida, el proyectista suele disponer de información relativa a modelos similares y de recursos conceptuales que, en su conjunto, podrían calificarse como el “oficio”. La intuición y el talento, aun siendo componentes significativos en el bagaje del proyectista, de nada valen si no van acompañados del conocimiento obtenido a través de la experiencia, del contacto directo con la obra, en definitiva, del “oficio”.

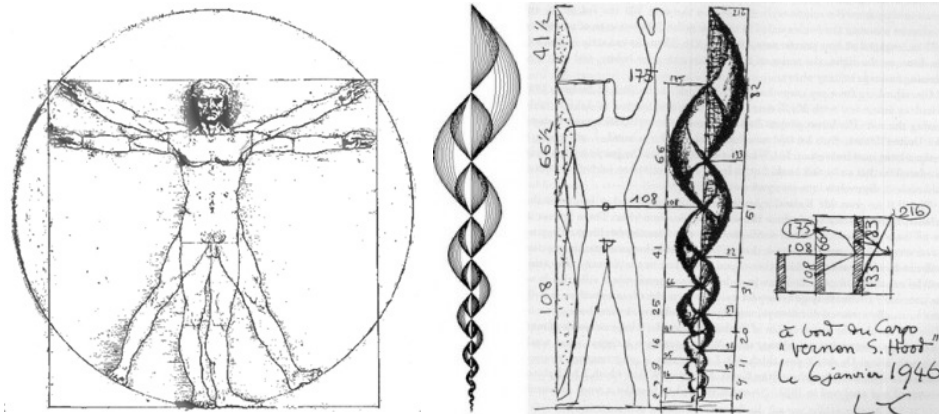
Las fotos siguientes corresponden al claustro del Monasterio de San Juan de Duero, en Soria. Construido en el siglo xiii, forma un cuadrilátero irregular cuyos cuatro ángulos, esto es, la propia esquina achaflanada y los paños que concurren en ella, son diferentes entre sí. Es, sin duda, uno de los espacios claustrosales más excepcionales no ya de España, sino de todo occidente. Muestra una capacidad integradora de las formas con un sentido artístico fuera de lo común.



Es preciso reconocer, además, que por encima del conocimiento y del oficio, los aspectos innatos, el sentido artístico o la sensibilidad, si es fuera de lo común, marcan la diferencia entre un buen proyectista y un genio capaz de producir innovaciones estéticas y conceptuales que, posteriormente, puedan ser adoptadas y seguidas por numerosos discípulos.

Los recursos conceptuales facilitan la organización de los espacios, en consonancia con los elementos resistentes, a partir del manejo de parámetros como la proporción, el modulado, los ejes de simetría y los trazados reguladores. A continuación, se desarrollan en detalle estos parámetros.

Proporción y medida. El uso de la proporción supone saber aplicar una distribución adecuada y un equilibrio entre el vacío y lo ocupado, entre el espacio útil y los elementos resistentes. El uso de la proporción se basa en la consideración, por parte del autor, de su propio cuerpo como generador y como receptor del resultado de su trabajo. De ahí deriva la belleza intrínseca de las obras bien concebidas. Además, es una constante a lo largo de la historia.



La conocida imagen de la fotografía superior izquierda corresponde a las proporciones geométricas del hombre vitruviano, interpretadas por Leonardo da Vinci (1452-1519) en 1490. La fotografía superior derecha es un gráfico de 1946 del no menos conocido modulator de Le Corbusier (1887-1965).

Comparando las dos fechas, puede observarse que, quinientos cincuenta y seis años después, el análisis de las proporciones del cuerpo humano sigue estando en la base del diseño constructivo.

Actualmente, las proporciones del cuerpo humano continúan regulando el diseño, no solo de la edificación, sino también de los más diversos objetos de producción industrial, bajo el concepto de ergonomía, y lo seguirán haciendo en el futuro.

El sentido de la proporción sobrevive con solvencia al cientifismo impuesto por considerandos basados más en el número obtenido en un algoritmo que en la racionalidad profunda. Buena prueba de ello es que resulta habitual, en el lenguaje técnico de la construcción actual, referirse a las relaciones canto-luz de un elemento estructural como valores de garantía de resistencia y estabilidad.

Cabe concluir que la proporción es un factor de la perfección geométrica de los edificios, asumida desde el modelo imperfecto, geoméricamente hablando, del cuerpo humano.

Si las aplicaciones prácticas de la proporción en el ámbito tecnificado actual de la construcción son muy diversas, estas resultaron especialmente útiles en sociedades que carecían de un sistema unificado de pesos y medidas.

Como ejemplo, baste con citar a Juan Bautista Corachán (1661-1741), matemático, físico, científico y astrónomo, que escribía en pleno siglo XVIII: “12 palmos, pies o varas de Valencia son 13 de Castilla. Mas 44 palmos de Valencia hacen 51 de Zaragoza, y 50 de Barcelona y Mallorca, según Puig; pero, según Cortés, 100 palmos de Valencia son 114 de Aragón. El pie de Valencia es igual al geométrico o romano antiguo.”

Ello demuestra la abundancia de sistemas de medida existentes solo en el ámbito de la Corona de Aragón, en una época tan avanzada. Mientras esto sucedía, matemáticos, astrónomos y científicos habían desarrollado o estaban desarrollando algunos de los principios, descubrimientos y teorías del llamado “Siglo de las Luces”. En su conjunto, tales acciones contribuyeron a cambiar conceptos e ideas seculares, transformando sustantivamente el conocimiento y la propia estructura de la sociedad.

La incidencia práctica del cientifismo sobre la arquitectura y la construcción tardó un siglo en producirse, a mediados del siglo XIX, con el advenimiento de la arquitectura del hierro.

Volviendo a la construcción empírica, la llamada “medida cierta”; también llamada “medida justa”; definida *in situ*, correspondía a la luz mayor de la construcción que se pretendía realizar. Dicha medida era la base sobre la cual se aplicaba un sistema de proporciones, que se transmitía oralmente de maestro a discípulo. Con el mismo, se establecían las dimensiones de los distintos elementos resis-

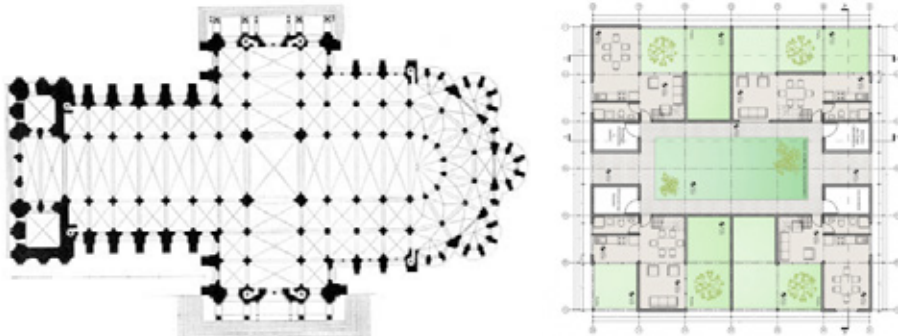


tentes de la construcción, los gruesos de los muros, los espesores de arcos y bóvedas, los contrafuertes, los refuerzos, etc.

Mediante el procedimiento de ensayo y error, “se sabía” empíricamente, por ejemplo, que dentro de los límites dimensionales habituales, y con las prestaciones mecánicas de los materiales disponibles en la época, el espesor de un muro se podía establecer en la décima parte de la luz o que, para construir una torre de base cuadrada con una proporción de hasta 1:5 (base respecto a altura), era preciso disponer una sección resistente en la base equivalente a la mitad de la sección total del perímetro. Ello se consigue geoméricamente con la dimensión del lado del cuadrado obtenido uniendo los puntos medios del cuadrado de la base.

La transmisión oral y la aparición del cientifismo en la construcción propiciaron la pérdida de los conocimientos empíricos derivados de las proporciones. Los estudiosos de la construcción empírica han destinado no pocos esfuerzos para tratar de desentrañar las relaciones proporcionales que configuran la estabilidad y la armonía de edificios que, siglos después de ser construidos, siguen admirando y subyugando.

Modulación. La modulación consiste en descomponer la complejidad del edificio en elementos simples y repetitivos, es decir, generar un *módulo* fácilmente reproducible para conformar, por adición, un proyecto o un edificio determinados. Se trata de aplicar el sabio precepto de “divide y vencerás”.



La fotografía superior izquierda corresponde a la catedral de Chartres, construida durante los siglos XII y XIII. En ella, se aprecia la modulación de los distintos tramos que conforman sus naves, de forma que puede afirmarse que el edificio queda conformado por la adición y la repetición de unos pocos elementos modulares.

La fotografía superior derecha refleja el modulado, en planta, de una construcción actual. Con muchos siglos de diferencia, se sigue aplicando el mismo concepto para edificios con usos muy diversos: la modulación. Fraccionar, igualar y repetir determinados espacios, en un mismo edificio, es un buen recurso.

La modulación facilita construir de forma más precisa, simple, racional y eficiente. El modulado reduce el tiempo de trabajo y optimiza los recursos frente a otras soluciones constructivas similares en que esta acción de diseño no ha sido considerada.

La información precedente muestra que la modulación es un mecanismo de diseño que se ha empleado con éxito en todas las épocas y, por tanto, es un valor seguro en el bagaje conceptual de diseñadores y constructores.

Ejes y/o planos de simetría. Los ejes y/o planos de simetría aplicados a la concepción y a la construcción de los edificios suponen utilizar la repetición y el equilibrio formal especular, propio de la mayoría de los seres vivos. La aplicación de ejes y/o planos de simetría, si bien puede ser prescindibles, constituye un elemento racionalizador y de equilibrio de primer orden en la composición de los edificios.

Los ejes y/o los planos de simetría, junto con el planteamiento de las proporciones correctas y una generación adecuada de módulos, son otro de los recursos del proyectista para organizar espacios.

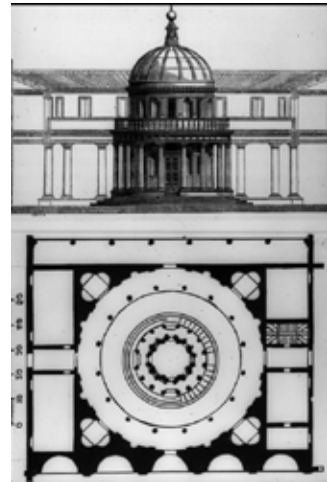
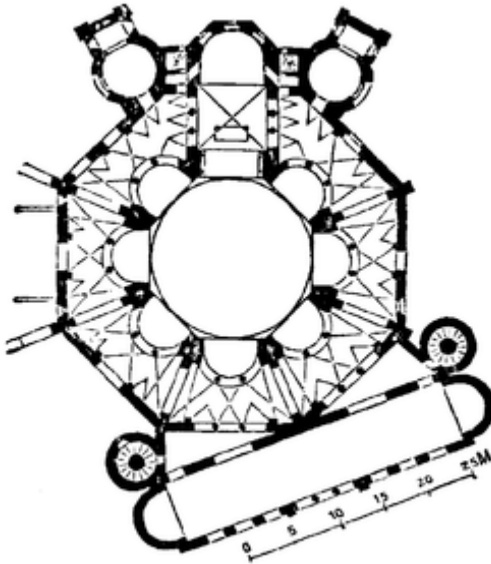
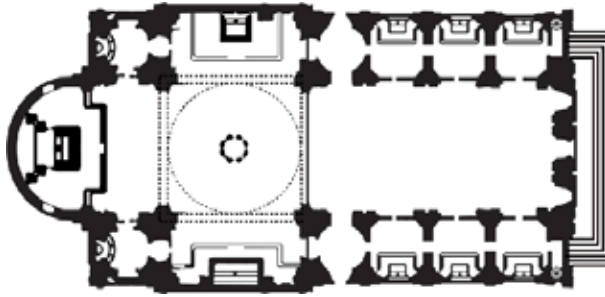
Los ejes de simetría pueden establecerse en planta y en alzado, mientras que los planos de simetría responden a una concepción espacial del edificio.

Los ejes de simetría, adoptados en la composición de un edificio de cierta complejidad, admiten jerarquías según los espacios que conforman. Por tanto, es posible disponer, respecto a un eje de simetría principal, otros secundarios, paralelos u ortogonales entre sí.

Los encuentros entre ejes de simetría constituyen puntos álgidos de la construcción en que suelen concentrarse aspectos técnicos con ámbitos de representatividad y simbólicos.

El gráfico de la izquierda de la siguiente página corresponde a la planta de la iglesia del Gesù de Roma (1568), realizada por Jacopo Barozzi da Vignola (1507-1573). Además del eje longitudinal principal, las naves laterales también son simétricas. La zona del crucero, donde se encuentra la cúpula, es simétrica en sentido transversal. También en sentido transversal al eje principal, cada una de las capillas es simétrica. La fotografía de la derecha, correspondiente a la fachada del mismo edificio, permite apreciar, además del eje central, la existencia de otros ejes secundarios, correspondientes a las ventanas laterales o a las distintas pilastras.

Cuando los ejes de simetría adoptan una disposición radial, los edificios así planteados se denominan de planta central. Tal es el caso de la imagen inferior, correspondiente a la iglesia bizantina de San Vitale de Rávena, consagrada en el año 547. Otro ejemplo característico de planta central es el templete de San Pietro in Montorio en Roma, construido en 1510 por Donato Bramante (1444-1514), situado a su derecha.



Plantear una construcción mediante ejes de simetría supone tener un dominio avanzado de los conceptos de proporción y modulación.

Como resultado de todo ello, la disposición de ejes y/o planos de simetría:

- Favorece la apreciación de la composición estética.
- Racionaliza y allana el proceso de construcción mediante la repetición de elementos.
- Facilita el establecimiento de jerarquías entre los espacios.
- Determina puntos álgidos de la construcción en sus encuentros.
- Como aspecto negativo, la simetría rigidiza, en ocasiones, las posibilidades compositivas y volumétricas de determinados edificios.



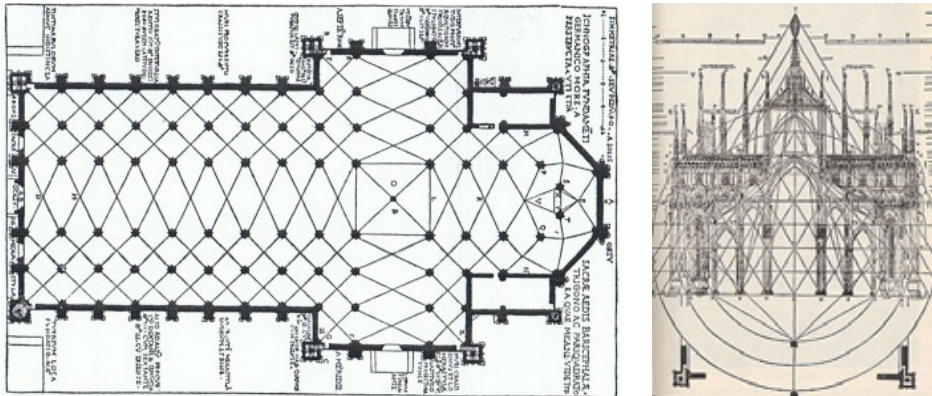
Los trazados reguladores. Los trazados reguladores son esquemas geométricos simples –triángulos, cuadrados, círculos o polígonos regulares. Estos son asociados por el proyectista de forma repetitiva y modular. A partir de ellos, se disponen y proporcionan los distintos elementos compositivos del edificio.

Los trazados reguladores desarrollados en alzado y planta contribuyen, a través de la proporción y del modulado, a la racionalidad y al equilibrio estético de las construcciones.

De acuerdo con el esquema espacial generado por el trazado regulador, en la construcción empírica se establece el diseño final del edificio como resultado de la fusión indisoluble de los modelos estructural y constructivo.

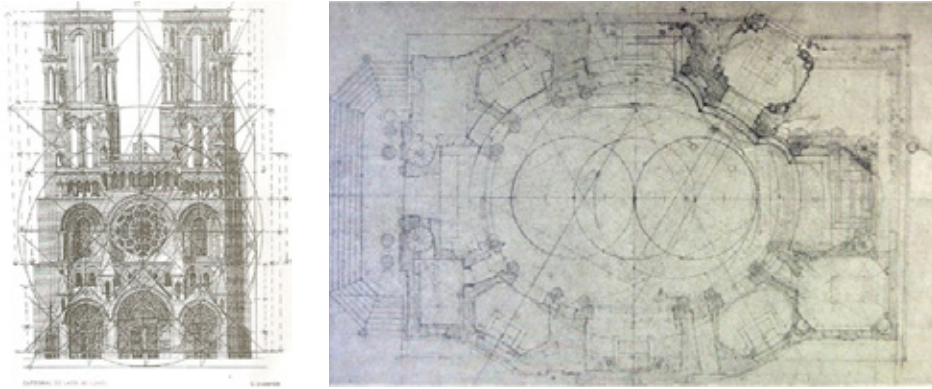
En las catedrales góticas, generalmente, las plantas están organizadas mediante relaciones de cuadrados (*ad quadratum*), mientras que los alzados y las secciones se suelen regir por triángulos (*ad triangulum*).

La planta y la sección de la catedral de Milán (v. gráficos inferiores) responden a dicho planteamiento.



La fotografía inferior izquierda corresponde al trazado regulador del alzado de la catedral de Laon, dibujado en 1919 por el investigador Frederik Macody Lund. En su libro *Ad Quadratum*, llega a la conclusión que, además de la de Laon, las catedrales de Chartres y Notre Dame de Paris fueron diseñadas de acuerdo con la sección áurea.

La fotografía siguiente derecha muestra el tercer estudio realizado por Francesco Borromini (1599-1667) para la iglesia de San Carlo alle Quattro Fontane de Roma, construida entre 1634 y 1637. En ella, la geometría, de base elíptica, se elabora y se hace compleja para responder al manierismo propio de la época.



Así pues, los constructores empíricos medievales y renacentistas basaron sus diseños en la geometría de Euclides (c. 365-275 aC), siguiendo una tradición que arranca en la Grecia clásica y gana consistencia con la gran actividad constructora de la civilización romana.

Es de destacar que, si bien la caída del Imperio Romano supuso la pérdida de muchos conocimientos de la antigüedad, una gran parte del saber antiguo volvió a Europa, en la Baja Edad Media, gracias a las traducciones de los clásicos efectuadas por los árabes.

La transmisión cultural a Europa de los textos clásicos grecolatinos se produjo desde la Península Ibérica, dominada en parte por los califas musulmanes, gracias, entre otras, a la Escuela de Traductores de Toledo, desde donde dichos textos, previamente traducidos del latín al árabe, eran difundidos en lengua romance a las universidades y las escuelas.

Por su parte, para dar respuesta a los requerimientos que les exigían a sus obras, los constructores se encargaron de poner de nuevo al día algunos de aquellos conocimientos, aunque fuese de modo empírico.

El trazado regulador, concebido como elemento referencial de un sistema de proporciones, parte de la "medida cierta", también llamada "medida justa", ya referida anteriormente. Un mismo trazado regulador puede dar respuesta a muchos modelos funcionales, desde una vivienda hasta una iglesia.

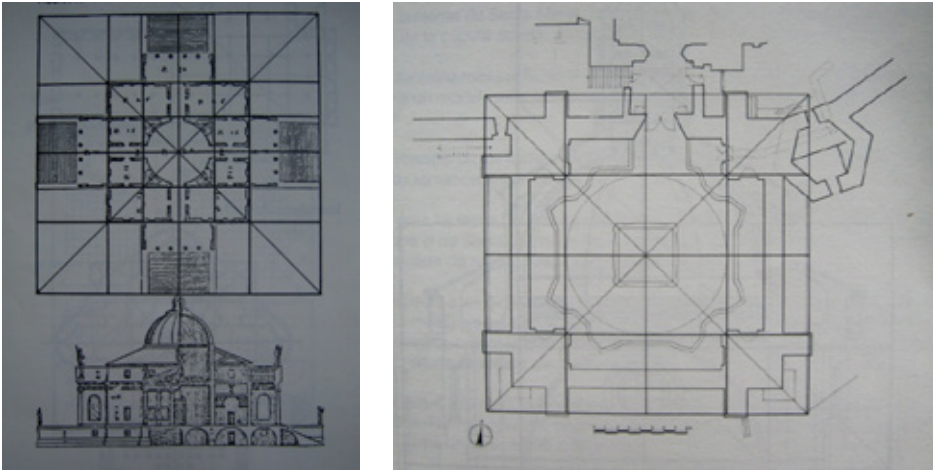
A título de ejemplo, el gráfico siguiente izquierdo muestra el trazado regulador de la planta de la Villa Capra, conocida como la Rotonda (después de 1549), de Andrea Palladio (1508-1580), absolutamente idéntico al de la Sagrístia Nova del Monasterio de Santa Maria de Poblet, construida entre 1739 y 1749, obra de Tomàs Monguillot (aprox.1685-1755).

Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879), con el fin de analizar los planteamientos compositivos de los maestros del gótico, propuso ensayar los trazados

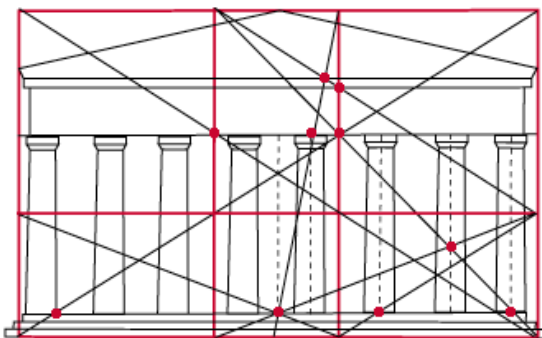


reguladores de los alzados de las catedrales góticas por el método de los triángulos. Encontró, como triángulos generadores, o al menos regulares:

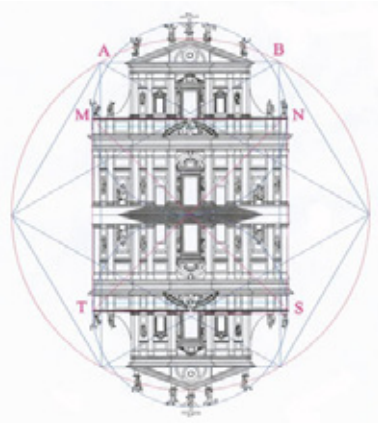
- El triángulo equilátero
- El triángulo isósceles, que él denominaba *egipcio*, cuyas proporciones son 4 unidades para la base y 2,5 unidades para la vertical trazada desde el centro de la base.



El gráfico inferior muestra el sistema de proporciones del Partenón, construido entre los años 447-432 aC, ya regidas por trazados reguladores.



La fotografía siguiente izquierda detalla, superpuesto, el trazado regulador de la fachada del patio de los Reyes del Monasterio del Escorial, realizado por los profesores C. García Reig, I. García Ríos y M. Hidalgo, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPM.



El gráfico siguiente derecho corresponde al trazado regulador obtenido por el arquitecto zamorano J. M. Martín Misol en su trabajo titulado *Reglas de composición en la iglesia del Gesù*, que ha sido puesta como ejemplo, en páginas anteriores, al tratar de los ejes y los planos de simetría.

Los ejemplos adjuntos ponen de manifiesto el rigor geométrico que rigió la composición de los grandes maestros constructores a lo largo de siglos y el valor que este rigor sigue teniendo en la actualidad como generador de edificios correctamente compuestos y estructurados.

Limitaciones dimensionales. En la construcción empírica, los aspectos dimensionales estuvieron acotados por las limitadas posibilidades técnicas para la manipulación y la puesta en obra de los materiales, las reducidas prestaciones mecánicas de los materiales disponibles y el escaso número de estos. Las construcciones se realizaban exclusivamente con piedra, adobe, mortero de cal y madera hasta el advenimiento, a mediados del siglo xix, primer del hierro y posteriormente del acero y del hormigón. Los materiales de construcción eran aplicados en las fábricas en estado natural, con muy escasas transformaciones.

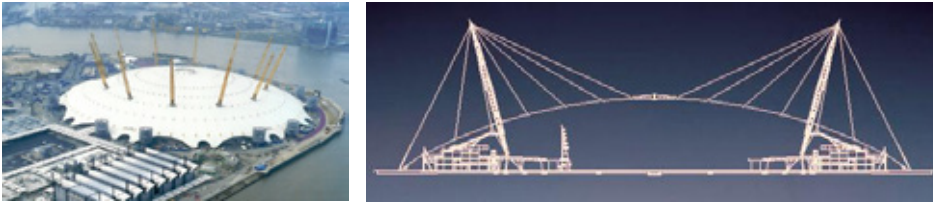
En estas condiciones, sus prestaciones no podían satisfacer, de manera eficiente, las necesidades estructurales de los espacios diáfanos, cada vez mayores, reclamados por sociedades en constante crecimiento y evolución. Esta disfunción perpetua ha propiciado, a lo largo del tiempo, la evolución de modelos y técnicas, y la aparición de nuevos materiales. Tales aspectos son analizados en el capítulo dedicado a la construcción de grandes luces.

En contraposición, las posibilidades técnicas que ofrece la construcción tecnológica actualmente para salvar grandes luces, para edificar en altura o para construir bajo rasante superan ampliamente las necesidades a escala humana. Ello es debido al gran salto cualitativo obtenido a través del cientifismo y del desarrollo de nuevos materiales y de las técnicas de construcción necesarias para su ensamblaje y puesta en obra. Un breve inciso permitirá verificar los aspectos reseñados.



En los eventos realizados bajo techo en que concurren un gran número de personas (fácilmente se pueden superar las diez mil), es preciso potenciar la presencia de los protagonistas mediante pantallas gigantes de televisión y/o equipos de megafonía. Curiosamente, en la situación histórica actual, en que se dispone de espacios cubiertos para dar respuesta a las necesidades de grandes convocatorias, también se cuenta con sistemas de difusión a distancia de la imagen y del sonido. El “vivo” y el “directo” pueden ser así compartidos “en directo” por millones de personas en todo el mundo, lo cual relativiza la necesidad de disponer de grandes aforos.

Espacios “demasiado grandes”, como el Millennium Dome, de 365 m de diámetro y 50 m de altura, proyectado por el arquitecto Richard Rogers (1933) e inaugurado el año 2000 (v. foto y gráfico inferiores), no han tenido el éxito comercial esperado. La gran carpa ha permanecido cerrada los últimos años y solo ha sido reutilizada en los Juegos Olímpicos de Londres 2012 para acoger las competiciones de gimnasia artística y baloncesto. A tal fin se creó, en 2007, un recinto interior denominado “The O2 Arena” en el que, con anterioridad a los Juegos Olímpicos, se realizaron diferentes eventos como las finales ATP World Tour (2009-2012) o el Campeonato Mundial de Gimnasia celebrado en 2009. En la actualidad el edificio se encuentra cerrado.



Algo parecido sucede con los edificios “demasiado altos”, eso es, aquellos que tienen más de ochenta plantas. En ellos, los costes de construcción y los gastos de mantenimiento crecen exponencialmente con la altura, por lo que no resultan competitivos con respecto a otras propuestas más racionales. En Europa, uno de los edificios más altos en la actualidad es el Turning Torso, de cincuenta y cuatro plantas, situado en la localidad sueca de Malmö; en Asia, el Burj Dubái (v. fotografías inferiores derecha e izquierda).





En cuanto a la construcción bajo rasante, las hidrofresas (v. fotografías inferiores) permiten realizar la excavación de muros pantalla hasta una profundidad de 150 m, con lo que su potencial se sitúa muy por encima, por ejemplo, de las necesidades bajo rasante del escenario, un gran teatro de ópera. A título de ejemplo, la caja escénica del Gran Teatre del Liceu de Barcelona se encuentra a 54 m con respecto a la rasante de la calle.



Volviendo a la construcción empírica, que es la de los edificios más comunes, está condicionada por la masividad de las fábricas y las aberturas reducidas, aplicadas como respuesta común a unas técnicas constructivas poco evolucionadas.

Igualmente, las disponibilidades habituales, en sección y longitud, de los troncos de los árboles de las especies maderables, así como las reducidas posibilidades de ensamblaje y de transporte de la madera, limitaron, durante siglos, la luz de los forjados a crujías de entre cuatro y cinco metros, que generaban las típicas casas de pueblo de una sola crujía estrecha y muy profunda, denominadas en Catalunya "*cases de cos*"; es decir, de un solo cuerpo o de crujía única (v. foto inferior izquierda, donde puede observarse un grupo de casas adosadas de esta tipología). La foto de la derecha muestra el modelo en planta y sección.





Los aspectos dimensionales de los materiales pétreos vienen determinados por los problemas derivados de las limitaciones de transporte y de elevación. Ello condicionó las construcciones, en las cuales tuvieron que emplearse, salvo raras excepciones, los materiales pétreos cercanos a la zona de trabajo. Paralelamente, a lo largo del tiempo se tendió a construir con piezas de menor tamaño y, en consecuencia, menos pesadas. La famosa frase de Mies van der Rohe “menos es más” viene aplicándose en la construcción desde tiempos inmemoriales.

Las dos fotografías inferiores corresponden, respectivamente, a fragmentos de las murallas de Tarragona y de Barcelona. Obsérvese el contraste dimensional entre la construcción ciclópea de época romana, situada en la zona inferior y el empleo de sillarejos, de tamaño mucho menor, en el recrecido medieval.



Hasta la aparición de la máquina de vapor y, posteriormente, del motor de explosión y la electricidad, las construcciones se realizaban mediante el esfuerzo muscular de los hombres y los animales, con el auxilio de unos medios muy primarios, como picos, palas, palancas, cuerdas, poleas, tornos o cabestrantes.

Como ejemplo, la foto inferior izquierda muestra un dibujo medieval de una grúa accionada, por el principio de la palanca, mediante el desplazamiento de una persona situada en el interior de una rueda. La foto de la derecha corresponde a una reproducción, a escala natural, de un modelo de grúa medieval cuyo principio de funcionamiento es idéntico al del dibujo.





Como se ha indicado, hasta la aparición de los materiales propios de la construcción científica –en primer lugar, el hierro y, posteriormente, el acero, el hormigón armado y la madera laminada encolada–, no se produjo un salto cualitativo significativo en las posibilidades de construir grandes luces.

Puede afirmarse que, en la actualidad, superados ampliamente los problemas para resolver espacios diáfanos, edificios altos o vasos de edificación muy profundos, el discurso de la construcción se centra en la eficiencia, en la reducción de los impactos ambientales y, en definitiva, en seguir haciendo “más con menos”.

Técnicos. El presente apartado tiene por objeto describir los recursos de que se valieron los proyectistas y los constructores que practicaron la construcción empírica para poder plasmar y transmitir sus conceptos e ideas, en primer lugar, a los próceres que habían de aprobar sus propuestas y, posteriormente, a los operarios encargados de llevarlas a cabo.

Los recursos técnicos a los cuales se hará referencia son:

- Planos generales, representaciones esquemáticas y perspectivas
- Planos de monteá
- Maquetas

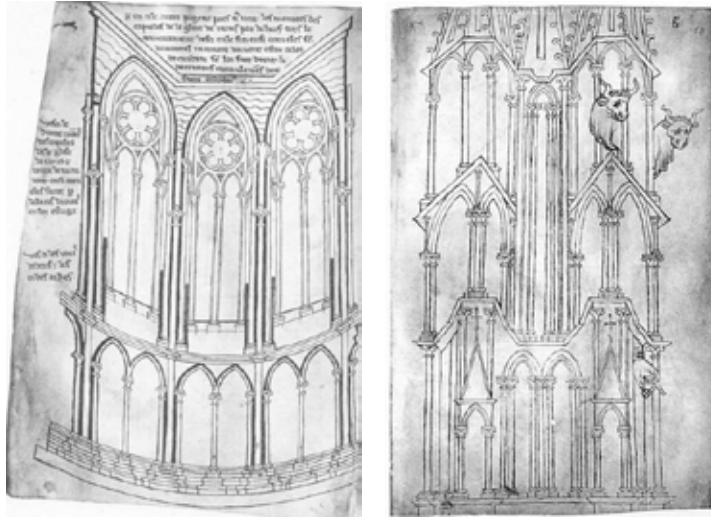
- **Planos generales.** Si bien algunos de los constructores de catedrales alcanzaron gran prestigio en su época, de la mayoría de ellos no se dispone nada más que del nombre registrado en los libros de fábrica de las catedrales. No se conservan sus proyectos, ni los planos que debieron utilizar.

Los dibujos sobre arquitectura y construcción más antiguos que se conservan corresponden al arquitecto o maestro de obras francés Villard de Honnecourt (c. 1200-c. 1250).

Además de su famoso *Livre de portraiture*, un cuaderno de 33 páginas en pergamino en que se explican las técnicas empleadas por los constructores de la época, Villard se preocupó de reproducir un buen número de plantas de edificios: los coros de las catedrales de Cambrai y Meaux, de la abacial cisterciense de Vaucelles, y el proyecto de coro elaborado por el propio Villard y Pierre de Corbie (c.1215-1250), es decir, las “trazas” las grandes líneas definidoras del espacio interior y el espesor de los muros.

El dibujo siguiente izquierdo, correspondiente a su cuaderno, muestra, en una tentativa de perspectiva, los alzados interiores de las capillas del coro de la catedral de Reims. El de la derecha, en la misma línea, representa la torre de la catedral de Laon.

De los dibujos de Villard puede concluirse que durante la época gótica se dibujaba y se proyectaba de forma independiente en alzado o en planta, y

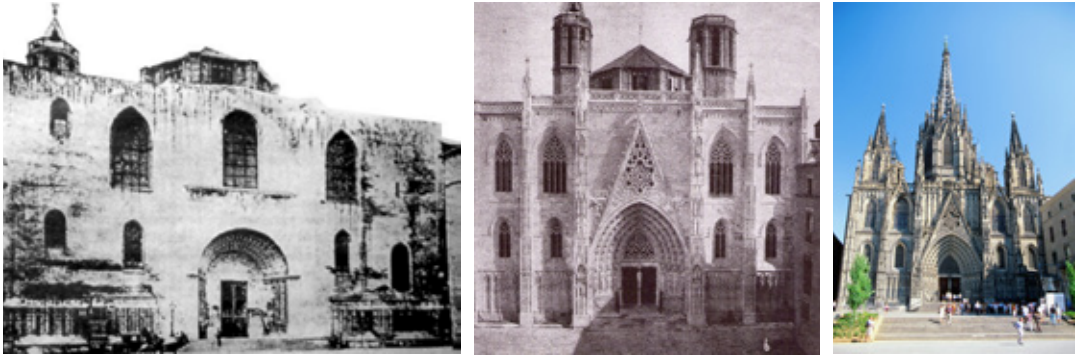


que los medios técnicos para materializar los trazos eran muy precarios. Estiletes, plumas de ganso, pergaminos, reglas de madera, escuadras y compases constituían todo el bagaje material de que disponía un proyectista para enfrentarse a la construcción de una catedral.

Es lógico que, en una situación de mínimos, prevalecieran los esquemas marcadamente prácticos, orientados a “hacerse entender”. En esta línea, se encuentran los intentos de perspectiva de Villard. Cabe suponer que debía seguir el estilo de representación y los modos propios de la época, si bien, como se ha indicado, no se dispone de documentos similares de su tiempo para constatarlo.

A Carles Galtés de Ruan (1378-1448?), también llamado “mestre Carlí” o “maestre Carlín”, se debe uno de los pocos dibujos góticos de gran formato que se conservan. Lo realizó en 1408 sobre pergamino. Actualmente, se conserva en el Archivo Diocesano de Barcelona. Permite conocer muy de cerca las técnicas de dibujo y de representación de los maestros constructores de la época.

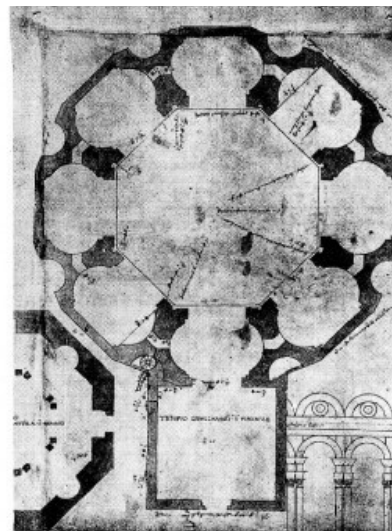
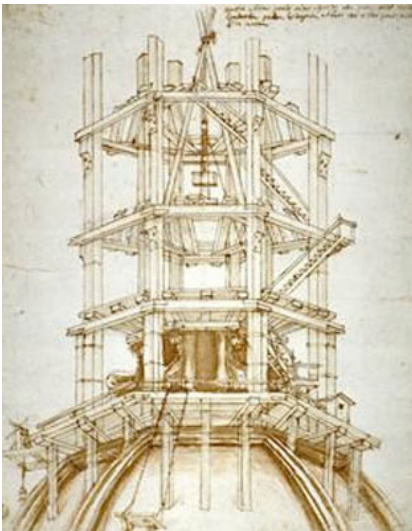
Corresponde a las trazas de la fachada principal de la catedral de Barcelona. Los problemas económicos derivados de las epidemias que periódicamente afectaban a la ciudad paralizaron su construcción. Un simple muro cubrió, durante siglos, la fachada de la catedral Barcelona hasta que, a partir de 1855, el arquitecto Josep Oriol Mestres (1815-1885), secundado por August Font i Carreras (1846-1924) incorporó el dibujo del mestre Carlí a su proyecto para la terminación del edificio, que comprendía, además de la fachada, el cimborio coronado por la imagen de santa Elena. Casi quinientos años más tarde, las trazas del mestre Carlí se hicieron realidad en la imagen actual del templo, poniendo en evidencia la validez del sistema de representación empleado.



La fotografía superior izquierda muestra el muro que constituía la fachada de la catedral antes de la intervención, la central permite apreciar la incorporación del diseño del mestre Carlí y la de la derecha responde a la imagen actual del templo.

La gran capacidad para representar el espacio de Filippo Brunelleschi (1377-1446), entre otros, ha dejado muestras de perspectiva intuitiva, en el primer Renacimiento italiano, como la representada en la fotografía inferior izquierda, correspondiente a los andamios que proyectó para construir la linterna de la cúpula de Santa Maria del Fiore en Florencia.

Igualmente representativo de la forma de proceder de la época es el dibujo de la fotografía inferior derecha, realizado por Giuliano da Sangallo (1445-1516), de la iglesia de Santa Maria degli Angeli, también de Brunelleschi. Junto a la planta, se encuentra una perspectiva intuitiva del interior en la cual se representa, además, la imagen exterior de la linterna.





La perspectiva cónica, como sistema de representación realista de arquitecturas y objetos, no llegó a cuajar mediante reglas geométricas estructuradas hasta los trabajos del pintor renacentista Piero della Francesca (c. 1415-1492).

Obsérvese el rigor geométrico de las arquitecturas representadas en dos de sus obras, en que es posible establecer los puntos de fuga: a la izquierda, el fresco de la Flagelación en Urbino; a la derecha, un fragmento del altar de Montefeltro.



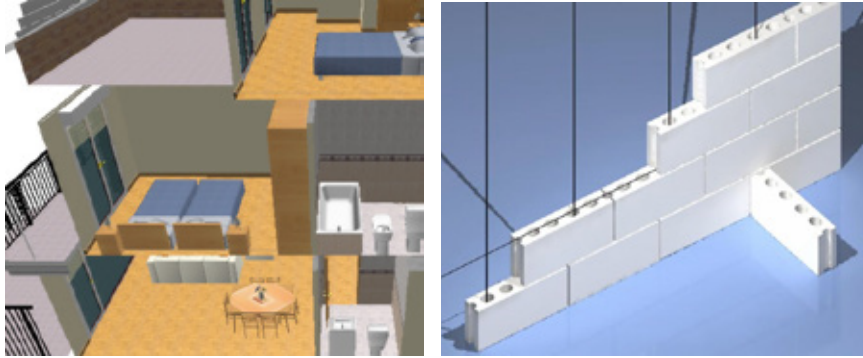
El rigor científico y técnico, combinando alzados, plantas y secciones, de Gaspard Monge (1746-1818), creador de la geometría descriptiva para representar las tres dimensiones en las dos del papel, tardaría aún tres siglos en llevarse a la práctica.

La geometría descriptiva, una de las primeras y más grandes aportaciones de la construcción científica, permitió obtener, en verdadera magnitud, las dimensiones de un cuerpo geométrico complejo mediante el empleo de recursos técnicos como los abatimientos y los cambios de plano de sus plantas, alzados y secciones.

Dichos recursos técnicos fueron utilizados, inicialmente, para disponer de plantillas para el tallado preciso de piezas de sillería de formas complejas. Ello, junto con la mejora de la metalurgia, permitió alcanzar un desarrollo y una perfección extraordinarios en los trabajos de cantería desarrollados a partir de finales del siglo XVIII.

Posteriormente, la geometría descriptiva fue adoptada como sistema de representación universal, tanto en arquitectura y construcción como en ingeniería.

En la actualidad, la geometría descriptiva, transformada, si es preciso, en realidad virtual, se ha incorporado con éxito a la construcción tecnológica, mediante programas de ordenador de diverso alcance (v. gráficos inferiores).



La geometría descriptiva ha seguido el mismo camino de otros muchos aspectos conceptuales y disciplinas que vieron la luz en el fructífero período comprendido entre mediados del siglo XVIII y mediados del siglo XX. La rápida difusión de la validez de sus principios y la eficiencia de los recursos aportados por todos ellos han permitido resolver, fácilmente y de forma práctica, numerosas cuestiones que, de otro modo, habrían quedado en el ámbito de la especulación teórica.

- **Planos de montea.** A la vista de la magnitud y la complejidad de las obras asumidas con éxito por los constructores medievales y renacentistas, así como de lo parco de los medios técnicos disponibles para traspasar al plano real y materializar conceptos e ideas transformándolos en edificios, cabe plantearse: ¿Cómo lo hacían? ¿De qué medios se valían?

La respuesta a estas cuestiones se encuentra en los planos de montea, entendidos como los dibujos a tamaño natural de un elemento arquitectónico, realizados habitualmente sobre un suelo previamente preparado. Se obtenía así un plano sensiblemente horizontal, que garantizaba la precisión de los trazos efectuados sobre el mismo con el auxilio de reglas, escuadras y cuerdas. Era común extender, a tal fin, un enlucido de cal, aunque en otros casos el plano de montea era cincelado sobre las losas del pavimento.

Los planos de montea se dibujaban lo más cerca posible de la construcción. Los trazos dispuestos en el suelo servían de referencia y guía para el tallado y el ajuste de las piedras. Sobre los mismos, se iban depositando las distintas piezas o sillares que configuraban el elemento a construir, una jamba, un arco o las nervaduras de una bóveda ojival, por citar tres ejemplos. Tal procedimiento, ingenioso y práctico, permitía verificar y corregir, en su caso, en el plano horizontal la idoneidad y el ajuste de sillares y dovelas, antes de ser colocados en el plano vertical donde iban destinados.

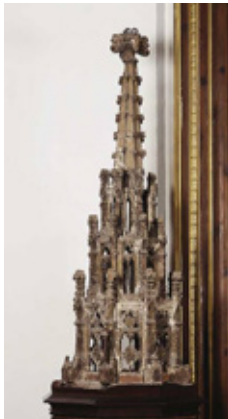
En el caso de las nervaduras de una bóveda ojival, se pasaba del plano al espacio al establecerse el cruce de los arcos confeccionados en el plano de montea, mediante la correspondiente clave conjunta. La fotografía in-



ferior izquierda muestra los trazos conservados, sobre el pavimento de piedra, de un plano de montea correspondiente a la ermita del Salto al Cielo, del Monasterio de la Cartuja en Jerez (siglo xv). La fotografía inferior derecha corresponde al dibujo de una montea representada en el *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du xie au xvie siècle*, de Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879).



- **Maquetas.** La utilización de maquetas en arquitectura, para ofrecer una visión tridimensional y realista del edificio proyectado, tiene sus orígenes en el Renacimiento italiano.



La fotografía inferior muestra la maqueta del remate para el campanario denominado "el Micalet" de la catedral de Valencia. Dicha maqueta fue proyectada en 1453 por Antoni Dalmau (act. 1435-1453). Si bien las formas son marcadamente góticas, debido al retraso de la penetración de las ideas del Renacimiento en nuestro país, la fecha indica que el recurso de la maqueta responde a influencias del Renacimiento italiano. El proyecto finalmente no se llevó a cabo, y en su lugar se construyó una estructura provisional de madera para sustentar las campanas, que subsistió hasta la construcción de la espadaña barroca (1660-1736), que conforma el perfil actual de la torre.

Las maquetas se siguen empleando en la actualidad y compiten con los sistemas de realidad virtual, propiciados por la potencia de cálculo de los ordenadores.

Los arquitectos renacentistas realizaban las maquetas en sus estudios. Dicha forma de proceder se impuso, dadas las limitaciones de los sistemas técnicos de representación gráfica de la época, así como para dar una respuesta eficiente a los concursos que convocaban, en la época, los patrocinadores de las grandes obras. Además, las maquetas se em-



pleaban como guía y referencia para llevar a cabo las obras. A tal fin, se realizaban maquetas con mayor nivel de detalle.

La fotografía inferior izquierda muestra la maqueta desarrollada por Filippo Brunelleschi para la linterna de la cúpula de Santa Maria del Fiore, construida entre 1446 y 1461. La central y la de la derecha corresponden a la maqueta de la cúpula de San Pedro del Vaticano, realizada por encargo de Giovanni Poleni y Luigi Vanvitelli con motivo de las obras de consolidación de la misma, iniciadas en 1748.



En la actualidad, para llevar a cabo las obras de La Sagrada Família, se siguen utilizando maquetas, construidas a partir de la recomposición de las originales de Antonio Gaudí, destruidas durante la Guerra Civil (1936-1939). La foto inferior izquierda muestra la maqueta del templo; la de la derecha es la maqueta invertida correspondiente a los polígonos funiculares definidores de los perfiles de las bóvedas mediante los efectos de la gravedad.





Bases estilísticas de la construcción empírica

En apartados anteriores, se ha hecho referencia al estilo como uno de los signos de identidad de la construcción empírica; no obstante, el concepto de estilo, entendido como un conjunto integrado de formas, técnicas y materiales producidos en un período temporal acotado y en una localización geográfica concreta, ha perdurado hasta nuestros días.

Los llamados *estilos arquitectónicos* son el resultado del estudio y la clasificación posterior, por parte de los historiadores, de la actividad de los constructores dentro de un ámbito geográfico y en un lapso temporal; por ejemplo, el románico lombardo, el gótico francés o el *quattrocento italiano*.

La fotografía inferior izquierda, ejemplo de románico lombardo, corresponde al atrio y a la fachada de Sant'Ambrogio de Milán (siglo XII). La fotografía central muestra el interior de la catedral de Bourges (finales del siglo XII y principios del XIII), ejemplo de gótico francés. A la derecha, como ejemplo del *quattrocento*, una imagen de la Cappella Pazzi en Florencia, construida en 1430 por Filippo Brunelleschi (1377-1446).



En la arquitectura contemporánea, los críticos asumen, en primera instancia, el papel de los historiadores. A los críticos, a través de sus observaciones analíticas, les corresponde señalar e identificar tendencias y poner en evidencia elementos de identidad, toda vez que la consagración de un estilo arquitectónico requiere, necesariamente, perspectiva histórica para su consolidación y aceptación como tal por el conjunto de la comunidad científico-técnica.

La confluencia de ambos factores, espacio y tiempo, queda indisolublemente asociada a determinadas formas de concebir y de decorar los edificios y llega a constituir un auténtico “lenguaje” con el cual el constructor y el proyectista se comunican de forma clara y, en buena medida, establecida y pactada por los usos y costumbres, con el receptor de la obra.

En la construcción empírica, el estilo es asimilable a un punto de partida, a una base. Mediante el estilo, el profesional trata de educar y de satisfacer los gustos



estéticos y funcionales de su cliente y de quienes, de algún modo, interaccionen de forma sensible con el edificio.

Ello supone que cada edificio, perteneciente a un estilo asociado a la construcción empírica, presenta un repertorio formal propio y limitado de elementos compositivos, constructivos y decorativos. El conjunto, integrado por bóvedas, cubiertas, basas, capiteles, órdenes gigantes, cornisas o molduras, que lo configuran y constituyen su seña de identidad, lo encuadran dentro de un estilo y, en consecuencia, en una época y en un lugar.

1.2.2. Construcción científica

Después de siglos de inacción, como consecuencia de la caída del Imperio romano y por las continuas guerras de religión que le sucedieron, a partir del siglo XVIII, especialmente en su segunda mitad, la sociedad se halla en condiciones de superar los niveles tecnológicos alcanzados por la civilización romana.

En el campo de la construcción, los avances que se producen en el período comprendido entre mediados del siglo XVIII y la Segunda Guerra Mundial son realmente extraordinarios, puesto que las decisiones y los diseños se realizan a partir de simulaciones numéricas de verificación. En los procesos edificatorios, se produce un salto cualitativo sin parangón histórico, fruto del cientifismo.

Como consecuencia de ello, el curso de la historia de la construcción y, en general, del conjunto de la sociedad se acelera de forma exponencial, desde el momento en que es posible “saber” y garantizar de antemano, mediante métodos científicos, aspectos tan capitales como la estabilidad de una estructura o la idoneidad de un elemento constructivo frente a determinadas solicitaciones.

Conceptos que fundamentan la construcción científica

A continuación, se introducen y posteriormente se desarrollan algunos de los aspectos más relevantes que caracterizan la construcción científica:

- **La transmisión reglada de los conocimientos.** Frente a la transmisión oral maestro-discípulo, se adopta un sistema mejor de transmisión de conocimientos y éstas se extienden a un mayor número de interesados.

Los “especialistas” de cada materia son los encargados de transmitir sus conocimientos específicos, de modo que un mismo alumno recibe los conocimientos destacados de diversos enseñantes. Con las lógicas adaptaciones por el paso del tiempo, el mecanismo sigue funcionando en la actualidad.



- **El contacto con la tradición empírica.** El análisis de la historia de la construcción científica muestra que es posible identificar numerosas fechas concretas a partir de las cuales se produce la incorporación de un nuevo material o una nueva técnica constructiva, que marcan un antes y un después en la forma de proceder de los constructores.

El mismo análisis permite concluir que el contacto con los elementos esenciales de la construcción empírica no tan solo no se trunca, sino que sigue constituyendo una plataforma desde la cual elaborar la construcción científica.

- **El desarrollo y la aplicación de los sistemas de representación.** Si bien el sistema de representación por excelencia del espacio tridimensional en las dos dimensiones que impone el papel es el denominado *sistema diédrico*, otros sistemas de representación toman carta de naturaleza, y su conocimiento científico y operativo pasa a formar parte del bagaje de conocimientos científicos de los técnicos vinculados a la edificación. Tal es el caso de la *perspectiva cónica*, de las variantes derivadas de la *perspectiva axonométrica* y del *sistema acotado*.
- **La unificación de unidades de peso y medida.** La disponibilidad de un sistema de pesos y medidas de aplicación universal supuso, para la construcción, unificar el lenguaje dimensional, lo cual vino a facilitar la fabricación, el intercambio y la colocación de elementos constructivos de distintas procedencias, de dimensiones coincidentes.
- **La aportación de algoritmos,** inicialmente orientados al cálculo estructural y, posteriormente, para resolver aspectos relativos a las instalaciones y al confort interior de los edificios.
- **La incorporación de nuevos materiales** y su desarrollo y aplicaciones partir de a estudios científicos, en especial el hierro, el acero y el hormigón armado, sin excluir la “reinvención del ladrillo” y la evolución tecnológica aparejada de las obras de fábrica de albañilería.
- **La aplicación de los principios derivados de la mecánica de suelos** en el diseño de las cimentaciones. Por primera vez en la historia de la construcción, se dispone de unas bases teóricas que permiten prever el comportamiento de un suelo frente a las acciones generadas por un edificio.
- **La disponibilidad de energía mecánica y/o eléctrica** a pie de obra, para ser aplicada a usos tan diversos como el transporte, la elevación o la manipulación y colocación de los elementos constructivos.
- **La sofisticación progresiva de las instalaciones** en los edificios, con la incorporación de ascensores, alumbrado, calefacción, aire acondicionado...



- **El desarrollo de la lucha activa y pasiva contra el fuego**, mediante la mejora de los diseños constructivos, la experimentación y la aplicación de los resultados a los edificios, en virtud de textos normativos con fuerza de ley.
- **La escasa atención prestada al aislamiento térmico**. Durante este período, se siguen manteniendo tradiciones constructivas que dan por válidas soluciones técnicamente muy mejorables.

Tratar a fondo cada uno de los aspectos citados excede las posibilidades de este trabajo. Los apartados siguientes contienen simples reflexiones a los puntos enunciados.

La transmisión reglada de los conocimientos. En contraste con los planteamientos medievales, tendentes a la ocultación y al control de los conocimientos, la transmisión reglada de los mismos es una de las grandes aportaciones del cientificismo. La creación de escuelas y facultades por parte de los estados absolutistas fue determinante para la formación de profesionales de los distintos ramos.

En el caso de la arquitectura, los orígenes reglados de sus enseñanzas en nuestro país arrancan con la fundación, en 1744, de la Real Academia de las Tres Nobles Artes (pintura, escultura y arquitectura) en Madrid, siguiendo el modelo de las academias francesas.

Los estudios de arquitectura se iniciaron en 1752 y los primeros títulos de arquitecto fueron expedidos en 1757. En 1844, como consecuencia de una reestructuración de los planes de estudios, se separaron las tres enseñanzas y se creó un estudio especial de arquitectura que, en 1857, dio lugar a la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, la cual, con las debidas adaptaciones a los tiempos, sigue cumpliendo sus funciones.

Por lo que respecta a Barcelona, en 1875 se fundó oficialmente la Escuela Provincial de Arquitectura, si bien ya había empezado a funcionar en 1871. Con anterioridad, a partir de 1817, ya se impartían estudios de arquitectura en la Escola de Nobles Arts de Llotja, dirigidos por Antoni Cellers i Azcona (1775-1835) y patrocinados por la Reial Junta Particular de Comerç.

Paralelamente, entre 1850 y 1875, se ubicó en la sede del edificio histórico de la Universidad de Barcelona la Escola de Mestres d'Obres, que posteriormente fue denominada Escuela de Agrimensores y Aparejadores y, desde 1875 hasta 1954, conocida como la Escuela de Aparejadores.

La transmisión reglada de conocimientos desde las escuelas de Barcelona favoreció tanto el desarrollo de modelos constructivos de la primera arquitectura del hierro como el desarrollo de la albañilería, aspectos que culminaron en la eclosión del modernismo.



La fotografía inferior izquierda, ilustrativa de la arquitectura realizada en hierro, corresponde al invernáculo del Parc de la Ciutadella de Barcelona (1883-1887), obra de Josep Amargós i Samaranch (1849-1918). La fotografía inferior derecha muestra las columnas fungiformes y las bóvedas de fábrica de ladrillo proyectadas por Antonio Gaudí (1852-1926) para las caballerizas del Palau Güell. En las mismas confluyen, en perfecta conjunción, la genialidad del arquitecto con el oficio de los albañiles.



El contacto con la tradición empírica. La construcción empírica tiene una historia que se cuenta por milenios. Puede decirse que el acto de construir no tan solo consiste en dar respuesta a unas necesidades de protección y de abrigo, sino que es también un acto de afirmación de la dignidad y de la sensibilidad humana. Responde a una voluntad de superación y de mejora respecto a los logros anteriores. Es, en definitiva, un fiel reflejo de la insatisfacción constante que hace evolucionar a nuestra especie.

Las razones expuestas son de suficiente peso para justificar que la construcción científica no supone romper o abandonar los valores más significativos de la tradición empírica.

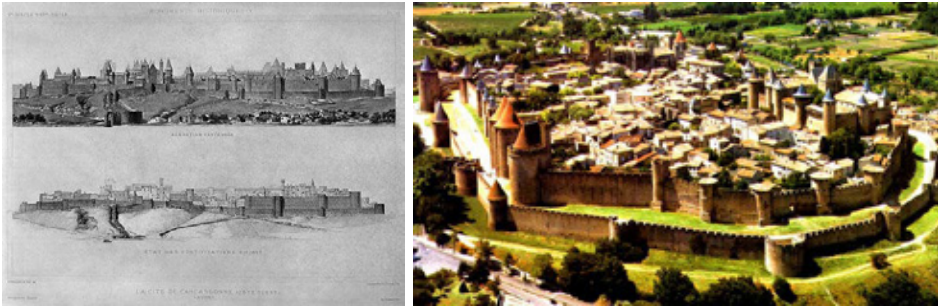
A los practicantes de la construcción científica, precisamente por su capacidad de conocimiento y análisis, debemos el aprecio por las obras del pasado. Es durante la etapa de la construcción científica cuando se toma conciencia del valor de las construcciones antiguas como patrimonio cultural que debe ser protegido y preservado, y esta concepción es plenamente vigente en la construcción tecnológica.

Sirvan tan solo unas fechas y unos nombres para ilustrar una época que ha dejado huella en nuestros días. Los italianos Camillo Boito (1836-1914), Luca Beltrami (1854-1933) y Gustavo Giovannoni (1873-1947) sentaron los principios de las intervenciones arquitectónicas basadas tanto en el estilo como en el respeto a las superposiciones que el edificio patrimonial ha experimentado a lo largo de su historia.

La escuela francesa de restauración, también denominada romántica, encabezada por Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879) y Auguste Choisy (1841-1909). En ella prevalece la recuperación de la pureza del estilo y de las formas por encima de la autenticidad, como reflejo distorsionado de una *grandeur* de-

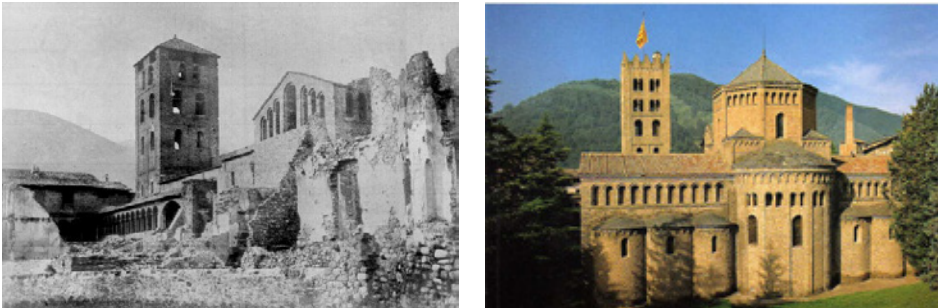
seada pero que, en realidad, nunca llegó a producirse. Un ejemplo extremo de esta forma de proceder es la Cité de Carcassonne, de que quedaban tan solo unas pocas trazas antes de la intervención de Viollet-le-Duc.

La fotografía inferior izquierda muestra, en la parte inferior, el estado del alzado oeste de la Cité en 1853, antes de la restauración; en la zona superior, la propuesta de Viollet-le-Duc en una ilustración de *Monuments Historiques*. La fotografía de la derecha corresponde a una visión del estado actual de la Cité de Carcassonne. Desde 2011, la Cité se encuentra incluida en la lista de bienes culturales declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.



En nuestro país, destacan algunas figuras pioneras de la conservación y defensa del patrimonio arquitectónico y cultural, como Elias Rogent i Amat (1821-1897), Lluís Domènech i Montaner (1850-1923), Josep Puig i Cadafalch (1867-1956), Jeroni Martorell i Terrats (1877-1951) y Leopoldo Torres Balbás (1888-1960). Si bien la restauración romántica es la que realizan inicialmente los primeros restauradores, se acaba imponiendo el rigor histórico en las intervenciones de aquellos pioneros, siguiendo la línea de la escuela italiana.

La fotografía inferior izquierda muestra cómo quedó el Monasterio de Ripoll a causa de las destrucciones de 1835. En 1886, bajo los auspicios de Josep Morgades (1826-1901), obispo de Vic, y la dirección de las obras a cargo de Elias Rogent i Amat, se inició la reconstrucción del cenobio. Este fue consagrado de nuevo el 1 de julio de 1893. Si bien la reconstrucción se sitúa en la línea romántica, Rogent estudió los detalles constructivos de la iglesia de Sant Jaume de Frontanyà para recrear los elementos desaparecidos.





El desarrollo y la aplicación de los sistemas de representación. Como se ha visto, originariamente las enseñanzas de la pintura, la escultura y la arquitectura emergen de un tronco común. La formación de los primeros arquitectos se nutría del dominio del dibujo, clasificado en las vertientes de artístico y técnico.

El dibujo técnico, en arquitectura y en construcción, tiene como objetivo representar edificios y elementos de forma que puedan ser construidos. Ello implica la necesidad de dibujar los elementos a escala, así como de utilizar diferentes escalas para mostrar los detalles con precisión.

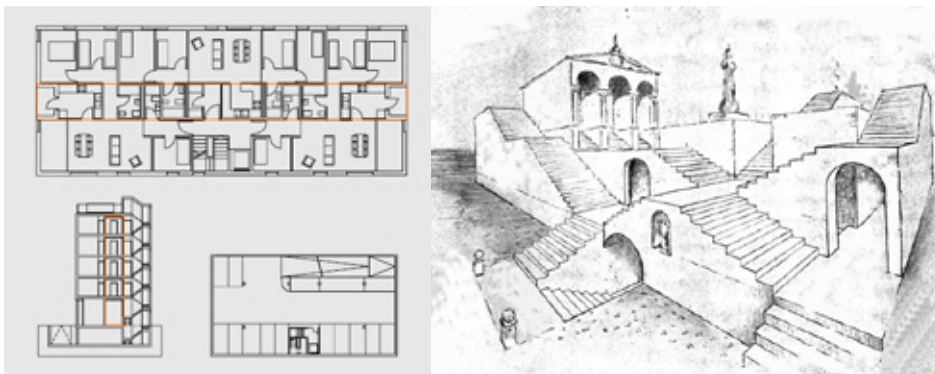
El conocimiento del sistema diédrico, al cual dedicaban no pocas horas de estudio, permitía a los profesionales de la construcción concebir edificios complejos, cuya configuración espacial podía ser fácilmente interpretada y aplicada por cualquier otro técnico con conocimientos similares.

Los aspectos determinantes para definir un edificio estaban contenidos en los planos, puesto que la información complementaria que proporcionaban la memoria y el estado de mediciones era escasa, en relación con la que se obtenía de la lectura de las plantas, los alzados y las secciones.

Véase el ejemplo de la fotografía inferior izquierda. Un simple plano que contenga dos plantas y la sección de un edificio, a partir de unas tecnologías conocidas y reconocidas como válidas, haría posible la construcción completa del mismo.

La perspectiva cónica, ocasionalmente con la incorporación de color a la acuarela, se utilizaba para realizar presentaciones efectistas sobre el resultado final que se pretendía alcanzar con la construcción de un edificio determinado. La perspectiva cónica, en el marco de la construcción científica, fue utilizada como un instrumento para elaborar una maqueta en dos dimensiones (v. foto inferior derecha).

El sistema acotado era el empleado en el desarrollo de planos topográficos, mientras que las perspectivas axonométricas, en todas sus variantes, fueron escasamente aplicadas en el ámbito de la construcción científica.





La unificación de unidades de peso y medida. Al hacer referencia a la construcción empírica, se puso de manifiesto la dificultad añadida del localismo imperante en las unidades de medida, en una actividad de carácter marcadamente nómada.

Entre los numerosos cambios políticos y sociales asociados a la Revolución Francesa de 1789, cabe destacar la adopción, en 1791, de un sistema de medidas normalizado, que adoptaba como unidad de longitud el *metro*, vocablo derivado del griego y que significa “medida”.

La base de las unidades de medida se obtuvo de las dimensiones de la Tierra y de la densidad del agua. Otra gran aportación fue el empleo de la base 10 para relacionar múltiplos y submúltiplos, contrariamente a los sistemas tradicionales, en que las unidades se dividían en tres, doce o dieciséis partes iguales. De este modo, se facilitaron las operaciones aritméticas.

A escala internacional, el sistema métrico original se adoptó en la Conferencia General de Pesos y Medidas de 1889, en que se reconocieron seis unidades físicas básicas, a las cuales se añadiría en 1971 una séptima: el mol. En 1960, ya en el ámbito temporal de la construcción tecnológica, se creó el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Todos estos cambios se realizaron al objeto de referir dichas unidades a fenómenos físicos fundamentales, con lo cual se facilitó la calibración de los instrumentos en cualquier lugar del mundo.

La única excepción es la unidad de la magnitud masa, el kilogramo, que sigue conservando su definición tradicional. En la actualidad, merced a la unificación producida entre los años 2006 y 2009, el SI se unificó con la norma ISO 31 y se instauró así el Sistema Internacional de Magnitudes ISO/IEC 80000, que se identifica con las siglas ISQ.

La aportación de los algoritmos. El ámbito temporal de la construcción científica es una época marcada por el esfuerzo individual de físicos y matemáticos que, provistos casi únicamente de lápiz y papel, desarrollaron con sus trabajos las bases de la construcción moderna. Personajes como:

- Isaac Newton (1642-1727)
- Daniel Bernoulli (1700-1782)
- Leonhard Euler (1707-1783)
- Gaspard Monge (1746-1828)
- Thomas Young (1773-1829)
- Claude-Louis Navier (1785-1836)
- Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)
- Jakob Steiner (1796-1863)
- Carl Culmann (1821-1881)
- Karl von Terzaghi (1883-1963)



entre otros muchos, contribuyeron a mejorar sustantivamente las prestaciones, tanto estructurales como de confort, de los edificios. Doscientos cincuenta años, aproximadamente, separan a Isaac Newton y su teoría gravitatoria de Karl von Terzaghi, autor de la mecánica de suelos.

La construcción científica se basa en la aplicación de leyes físicas previamente analizadas y representadas mediante formulaciones matemáticas. Estas permiten efectuar verificaciones numéricas (simulaciones de bajo costo) y, en consecuencia, orientar y depurar el diseño.

En origen, los primeros trabajos con aplicación directa sobre la construcción tuvieron como objeto la resistencia de los materiales y las estructuras derivadas de los mismos. Ello no excluyó, en absoluto, la aplicación progresiva de otros muchos aspectos de la física a la construcción desarrollada con base científica, entre ellos los relativos a la acústica, a la conductividad térmica, al confort interior de los edificios o al comportamiento de los materiales frente al fuego, por citar algunos de los aspectos más relevantes.

Si se considera el tiempo necesario para que los principios científicos pasen a ser de dominio de los técnicos y que estos los apliquen, de forma sistemática, a la construcción de edificios, podemos colegir que, a diferencia de la construcción empírica, cuya vida se cuenta por milenios, la construcción científica se desarrolló, de modo vertiginoso y exponencial, a lo largo de un fructífero período de unos doscientos años.

La primera aportación de la física a la ciencia de la construcción se produce en el campo de la sistematización y la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales a través de la experimentación. Ello genera el desarrollo de una rama de la física denominada *materiales* de resistencia.

El método de trabajo aplicado en el ámbito de la resistencia de materiales se basa en:

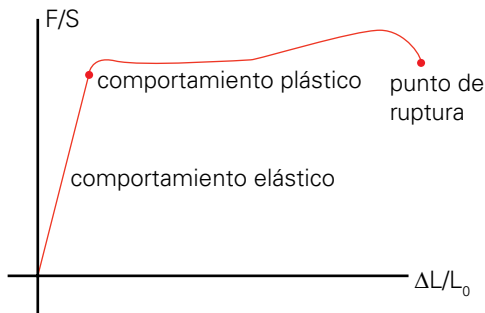
- Someter los materiales de construcción más significativos a una batería de ensayos normalizados para parametrizar su respuesta frente a esfuerzos de compresión, de tracción, cortante, de flexión y de torsión.
- Ponderar, con base en las situaciones pésimas, las sollicitaciones a que se hallaría sometida una sección determinada. Además de los pesos propios y las sobrecargas, conocidas como cargas gravitatorias, para hacer frente a los problemas derivados de las construcciones en altura fue preciso considerar los efectos del viento y de los sismos. La edificación bajo rasante y la construcción de presas y taludes requirieron determinar, de forma fiable, los empujes de la tierra, del agua y sus efectos asociados.



- Establecer, para cada tipo de material, un coeficiente de seguridad equivalente a un divisor de reducción con respecto al valor caracterizado de rotura, cuyos límites oscilaban entre 2 y 5, en el cálculo clásico.
- Verificar que, en la sección diseñada, no se superan los valores de tensión preestablecidos para cada material.

Para el estudio de las deformaciones producidas en los materiales sometidos a tensión, se desarrollaron diversas teorías, denominadas genéricamente “teorías de la elasticidad”, como por ejemplo la de Navier-Bernoulli, introductora del concepto de la “fibra neutra” como separadora entre las tracciones y las compresiones a que se encuentra sometida una sección recta de una pieza flectada.

Los algoritmos derivados de dichas teorías se cumplen, exclusivamente, en los denominados materiales elásticos. En ellos, dentro un determinado rango de tensiones, estas son proporcionales a las deformaciones. Superado un valor determinado (denominado *límite elástico*, próximo a tensión de rotura en el caso de los metales), el material deja de comportarse de forma lineal. Por tanto, el límite elástico se adoptó como un valor de caracterización de los metales. El gráfico inferior muestra el comportamiento elástico y plástico de un material. Las tensiones se representan en el eje de ordenadas y los alargamientos unitarios, en el de abscisas.



Las teorías de la elasticidad precisaron parámetros asociados, como el módulo elástico “E” o módulo de Young, valor característico de cada material que se expresa en unidades de presión, y el momento de inercia “I”; asociado a la geometría y a un eje de las secciones resistentes, cuyas unidades corresponden a una longitud elevada a la cuarta potencia. Por ello, el producto $E \cdot I$ aparece en la determinación de flechas, pandeos o rigideces relativas.

Posteriormente, el concepto del módulo de Young se ha aplicado a los materiales plásticos bajo el nombre de *módulo de deformación*. En sus formulaciones, se aprovecha el mismo principio de que, en los rangos reducidos, se produce proporcionalidad entre tensión y deformación.

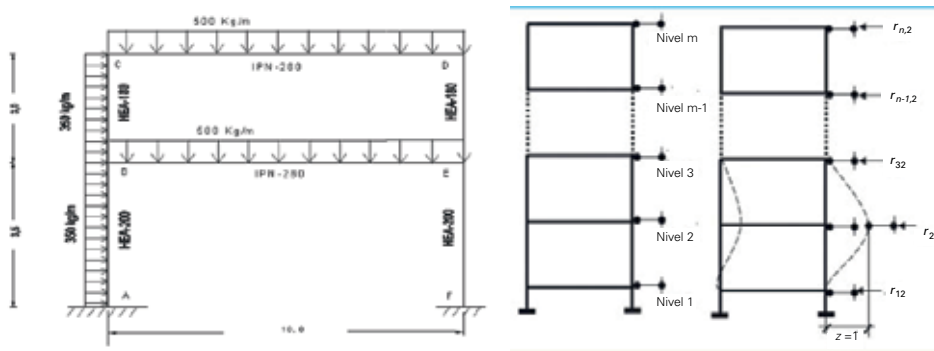
Si se tiene como valor de referencia del módulo elástico del acero $2.100.000 \text{ kg/cm}^2$, el módulo de deformación del hormigón se sitúa entre los 200.000 y los

300.000 kg/cm², es decir, es entre 7 y 10 veces inferior al del acero y, para una fábrica de ladrillo, entre los 20.000 y los 35.000 kg/cm², lo que supone entre 60 y 100 veces menos que el acero.

En mecánica de suelos, se utiliza también un parámetro de cálculo derivado del módulo elástico que se denomina *módulo edométrico*, cuyo rango de valores para suelos “normales” puede oscilar entre los 10 y los 300 kg/cm². Como puede apreciarse a partir de los datos anteriores, el suelo es extraordinariamente deformable, comparado incluso con los materiales de construcción menos resistentes.

Si bien, desde el punto de vista teórico, los algoritmos aplicables al cálculo matricial fueron desarrollados por matemáticos y científicos durante la época de la construcción científica, el cálculo manual de las estructuras requería, por su complejidad, efectuar simplificaciones, siempre apostando por la seguridad.

Estas simplificaciones consistían en reducir las estructuras espaciales a pórticos planos, habitualmente de barras ortogonales reducidas a sus ejes, y en emplear, en la medida de lo posible, pórticos simétricos. Ello dio lugar a la especialidad técnico-matemática denominada *cálculo de estructuras*. Asignaturas bajo la denominación genérica de “cálculo de estructuras” se siguen impartiendo, con las debidas adaptaciones a los tiempos, en los programas de formación de los profesionales de la construcción. Las figuras inferiores corresponden a discretizaciones típicas de estructuras porticadas, con las acciones correspondientes.



La incorporación de nuevos materiales. La construcción científica se caracteriza, entre otros aspectos, por los cambios radicales y profundos motivados no solo por la aparición de nuevos materiales, como el hierro, el acero o el hormigón armado, sino también por el uso de nuevas formas en que, gracias al diseño y al cálculo, estos pueden ser empleados.

Ello permitió crear nuevas tipologías de edificios para satisfacer necesidades a una escala jamás vista, como los grandes mercados de abastos, las estaciones



de ferrocarril, los palacios de exposiciones o los edificios en altura, por citar las más significativas.

No es exagerado afirmar que, en doscientos años, la construcción ha evolucionado, como industria y como ciencia, más que en los cinco mil años de su historia anterior.

Los aspectos tecnológicos relativos al desarrollo de la construcción metálica y en hormigón armado son tratados en el capítulo dedicado a las grandes luces.

La fotografía inferior izquierda corresponde a Les Halles de París, ejemplo de arquitectura en hierro. La fotografía de la derecha muestra la Ville Savoye de Le Corbusier. La capacidad de trabajo a flexión del hormigón armado permite liberar la planta baja y obtener grandes aberturas horizontales.



La aplicación de los principios derivados de la mecánica de suelos. Curiosamente, el comportamiento mecánico del primer material de construcción, el suelo, fue perfectamente desconocido por los profesionales de la construcción empírica. Estos controlaban, merced a su experiencia, los espesores de muros, las alturas que se podían alcanzar o las proporciones de una construcción determinada para garantizar su estabilidad.

Desgraciadamente, desconocían cuál iba a ser el comportamiento esperado del suelo, o si el diseño de la cimentación y su profundidad eran los adecuados. En consecuencia, se producían, con mayor frecuencia que la deseada, lesiones estructurales en los edificios, cuyo origen se encontraba en el binomio suelo-cimientos.

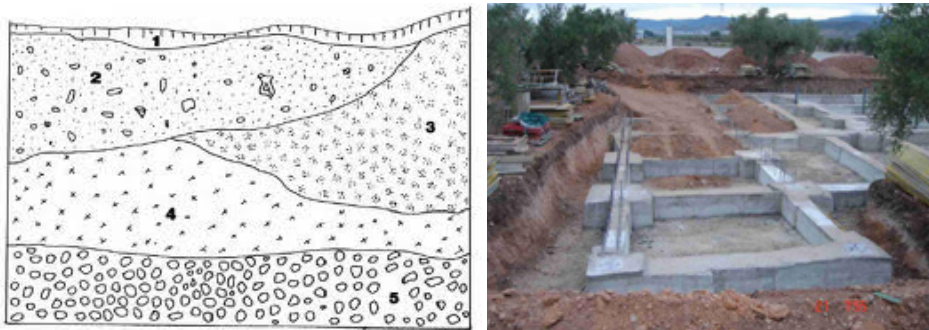
No fue hasta una fecha tan reciente como 1925 que Karl von Terzaghi sentaría las bases de la "mecánica de suelos". Gracias a la misma, las características mecánicas de los suelos se transforman en parámetros numéricos, como la cohesión, la densidad, el ángulo de rozamiento interno, la permeabilidad o la tensión admisible, por citar algunos de los más significativos.

El salto cualitativo que la mecánica de suelos ha aportado a la construcción ha sido inmenso. Ha permitido construir, de forma segura y en cualquier condición



de suelo, a partir del conocimiento del suelo y mediante el desarrollo de sistemas de cimentación apropiados, los edificios más altos jamás construidos hasta la fecha, y con las mayores luces.

No menos destacadas son sus aplicaciones en ingeniería civil, por lo que la mecánica de suelos es una de las grandes aportaciones científicas del siglo xx. La fotografía inferior izquierda muestra la sección estratigráfica de un suelo, cuyo conocimiento y características han de estar indisolublemente asociados a las decisiones relativas a la elección de la tipología y el dimensionado de las cimentaciones. La fotografía de la derecha muestra una cimentación superficial de zapatas arriostradas.



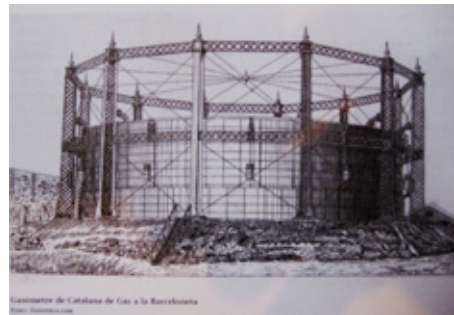
La disponibilidad de energía mecánica y/o eléctrica. Primero, la máquina de vapor y, posteriormente, el motor de explosión fueron los encargados de suministrar energía a las obras, de modo más eficiente, potente y seguro. En primer lugar, la energía se utilizaba de modo primario para la elevación o el acarreo de los materiales. Posteriormente, las máquinas herramienta especializadas para satisfacer las necesidades más diversas, alimentadas preferentemente mediante energía eléctrica, contribuyeron a realizar los trabajos en las obras de forma más eficiente, rápida y precisa. Como ejemplos, en las fotos inferiores se reproducen una hormigonera, una pulidora de terrazo, ambas alimentadas eléctricamente, y una fratasadora mecánica con motor de gasolina.





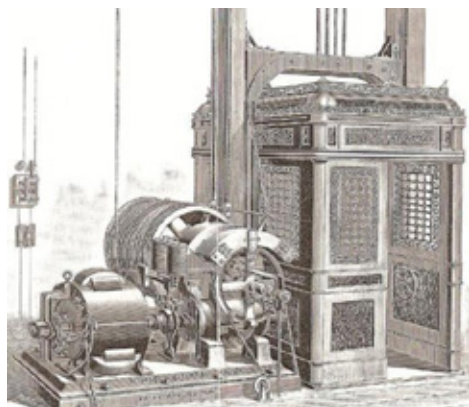
La sofisticación progresiva de las instalaciones. Disponer de luz artificial fue uno de los problemas no resueltos de la construcción empírica. La dependencia de combustiones directas fue la causa de muchos incendios. Una solución intermedia de corta vida, a finales del siglo XIX y principios del XX, fue la combustión del gas de hulla en manguitos.

La fotografía inferior izquierda muestra un farol de gas de alumbrado público en el momento de ser encendido, la fotografía central corresponde a una lámpara doméstica y la de la derecha, a un gasómetro o depósito de gas compuesto por dos cuerpos, un fijo y el otro deslizante, cuyo peso contribuía a mantener la presión de suministro.



La introducción de la electricidad en los edificios permitió a la construcción científica, a partir de 1887, instalar sistemas de alumbrado eficientes y seguros, mediante lámparas de incandescencia. No menos destacable fue la invención de los ascensores eléctricos y, en consecuencia, la posibilidad de construir edificios en altura.

La fotografía de la izquierda muestra el haz luminoso proyectado por un báculo de alumbrado de una calle, la de la derecha corresponde a un ascensor equipado con motor eléctrico.



Si bien el invento del ascensor moderno se debe a Elisha Graves Otis (1811-1861), cuyas primeras propuestas datan de 1853, fue Ernst Werner M. von Siemens (1816-1892) quien en 1887 aplicó un motor eléctrico a los ascensores. Si a ello se suma que, a partir de 1900, se dispuso de cables de acero, a partir de los años veinte del siglo xx hubo ascensores capaces de alcanzar alturas superiores a los 200 m.

Otra aportación significativa de base científica a la construcción, derivada de los principios de la termodinámica, fue el acondicionador de aire. Los primeros experimentos fueron desarrollados en 1902 por Willis H. Carrier (1876-1950), si bien las aplicaciones en edificios y locales a gran escala no se realizaron hasta finales de los años veinte.

La fotografía inferior izquierda muestra un acondicionador de ventana. Es el sistema más sencillo de climatización de una estancia. Puede actuar en sistema solo frío y como bomba de calor, invirtiendo el ciclo. Su potencia máxima se sitúa alrededor de las 5.000 Kcal/h. Su principal inconveniente es el ruido, al estar la unidad de condensación pegada al aparato. La foto inferior derecha muestra una unidad enfriadora de agua de una gran instalación de aire acondicionado. Se suelen instalar en las cubiertas de los edificios.



El desarrollo de la lucha activa y pasiva contra el fuego. El fuego, gran enemigo de la construcción empírica, fue objeto de análisis por parte de la construcción de base científica. La lucha contra el fuego ha dado lugar, con el paso del tiempo, a normativas cada vez más exigentes y precisas, orientadas a minimizar los riesgos derivados del mismo.

A lo largo de la historia, con independencia de los hechos de guerra, diversas ciudades han sufrido incendios devastadores, entre ellas Roma (64 dC), Londres (1666), Chicago (1871) y Santander (1941). La fotografía siguiente izquierda muestra una pintura de autor desconocido del incendio de Londres de 1666. La de la derecha corresponde a una panorámica del incendio de Chicago de 1871.

No cabe la menor duda de que el incendio de Chicago tuvo una enorme repercusión en la lucha de la construcción científica contra el fuego. Se pasó de la



construcción de edificios de madera, mediante la técnica “*balloon frame*”, a la construcción de edificios en altura de estructura metálica protegida contra el fuego, por dos motivos: dar respuesta a las necesidades de crecimiento de la ciudad y, al propio tiempo, reducir la superficie ocupada.

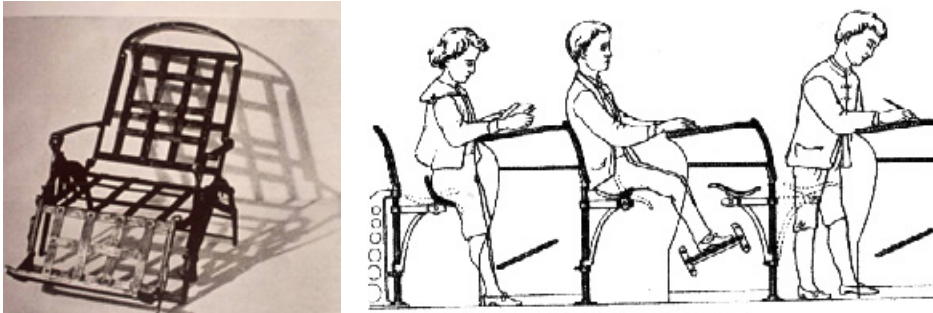
La fotografía inferior izquierda muestra un edificio tipo de Chicago anterior al incendio de 1871. La fotografía central corresponde al Home Insurance Building (1883-1886), de William Le Baron Jenney (1832-1907). Con sus once plantas, fue uno de los edificios más destacados de la nueva estructura urbana y del método constructivo desarrollado por la denominada Escuela de Chicago. La fotografía de la derecha muestra la superposición de una escalera de incendios a la fachada de un edificio. En los primeros tiempos, la seguridad prevalecía sobre la estética. En la actualidad, las escaleras de incendios quedan integradas en el edificio.

No solo se planteó la construcción de edificios ignífugos, sino que también se procuró que lo fuera el mobiliario. Para ello, se emplearon los perfiles disponibles en la época, pletinas y barras de acero, cincuenta años antes de que los diseños de mobiliario de la Bauhaus de los años veinte utilizaran, fundamentalmente, el tubo de acero. La foto inferior derecha muestra la estructura de una butaca plegable de 1871.





Para establecer la funcionalidad del mobiliario, se realizaron los primeros estudios ergonómicos, con objeto de determinar las posiciones y las dimensiones necesarias para desarrollar distintos trabajos o funciones de descanso de forma óptima (v. foto inferior derecha).



La escasa atención prestada al aislamiento térmico. Desde una perspectiva histórica, el gran déficit de la construcción científica es la poca consideración de la incidencia de la transmitancia térmica, en climas extremos, tanto en invierno como en verano.

El control térmico durante el verano se ejercía con cierta eficiencia, gracias a las experiencias de la construcción empírica, mediante muros con gran inercia térmica, el empleo de ventilaciones cruzadas y la protección de las aberturas frente al asoleo directo mediante persianas venecianas o de librillo.

La necesidad de atender cuestiones de carácter preferente se añadió a la ya tradicional falta de conocimientos de los profesionales de la construcción sobre temas relativos al control ambiental en el interior de los edificios.

La utilización de los aislamientos térmicos naturales, como el corcho, la lana o el amianto, presentaba no pocas dificultades. El corcho se produce, en Europa, fundamentalmente en la Península Ibérica. Su aplicación más difundida, desde que Dom Pierre Pérignon (1638-1715) lo asoció al vino, ha sido la fabricación de tapones.

La utilización del corcho para otros muchos menesteres, entre ellos la construcción, se debe a John T. Smith. Con una visión muy avanzada del reciclaje, en 1891 consiguió que las clases inferiores de corcho no aptas para la obtención de tapones de corcho natural, así como los desperdicios resultantes de tales manufacturas, se destinaran a la obtención de granulados.

En 1892, el propio Smith patentó un proceso consistente en aglutinar granulados de corcho con distintas resinas naturales a través de un proceso calorífico, con lo cual se logró no solo el aprovechamiento integral del corcho, sino también la creación de nuevos productos, como placas, revestimientos y losetas y, en consecuencia, la apertura de nuevos mercados.



La relativa escasez y, en consecuencia, la carestía de los productos derivados del corcho lo mantuvieron apartado de la edificación. Su uso se centró en la consecución de aislamientos para frigoríficos y equipos de aire acondicionado.

Posteriormente, con la aparición de aislantes de tipo industrial más eficientes, como la fibra de vidrio, la lana mineral y el poliestireno expandido, el corcho como aislante térmico en edificación ha quedado relegado a un papel meramente testimonial.



Algo similar puede decirse de la lana (v. fotografía superior central). Su baja combustibilidad y su capacidad aislante fueron tan solicitadas en la producción de tejidos que impidieron su uso como aislamiento térmico en las construcciones. Solo en la actualidad, cuando la dependencia del producto ha decrecido, se emplea como aislante en pequeños edificios erigidos bajo los principios de la denominada *bioconstrucción*.

Por el contrario, el amianto, o asbesto, debido a su abundancia, fue ampliamente utilizado en multitud de usos industriales y en construcción, por su capacidad de aislamiento térmico y resistencia al fuego. Todo ello antes de que los organismos médicos internacionales determinaran que los productos relacionados con el amianto provocan cáncer con un índice de mortalidad bastante elevado, tras lo cual, desde hace décadas, se ha prohibido su uso en todos los países desarrollados.

En la actualidad, empresas especializadas se dedican a extraer la ingente cantidad de amianto que aún se encuentra en numerosos edificios en servicio. La fotografía superior derecha muestra el aspecto fibroso del amianto en estado natural.

El hecho de no disponer, durante el período de vigencia de la construcción científica, de aislamientos térmicos eficientes, así como la carencia de acristalamientos aislantes, hacía muy incómoda la vida en el interior de las viviendas durante los meses invernales. En estas circunstancias, las necesidades térmicas de los edificios se compensaban, en el interior de las viviendas, consumiendo gas, carbón o electricidad. Además, el consumo de tales combustibles resultaba excesivo, debido a la carencia de aislamientos térmicos. Ello dio lugar a ciudades insalubres y contaminadas por los desechos de las combustiones incontroladas.

1.2.3. Construcción tecnológica

La construcción tecnológica es heredera de la construcción científica e incorpora muchos de sus principios y criterios de desarrollo. Tampoco renuncia al conocimiento de la construcción empírica, sino todo lo contrario: es, sin duda, durante la vigencia de la construcción tecnológica cuando más se ha profundizado en el conocimiento de la construcción del pasado, desde vertientes no solo históricas, sino también científicas y tecnológicas. En opinión de quien suscribe, tal forma de proceder no ha hecho sino empezar.

Cabe concluir que, en el desarrollo de la construcción tecnológica, uno de los caminos consiste en aplicar el empirismo a la tecnología y los métodos tecnológicos al análisis de la construcción empírica

Conceptos y principios de la construcción tecnológica

Con la escasa perspectiva histórica que supone la contemporaneidad, se señalan, a continuación, algunas de las características fundamentales y los principios sobre los cuales se asienta la construcción tecnológica, a la cual cabe desear una larga y fructífera vida hasta que otros conceptos y otras ideas, más acordes con las legítimas necesidades sociales de su momento, la vengán a sustituir. Al igual que se ha hecho al analizar la construcción científica, a continuación se introducen sus aspectos más relevantes y posteriormente se exponen de forma más amplia.

- **Globalización.** La globalización es un concepto muy amplio, con aspectos positivos, como la inmediatez de comunicarse y transmitir conocimientos entre los puntos más distantes del planeta, y negativos, como la facilidad que ofrece para que unos pocos puedan controlar cultural, económica y políticamente a muchos. Su carácter universal hace que sea preciso analizar su incidencia en la construcción de base tecnológica.
- **El empleo de ordenadores.** El uso generalizado de ordenadores, tanto de gran formato como personales, en todos los ámbitos de la vida ha supuesto un salto cualitativo extraordinario, como lo fue, en su momento, la aparición del automóvil o la aviación, con la diferencia de que el ordenador es un instrumento mucho más versátil.

En el mundo de la construcción tecnológica, se utiliza tanto como herramienta de diseño como de control. Con todo, sus mayores potencialidades se obtienen mediante el empleo de programas específicos, como herramienta de ensayo y error de carácter virtual. Curiosamente, el empirismo regresa bajo un nuevo envoltorio. En la mayoría de las ocasiones, para tales ensayos se siguen empleando los mismos algoritmos que sirvieron, en su momento, de base teórica para el desarrollo de la construcción científica.



- **La rápida transmisión de conocimientos.** Vivimos en un mundo interactivo. Ello se traduce en la reducción sustantiva, con respecto a las épocas precedentes, del tiempo medio transcurrido entre el desarrollo teórico de la solución a un determinado problema y la aplicación práctica de la misma. Además, se producen sinergias entre distintos ramos productivos. Es paradigmática la aproximación de los métodos y los aspectos tecnológicos de la construcción a los utilizados por la industria.
- **La tecnología supera las necesidades.** Por primera vez en la historia, gracias a los logros de la construcción tecnológica, es posible salvar luces, edificar en altura o construir bajo rasante, por citar tres ejemplos significativos, más allá de las necesidades “razonables,” derivadas de las capacidades físicas y sensitivas del ser humano.
- **La generación de nuevos modelos edificatorios.** El círculo vicioso que se establece entre el desarrollo social y la necesidad de satisfacer nuevas necesidades edificatorias, en el agitado período comprendido entre el final de la Segunda Guerra Mundial y nuestros días, en el ámbito de la construcción tecnológica, propicia la aparición de nuevos modelos edificatorios y la recreación de los existentes hasta la fecha. Aeropuertos, intercambiadores modales, complejos fabriles, grandes hospitales, centros logísticos y comerciales, edificios de servicios o complejos de arquitectura deportiva son algunos de los ámbitos de la edificación en que la innovación se manifiesta generando nuevos modelos edificatorios.
- **La capacidad integradora del diseño. La accesibilidad.** La construcción tecnológica se apoya en el bagaje de la construcción científica, lo cual supone que pueden darse por hechos o por conocidos una serie de requerimientos y prestaciones que ha de cumplir un diseño constructivo determinado. Ello tiene incidencia sobre aspectos tanto meramente dimensionales como sensitivos. Uno de los logros más significativos de la construcción tecnológica ha sido facilitar la accesibilidad a los edificios y a los servicios que estos proporcionan, a los usuarios con independencia de la disminución de sus capacidades físicas.
- **El desarrollo de nuevos materiales, con más prestaciones y más fiables, propiciado tanto por la industria química como por la metalúrgica.** El desarrollo de aceros estructuralmente más resistentes, menos atacables por la corrosión o con mayor capacidad de resistencia ante la abrasión convive, en la construcción tecnológica, con la creación de nuevos adhesivos y *composites*, que pueden alcanzar cotas de creatividad y de eficiencia cada vez más altas.
- **El trabajo en equipo.** La complejidad de los proyectos edificatorios impone que estos sean resueltos por un conjunto de especialistas, de forma coral, bajo una sola dirección. La figura del “arquitecto estrella” no es más

que el reflejo visible del respaldo de un estudio estructurado y técnicamente muy preparado.

- **El desarrollo de aspectos normativos.** La construcción tecnológica se caracteriza por la difusión, la aceptación y la aplicación, entre sus practicantes, de normas entendidas como parte sustantiva e inseparable de los procesos de diseño, ejecución y mantenimiento. A diferencia de la autoría personal de muchos de los logros de la construcción científica, las normas aplicables a la construcción tecnológica son fruto de un trabajo colectivo y, en muchas ocasiones, anónimo. Entre los aspectos normativos de mayor significación social, se encuentran los desarrollados para garantizar la seguridad y la salud laboral de los trabajadores.
- **El control de calidad.** El control de calidad es un concepto amplio, que engloba los procedimientos, las estrategias y los métodos orientados a detectar y a reducir la presencia de errores en un proceso industrial o constructivo determinado. Si bien a partir de los años treinta se inició el estudio de la asociación entre procesos y métodos estadísticos de control, la introducción sistemática de los controles de calidad se empezó a aplicar a la industria vinculada al conflicto durante la Segunda Guerra Mundial y, a partir de entonces, se ha convertido en un componente indisoluble de los procesos productivos.
- **La celeridad en los cambios.** Si algo caracteriza la actividad humana de los últimos decenios es la celeridad con que se han producido cambios en los órdenes económico, social y productivo. Lo que antaño se producía en siglos, en la actualidad se cuenta por décadas o por lustros. La arquitectura y la construcción constituyen un reflejo más de la sociedad y de los sucesos que se producen en ella. Esto se ha traducido en que los técnicos vinculados a dichas actividades han sido capaces de renunciar a modelos, formas criterios y estilos y, al propio tiempo, de recrearlos y reinterpretarlos.
- **Sostenibilidad.** El período de vigencia de la construcción tecnológica coincide con el conocimiento de la fragilidad del planeta. Cabe señalar que este conocimiento no siempre supone actuar en consecuencia por parte de los gobiernos y los poderes fácticos. Los criterios, las actitudes y las actuaciones relacionadas con la sostenibilidad se orientan a satisfacer las necesidades de la generación actual, sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (Informe Brundtland 1987). El compromiso decidido por la sostenibilidad constituye una de las premisas irrenunciables de la construcción tecnológica.

Incidir en profundidad sobre cada uno de los aspectos citados excede las posibilidades de este trabajo. Los apartados siguientes contienen simples reflexiones a los puntos enumerados, algunos de los cuales contienen enunciados sin desarrollar. Su propósito es crear un marco de referencia sobre el cual fundamentar



el análisis constructivo de los distintos modelos edificatorios, en los cuales el lector podrá profundizar, si así lo desea.

Globalización. En la introducción, se ha hecho referencia a las múltiples acepciones del concepto *globalización*. En relación al mismo, centrando el análisis en el ámbito de la construcción tecnológica, merecen especial atención tres aspectos igualmente amplios:

- Comunicación
- Interdependencia
- Conciencia

La **comunicación** supone la posibilidad de interaccionar, en tiempo real, entre personas o entidades muy distantes, que pretendan alcanzar unos objetivos comunes. Las barreras impuestas hasta el advenimiento de la era tecnológica por el binomio espacio-tiempo desaparecen con la globalización. Es perfectamente posible y, de hecho, sucede con frecuencia, que el detalle constructivo concebido en un punto del planeta pueda ser ejecutado, sin dilación de tiempo y sin errores, con la misma facilidad en otro punto, distante miles de kilómetros, todo ello al tiempo que es posible ejercer el control de la ejecución desde un tercer punto, igualmente distante de ambos.

Lo expuesto es tan evidente y, al propio tiempo, tan familiar y cotidiano para los profesionales y para los profanos que resulta innecesario resaltar las potencialidades de la comunicación de la era tecnológica en relación con el ejercicio de la construcción. Volviendo la vista atrás, este hecho contrasta con el advenimiento y el desarrollo secular, por ejemplo, de la arquitectura románica en nuestro país.

Al contrario que la comunicación, que precisa un emisor y un receptor con voluntad de interaccionar, la **interdependencia** se produce, en el ámbito de la globalización, de forma espontánea. Los consumos energéticos, la generación de materias primas o alimentos, o la producción tecnológica de determinadas zonas del planeta inciden generando desequilibrios económicos y sociales en otras. Ello se traduce, simplificando los factores, en la libre circulación de capitales, en la creación y la presencia de empresas multinacionales y en la implantación de sociedades de consumo, más que de bienestar.

Hasta el presente de la construcción tecnológica, la actividad se ha orientado preferentemente a la obtención de beneficios, para lo cual se han edificado los modelos que han generado mayor producción desde el punto de vista económico, fueren estos sostenibles o no. Cuando la cordura no se impone, los mecanismos reguladores del mercado se encargan, en forma de dolorosas crisis, de poner fin a los excesos y de plantear nuevas formas de construir, más racionales y eficientes.

La **concienciación**, planteada como asunción de responsabilidades con respecto a la conservación del planeta a través del conocimiento científico. Actúa como

elemento equilibrador y racionalizador de los potenciales extraordinarios que la tecnología pone a disposición del proceso constructivo.

La concienciación, a escala individual y colectiva, es el mecanismo vinculado al pensamiento que ha de orientar las actuaciones que el conjunto de la sociedad ejerce sobre el planeta para que estas resulten sostenibles. Para ello, es preciso analizarlas continuamente, para consolidar las rutinas positivas y corregir, de forma sistemática, déficits y fracasos.

El ejercicio de la conciencia ha de basarse en el manejo de datos racionales y estructurados, por encima de los sentimientos, por bien intencionados que estos sean, para tomar las decisiones correctas. En la actualidad, no se discute la conveniencia de actuar sobre aspectos vitales para el planeta, como la intervención en el ciclo del agua para evitar vertidos nocivos al mar, la necesidad de reciclar o de reducir las emisiones de CO₂, por citar algunos de los aspectos más significativos.

La reticencia de los gobiernos es debida al coste de tales actuaciones, de modo que en muchos casos no se adoptan medidas más drásticas porque se desconoce cómo alcanzar de forma rentable los objetivos propuestos.

La presión social sobre los gobiernos, que podría denominarse “conciencia ciudadana”, se traduce o se debería traducir en el apoyo a programas de investigación cuyo objetivo fuera la mejora constante de los procesos industriales y constructivos, con el fin de que estos sean más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

El empleo de ordenadores en la construcción tecnológica ha ido asociado al desarrollo de instrumentos de replanteo y de medida, basados en aplicaciones láser. Ello permite, entre otros aspectos:

- Aumentar la precisión y la definición de los planos, así como de los replanteos en obra. La construcción ha pasado del ámbito dimensional de los centímetros a los milímetros o a las décimas de milímetro en puntos concretos.
- Ampliar la calidad formal y de contenidos de la documentación escrita de los proyectos mediante bases de datos, con especial referencia a los estados de mediciones y a los presupuestos.
- Facilitar el cálculo de estructuras, con independencia de su forma o de los materiales constitutivos.
- Programar tiempos de ejecución, recursos, equipos y costes.
- Controlar la calidad particular y global del proceso constructivo, minimizando errores.



- Establecer estudios comparativos con respecto a la idoneidad de diversas tipologías constructivas aplicables a un mismo fin.
- Determinar los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ que se derivan de una determinada actividad edificatoria.
- Gestionar los residuos derivados de la construcción y facilitar su reciclaje.
- Construir formas complejas sin errores dimensionales, garantizando el encaje perfecto de sus elementos.

Cada uno de los aspectos detallados ofrece campos de análisis que superan las posibilidades del presente escrito, por lo que el apartado debe reducirse a su simple enunciación.

La rápida transmisión de conocimientos. La rapidez en la transmisión es, simplemente, el medio; no el fin. La finalidad es el conocimiento y el conocimiento lo tienen las personas. Los ordenadores se limitan, simplemente, a acumular datos y a procesarlos de acuerdo con unas instrucciones determinadas, emanadas de su operador.

En las condiciones descritas, la cantidad de información disponible para ser consultada, estudiada, asimilada y desarrollada por una persona interesada en la construcción es inmensa. Lamentablemente, no es posible aprender por ósmosis. La adquisición y la posterior explotación de los conocimientos orientados a plantear y resolver determinados problemas requieren la conjunción de múltiples parámetros, entre ellos el esfuerzo personal, la constancia y una pizca de genio.

La universalidad propia del artista del Renacimiento, que podía ser a la vez pintor, escultor y arquitecto, tiende a desaparecer en la construcción tecnológica, en aras de la especialización y de la subespecialización en ámbitos como la gestión, las estructuras, los cerramientos o las instalaciones, por citar los más comunes.

La especialización y la subespecialización tratan de dar una respuesta adecuada a problemas constructivos muy específicos, que quedan fuera del alcance de los conocimientos de un técnico generalista.

En la construcción tecnológica, los técnicos generalistas siguen siendo necesarios. Tienen, entre otros, el importante papel de aglutinar y dirigir equipos pluridisciplinarios, estableciendo objetivos y marcando el camino a seguir para alcanzarlos. De ahí la importancia de la preparación y de los perfiles de conocimientos de unos y otros, generalistas y especialistas. La realidad de la construcción tecnológica obliga a hilar muy delgado a los profesionales para elegir el camino adecuado en función de sus aspiraciones, situaciones circunstanciales y capacidades.



La tecnología supera las necesidades. La construcción, a lo largo de la historia, incluso en el caso de construcciones colosales como las de las pirámides o de los grandes edificios públicos como estadios, teatros, termas, templos o catedrales, tomó como base de referencia la escala humana, basada en las capacidades de sus sentidos, en especial de la vista y del oído. El concepto de ciudad, en la mayoría de los casos amurallada por cuestiones de defensa, representaba la construcción de mayores dimensiones hasta la aparición de los medios de transporte más eficientes: en orden cronológico, el ferrocarril, el automóvil y el avión.

La ciudad amurallada medieval da lugar, a mediados del siglo XIX, a los “ensanches”. A mediados del siglo XX, se extienden y desarrollan los conceptos de área metropolitana, basados en el planteamiento de coronas de influencia, situadas concéntricamente con respecto a la ciudad base. Paralelamente, aparecen propuestas de planeamiento urbanístico más complejas, como las conurbaciones, que suponen la relación entre dos o más ciudades próximas, y la llamada “gran escala”, en que los proyectos abarcan regiones e incluso países enteros, en busca de una mejor conectividad, de la racionalización de las inversiones y del aprovechamiento óptimo de los recursos.

En el ámbito de la construcción tecnológica, la capacidad para salvar grandes luces o construir en altura supera fácilmente la escala humana. La amplificación del sonido o de los circuitos cerrados de televisión, con grandes pantallas, son algunos de los mecanismos que permiten salvar dicha escala en espacios cerrados, aunque sea a costa de ver lo que realmente sucede en directo, en un escenario situado a cien o más metros de distancia, a través de una pantalla.

La construcción tecnológica, dadas sus enormes potencialidades, obliga a plantear los proyectos de edificación de forma juiciosa y ordenada, mediante estudios de viabilidad, funcionalidad e impacto ambiental, y la redacción posterior de los correspondientes planes maestros. Su propósito es determinar, entre todas las opciones posibles, cuál es la mejor para dar la respuesta óptima a una situación determinada. La aplicación correcta de los planes maestros ha de ser objeto de seguimiento a través de las revisiones de proyecto. Ambos aspectos – planes maestros y revisiones de proyecto– son tratados en detalle en un capítulo específico más adelante.

No proceder de este modo puede suponer malversar fondos públicos y privados y castigar innecesariamente los recursos del planeta, que acabará pasando factura. Es preciso controlar la generación de edificios desproporcionados con respecto a los fines para los cuales han sido creados, puesto que se acaban convirtiendo en costosos y poco eficientes. Este tipo de construcciones presentan una escasa valoración en cuanto a las características propias de un gran edificio: funcionalidad, eficiencia, durabilidad, facilidad de mantenimiento, armonía y belleza de sus interiores, de su imagen exterior y su integración con el entorno, entre otras.



Los planes maestros y las revisiones de proyecto son los mecanismos propios de la construcción tecnológica para controlar y dirigir el potencial tecnológico de forma eficiente y segura. No utilizarlos supone construir con mentalidad desfasada para la época.

La generación de nuevos modelos edificatorios. La capacidad tecnológica genera nuevas necesidades de orden económico y social que, a su vez, han de encontrar el cobijo y el marco adecuados para que su realización sea posible. Al propio tiempo, las actividades descritas crean y multiplican nuevas interacciones entre tecnología y necesidades.

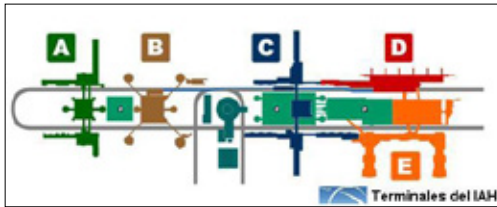
La construcción tecnológica se caracteriza porque produce una significativa generación de nuevos modelos y la reinterpretación de otros para adaptarlos a los nuevos tiempos.

En el apartado anterior, se ha hecho referencia a la gran escala, como la creación de sistemas de organización de conectividad de un territorio en relación tanto con el funcionamiento interno del mismo como con sus interacciones con otros del propio país o de otros lugares del mundo.

El concepto de aeropuerto internacional con conexiones intercontinentales se sitúa, por su complejidad y por las exigentes características que debe cumplir su entorno, en la cima de los modelos edificatorios de la construcción tecnológica. Conceptualmente, los aeropuertos intercontinentales son puertas de entrada y salida de carga y pasajeros de índole nacional, internacional e intercontinental. Son además, centros de servicios de toda índole e intercomunicadores modales que permiten salir del avión y coger un transporte colectivo, sea este otro avión, un tren, un autobús o el metro, o un transporte privado. Ello conduce a la modulación y a la especialización en distintas terminales, y al acondicionamiento, en distintos niveles, de los diferentes medios de transporte, con objeto de evitar interferencias. También supone superar retos tecnológicos relativos a la organización y a la sectorización de espacios y al confort ambiental de los mismos dentro de grandes luces. Por ello, los grandes aeropuertos son modelos en constante evolución.

Como ejemplo de estructura de un gran aeropuerto, el gráfico de la izquierda corresponde al Aeropuerto Internacional de Dallas/Fort Worth, novena puerta de enlace internacional de los Estados Unidos. Ocupa una superficie de 7.315 ha (el tercero más grande del mundo) y circulan por él del orden de 60 millones de pasajeros al año mediante unas 700.000 operaciones aéreas.

La fotografía de la derecha muestra el esquema modular del Aeropuerto de París-Charles de Gaulle, inaugurado en 1974, después de diez años de trabajos. Su tránsito anual es de 63 millones de pasajeros, está conectado a la red de trenes de cercanías suburbanos de la región parisina (RER), y dispone de estación del TGV y enlace con la estación sur de Bruselas, igualmente de alta velocidad. Actualmente, es el segundo de Europa, después del de Heathrow en Londres.



Además de los aeropuertos, han aparecido otros muchos modelos de edificios para satisfacer las crecientes necesidades sociales de la era tecnológica: grandes hospitales, palacios de deportes, factorías, auditorios, teatros de ópera o centros comerciales, logísticos y de negocios, por citar los más significativos.

Al mismo tiempo, en estos modelos se ha avanzado, con respecto a los precedentes, en la mejora de los mecanismos de control del confort interior, incrementado los aislamientos, reduciendo los consumos energéticos y minimizando los impactos ambientales. Un caso paradigmático son las llamadas "salas blancas", libres de toda contaminación, necesarias para realizar procesos industriales muy delicados. En ellas, mediante filtros de aire, sobrepresión y esclusas de acceso, se consiguen ambientes estériles superiores a los exigidos para un quirófano.

La capacidad integradora del diseño. La accesibilidad. Una de las aportaciones más relevantes de los avances tecnológicos y científicos de las últimas décadas ha sido el alargamiento de la esperanza de vida de las personas.

A principios del siglo XIX, se situaba en los 40 años, mientras que en la actualidad (datos de 2005) se sitúa en los 78,4 años, en Europa. Se ha comprobado que el simple hecho de disponer de calefacción y no estar expuestos al frío intenso alarga la esperanza de vida unos diez años.

Es un hecho la presencia social de grupos cada vez más numerosos de personas de edad avanzada, que tienen reducidas, en mayor o menor grado, sus capacidades de movilidad, de visión o auditivas. Paralelamente, la medicina y la cirugía salvan vidas de enfermedades y de accidentes laborales y de circulación que en otras épocas habrían supuesto la muerte. En algunos casos, estas actuaciones médicas dejan secuelas, provisionales o irreversibles, de movilidad y/o pérdida o reducción de la agudeza visual o auditiva. Así pues, en cierto modo, todos acabaremos siendo discapacitados.

Es evidente que, como miembros de una sociedad avanzada, estas personas tienen derecho a llevar una vida digna, que no se vea mermada por la presencia de las llamadas "barreras arquitectónicas", en forma de escaleras o ascensores



de dimensiones reducidas, o por la inexistencia de aseos para personas con movilidad limitada, o la ausencia de guías sensoriales.

En consecuencia, el peso social de las personas discapacitadas incide en el diseño constructivo. Este debe dar una respuesta adecuada para lograr que tanto los ámbitos urbanos, los servicios públicos, como los edificios sean accesibles a todas las personas, discapacitadas o no. La significación de estas necesidades sociales está reconocida legalmente en Catalunya y regulada por el Decreto 135/1995, que despliega la Ley 20/1991, de promoción de la accesibilidad y de supresión de barreras arquitectónicas.

Ello supone que el diseño de los elementos constructivos y de los espacios que estos conforman han de cumplir una función socialmente integradora. Mención especial merece la necesidad de adaptar el diseño a los niños, para garantizar la funcionalidad y la seguridad de uso. Un ejemplo de ello son las barandillas con pasamanos de doble altura y barrotes verticales para evitar que puedan ser fácilmente escalables, y con separaciones entre barrotes que les impidan pasar la cabeza entre ellos.

El desarrollo de nuevos materiales, con más prestaciones y más fiables, propiciado tanto por la industria química como por la metalúrgica. Por razones de contenido, se hace solo una somera referencia a los materiales más significativos, desarrollados o empleados por y para la construcción tecnológica para dar respuesta a sus necesidades:

- Hormigón
- Acero
- Acero inoxidable
- Acero corten
- Aluminio
- Vidrio
- Titanio
- Silicona estructural

Sin ánimo de ser exhaustivos, se citan, a lo largo del párrafo, otros materiales incorporados a la construcción tecnológica, cuya función y utilidad, aunque relevante, se reduce a unos ámbitos muy específicos:

- Resinas epoxídicas
- Materiales plásticos
- Fibra de carbono
- Kevlar
- Vidia

La construcción científica se caracterizó por la incorporación de nuevos materiales, en primer lugar, a mediados del siglo XIX, el vidrio y el hierro, el cual pronto sería sustituido por el acero. En las primeras décadas del siglo XX, el desarrollo

del hormigón armado propició avances extraordinarios en la edificación y la obra pública.

Hormigón. En la actualidad, el hormigón armado, junto con el acero, siguen siendo los primeros materiales estructurales de la construcción tecnológica, y son objeto de investigación y mejora constantes.

Las aportaciones de la investigación han convertido los hormigones, debido a las necesidades de una edificación cada vez más exigente, en más resistentes a los esfuerzos de compresión y flexocompresión, en autocompactables, con capacidad para resistir ataques de sulfatos y de cloruros, capaces de incrementar su resistencia frente al fuego, pero manteniendo sus constantes estructurales, por citar algunas de las líneas de investigación más relevantes.

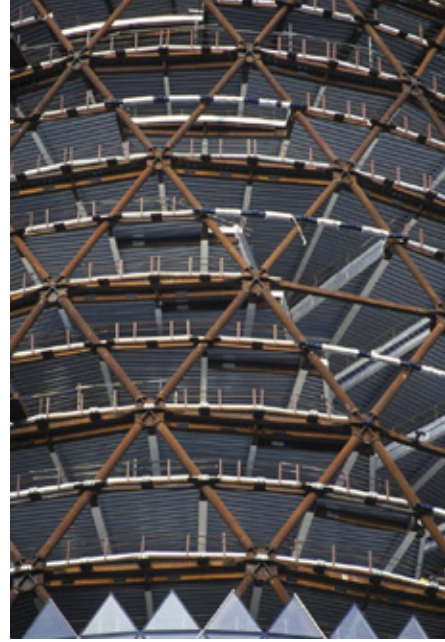
En otro orden de intereses y objetivos, las investigaciones sobre hormigones buscan también incorporar áridos reciclados de muy diversa procedencia, con el propósito de economizar y reducir su impacto ambiental. En definitiva, la investigación para mejorar determinadas propiedades de los hormigones y los morteros es una constante en nuestros días.

Acero. Por lo que respecta al acero, durante la vigencia de la construcción tecnológica ha mejorado su resistencia y sus prestaciones se han adaptado a usos concretos mediante aleaciones. Paralelamente, la mejora y el incremento de la potencia de los trenes de laminación han facilitado el acceso al mercado de una amplia gama de perfiles, tanto abiertos como cerrados.

La disposición, a partir de los años cincuenta del siglo pasado, de un amplio catálogo de perfiles estructurales cerrados, tanto circulares como cuadrados y rectangulares, ha permitido a la construcción tecnológica dar un salto cualitativo significativo en la construcción de edificios en altura, introduciendo avances en su concepción estructural.

En la actualidad, son usuales las estructuras de grandes edificios realizadas con tubos concéntricos, con haces de tubos y con exoesqueletos, que se adaptan a las necesidades derivadas de conjuntar esbeltez y seguridad. Con objeto de satisfacer las exigencias estéticas y resistentes generadas por estas tipologías estructurales, los perfiles pueden mantener constante su sección exterior a lo largo de toda la altura del edificio, gracias a que estos se laminan con distintos gruesos de pared, en función de la altura en que se hallan colocados.

La fotografía inferior izquierda muestra la estructura, con perfiles de sección constante en toda su altura, de las desaparecidas Torre Gemelas de Nueva York; la de la derecha muestra el exoesqueleto triangulado del Gherkin de Londres, en fase de construcción.



Acero inoxidable. El acero inoxidable, por su resistencia mecánica, durabilidad, bajo mantenimiento y agradable aspecto estético, es un nuevo material que ocupa un lugar preferente en la construcción científica. Los orígenes de las aleaciones de cromo y níquel con el acero, que dan lugar al acero inoxidable, se producen de forma independiente y casi simultánea en Inglaterra y en Alemania, por parte del metalúrgico inglés Harry Brearley (1871-1948) y de los doctores alemanes Strauss y Maurer. Estos últimos patentaron en 1912 dos grupos de aceros inoxidables al cromo-níquel de bajo contenido de carbono; uno de ellos, con la denominación 18-8, ha sido utilizado desde entonces en numerosas aplicaciones.

Por cuestiones logísticas vinculadas a la Primera Guerra Mundial, las propiedades y las composiciones de los aceros inoxidables se mantuvieron en secreto hasta el final de la contienda. A partir de los años treinta, se empezó a disponer de acero inoxidable de forma comercial.

Una de las primeras aplicaciones relevantes del acero inoxidable en la construcción fue el revestimiento de la coronación del edificio Chrysler de Nueva York, inaugurado en 1930, en que se emplearon treinta toneladas de dicho material. A su lado, como ejemplo reciente, se encuentra el edificio Lloyd's de Londres, que se caracteriza, entre otros aspectos, por la utilización masiva de acero inoxidable en sus fachadas. Fue diseñado por el arquitecto Richard Rogers entre los años 1978 y 1986.



Acero corten. En la línea de conseguir aceros inoxidable, se encuentra el llamado *acero corten*, obtenido con aleaciones de cobre y níquel. Desde el punto de vista estético, sus texturas y colores van cambiando en función de la edad de la pieza. Tiene el inconveniente de las manchas producidas por el arrastre de las partículas de óxido superficial que se desprenden con la lluvia.

La incorporación del aluminio a la construcción tecnológica es otro hito significativo que conviene analizar. A finales del siglo XVIII, el óxido de aluminio no era más que una curiosidad científica a la que hizo referencia el químico francés Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794). El problema para obtener aluminio de la bauxita era que primero había que separar de esta, mediante un proceso complicado, el óxido de aluminio o alúmina.

No fue hasta 1888 que el químico alemán Karl Josef Bayer (1847-1904) logró una patente alemana de un proceso mejorado para obtener óxido de aluminio. El paso siguiente precisa ingentes cantidades de electricidad para conseguir, mediante procesos electrolíticos, aluminio en estado metálico. Por ello, el aluminio es un metal caro y con un fuerte impacto ambiental.

Con todo, las propiedades excepcionales del aluminio lo han convertido en un elemento común de la edificación tecnológica. Es un metal ligero, de $2,70 \text{ g/cm}^3$, al cual se puede otorgar mayor resistencia aleándolo con otros elementos. Resiste la corrosión, y conduce el calor y la electricidad. Es reflector de la energía luminosa y la radiante. No es tóxico, no es magnético y es maleable.



La mayor parte del aluminio que se emplea en la construcción se destina a la realización de muros cortina y carpinterías, constituidas por perfiles extrudidos. La extrusión es un procedimiento metalúrgico en que, con el calentamiento previo del material y la presión, se consigue un perfil mediante una matriz a través de la cual discurre el material.

En el caso de la extrusión del aluminio, el calentamiento previo se produce a 450 °C-500 °C, sometiéndolo a presiones de entre 500 a 700 MPa. Esta técnica para obtener perfiles de aluminio viene siendo usada desde hace más de 50 años

La disponibilidad de perfiles de aluminio se asoció al desarrollo de cristales cada vez de mayores prestaciones, tintados, reflectantes, con cámara, resistentes a impactos, etc.

Las primeras realizaciones significativas aprovechando las propiedades conjuntas del aluminio y del vidrio se iniciaron a finales de la década de los cuarenta y se consolidaron como modelo, mayoritariamente para edificios de oficinas en altura, en los años sesenta y setenta del siglo pasado.

Los edificios que fueron un hito de dicho modelo fueron el Equitable Savings Bank de Portland, inaugurado en 1948, diseñado por el arquitecto Pietro Belluschi (1899-1994); la Lever House de Nueva York, terminada en 1952 por los arquitectos Gordon Bunshaft (1909-1990) y Natalie de Blois (1921), y el edificio Seagram de Nueva York, terminado en 1958, obra de Mies van der Rohe (1886-1969) y Philip Johnson (1906-2005). Estos edificios fueron los primeros rascacielos con muro cortina continuo y exento con respecto a la estructura del edificio, construidos mediante montantes y travesaños.

Las tres fotografías inferiores corresponden, de izquierda a derecha, a los edificios citados.



Comparados con las prestaciones de los sistemas equivalentes de cerramientos ligeros empleados en la actualidad, los primeros muros cortina quedan a años



luz. Los déficits energéticos eran compensados mediante consumos desmesurados de recursos. Estas deficiencias pusieron en crisis la tipología tradicional de los muros cortina, a partir de los años ochenta del siglo pasado. La mejora de los procesos de fabricación, de templado de los vidrios y de las prestaciones energéticas de las láminas resultantes, junto con la aparición de la silicona estructural, propició que a finales de los ochenta desapareciera la imagen de los montantes y travesaños, que fue sustituida por una lámina continua de cristal, fijada mediante sistemas de botones o silicona.

En la actualidad, el aluminio se sigue empleando en la construcción tecnológica para múltiples usos, en muros cortina de última generación, en perfiles para la formación de divisiones interiores o en carpinterías exteriores, con o sin rotura de puente térmico, con una amplia gama de acabados.

Titanio. El titanio es el último metal que se ha incorporado a la construcción tecnológica, auspiciado por su ligereza, $4,5 \text{ g/cm}^3$ y por su resistencia mecánica y a la corrosión. Debido a su elevado costo, alrededor de 50 €/kg, se utiliza solo para la realización de cubiertas mediante chapas muy delgadas, habitualmente de groesos inferiores a 0,5 mm.

Si bien el titanio es abundante en la naturaleza, su producción es compleja y requiere alta tecnología, por lo que inicialmente fue considerado un material estratégico, desde el punto de vista militar, destinado a usos aeroespaciales.

El titanio como metal no se empleó hasta 1946, año en que William Justin Kroll (1889-1973) desarrolló un método para poder producirlo industrialmente. Ello da idea de los cortos plazos en que la construcción tecnológica aplica a usos prácticos los resultados derivados de la investigación.

El ejemplo más representativo de utilización de chapas de titanio como material de cubierta en nuestro país es el Museo Guggenheim de Bilbao, proyectado por el arquitecto Frank Owen Gehry (1929) y construido entre 1991 y 1997. La fotografía inferior izquierda muestra un aspecto general del edificio; la de la derecha, un detalle del revestimiento de chapas de titanio.





En una realización posterior del propio Gehry en la Ciudad del Vino Marqués de Riscal en Elciego (Álava) (2006), el titanio es tratado en forma de láminas tensionadas para garantizar su tersura, como se muestra en las dos fotografías anteriores.

Otros materiales empleados por la construcción tecnológica. Los adhesivos de altas prestaciones constituyen una gama muy amplia de productos desarrollados por la industria química y puestos en el mercado después de la Segunda Guerra Mundial.

Las resinas epoxídicas constituyen el ejemplo más representativo de los productos adhesivos de altas prestaciones, por las múltiples aplicaciones que permiten sus propiedades químicas y su resistencia mecánica.

Las resinas epoxídicas están presentes, en la actualidad, en numerosas aplicaciones para la edificación en morteros, formulados para los más diversos usos: pavimentos autonivelantes, revestimientos de fachadas, cementos cola, materiales de revestimiento contra el fuego, etc.

Si bien los primeros trabajos sobre las resinas epoxi datan de 1900, no se comercializaron hasta 1948. Las capacidades adhesivas y resistentes de las resinas epoxi se pusieron de manifiesto en 1964 en el salvamento de los templos de Abu Simbel, amenazados por la crecida del nivel de las aguas del Nilo a causa de la construcción de la presa de Asuán. Un equipo internacional se encargó, entre 1964 y 1968, de cortar los templos en grandes bloques y volverlos a montar en un lugar seguro. Las resinas epoxi permitieron elevar bloques de hasta dos toneladas mediante la fijación de espárragos en perforaciones efectuadas en la roca, como se muestra en la fotografía inferior izquierda.



Plásticos. Bajo el nombre genérico de **plásticos**, se engloban multitud de productos de base orgánica, como el PVC, el vinilo, el polivinilo o el poliestireno, que habitualmente forman parte de la construcción tecnológica.

Su presencia se manifiesta en todos los ámbitos de la construcción y se adapta a las necesidades más diversas, en forma de tuberías para la conducción de aguas potables y fecales, aislamientos de cables eléctricos, carpinterías exteriores de bajo mantenimiento, paneles o aislantes térmicos, por citar simplemente los casos más significativos.

Después de los materiales estructurales, los plásticos ocupan un lugar preferente en la construcción tecnológica. La fotografía central de la página anterior ilustra una carpintería de PVC. La fotografía de su derecha muestra unos tubos de saneamiento realizados con el mismo material.

Fibra de carbono. Otro material que se ha incorporado recientemente a la construcción, por sus características de durabilidad, ligereza y elevada resistencia, es la fibra de carbono. Su historia constituye un ejemplo de los tiempos que corren. Pone de manifiesto la gran evolución que ha experimentado un material inicialmente concebido para la industria espacial o para los automóviles de alta competición, que ahora se aplica en la construcción para realizar refuerzos estructurales.

Las fechas que siguientes son muy elocuentes. En 1958, Roger Bacon, investigador de Union Carbide, demuestra la alta resistencia a la tracción de las fibras de carbono. En 1963, el Ministerio de Defensa del Reino Unido patenta un sistema de fabricación de fibra de carbono. En 1981, McLaren presenta el primer coche de fórmula 1 construido con fibra de carbono.

A finales de los noventa, se realizan en nuestro país los primeros ensayos sobre las aplicaciones de las fibras de carbono en refuerzos estructurales, que motivarán varias tesis doctorales (Jorge Salaverria, 2002, y A. Alarcón López, 2003). En función de los datos obtenidos de diversas empresas del sector, puede concluirse que las primeras aplicaciones prácticas se realizan, en nuestro país, a partir de 2002.

La fotografía izquierda de la página siguiente muestra el refuerzo de una jácena y de las viguetas del forjado que se sustenta en ella mediante tiras adheridas de fibra de carbono.

Cabe concluir que las aplicaciones de la fibra de carbono en la construcción no han hecho más que empezar, sobre todo teniendo en cuenta que sus costes de producción, que ahora las hacen prohibitivas para determinados usos, serán mucho más asequibles en el futuro. ¿Para cuándo un edificio con estructura de fibra de carbono?



Kevlar. Todavía más reciente es la aparición del Kevlar, marca registrada de una fibra de para-aramida sintética, desarrollada por Dupont en 1965 y comercializada desde 1972. En construcción, se aplica como sustituto de los cables de acero, con la ventaja de que solo pesa el 20 % de estos y, además, no afecta la transmisión de ondas electromagnéticas. Por esta razón, este material se utilizó en los tirantes de la Torre de Comunicaciones de Collserola, de 288 m de altura, construida entre 1990 y 1992 según el proyecto de Norman Foster (1935). (Fotografía superior derecha).

El Kevlar también se utiliza eficazmente en refuerzos estructurales de forma similar a la fibra de carbono. Es especialmente indicado para el refuerzo antisísmico de pilares, obra de fábrica y depósitos y, además, confiere protección contra los impactos y las explosiones.

Vidia. El último nuevo material al cual se hace referencia como aportación a la construcción tecnológica es la vidia. Su nombre deriva del alemán "*wie Diamant*" ("como el diamante"). De hecho, los primeros experimentos que condujeron a la vidia, realizados en 1897 por Henri Moissan (1852-1907), tenían por objeto la obtención de diamantes artificiales. Técnicamente, se trata de un compuesto cerámico formado por carburo de tungsteno.

Las herramientas de vidia, concebidas en los años treinta del siglo pasado para trabajar inicialmente el acero, gracias a su extremada dureza, se han aplicado con éxito, a partir de los años cincuenta, a la construcción tecnológica.

Herramientas equipadas con elementos de corte de vidia permiten perforar y cortar el hormigón fácilmente, de forma prácticamente quirúrgica. Ello supone abrir un amplio abanico de posibilidades a las obras de nueva planta, de refuerzo y de rehabilitación de estructuras, al no inducir en ellas impactos ni vibraciones que podrían deteriorarlas durante la intervención.

La fotografía inferior izquierda muestra la supresión de un gran panel de un muro de hormigón armado para abrir un paso. Se aprecian las operaciones en curso. El trabajo se realiza mediante el efecto combinado de perforaciones efectuadas con brocas de campana y sierras de hilo. A través de las perforaciones, se instalan las sierras de hilo con objeto de fragmentar el gran panel en piezas para que puedan ser manipuladas por una grúa. Obsérvense los huecos practicados en la zona central de los bloques resultantes para facilitar su elevación.



La fotografía superior derecha muestra cómo una motosierra manual, equipada con una cadena con elementos de corte de vidrio, es capaz de perforar y cortar limpiamente un muro de hormigón. En ambos casos, la presencia de agua es indispensable, tanto para evitar el polvo como para refrigerar los elementos de corte.

El trabajo en equipo. Sobre el trabajo en equipo, su organización, sus ventajas e inconvenientes, se dispone de una amplia bibliografía. El propósito de este apartado no es tanto exponer los principios del trabajo en equipo sino cómo aplicarlos en la construcción de un proyecto de edificación. En la actualidad, para realizar un trabajo de esta índole, de cierta complejidad, no se plantea otro tipo de organización, pues el trabajo en equipo ofrece las máximas garantías de éxito, por su concepto integrador e integral.

Ello supone que sus miembros han de resolver las tensiones y situaciones anímicas complejas derivadas de su encaje en el organigrama del proyecto, generadas también por su formación y por su carácter. En definitiva, cada individuo debe integrarse en el equipo, y sus compañeros pueden y deben participar en la tarea.

Por su parte, la organización del equipo requiere disponer de mecanismos precisos y bien calibrados para una selección adecuada del personal, con objeto de que la integración de este se produzca de la forma más simple y espontánea posible.

La exposición anterior contiene los elementos básicos del trabajo en equipo: objetivo común, organización y personas.



- **Objetivo común.** Ha de ser claro, y perfectamente definido y conocido por todos los miembros del equipo –en nuestro caso, la construcción de un proyecto de edificación. El objetivo común es el elemento aglutinador de los esfuerzos y la razón de ser última del equipo.
- **Organización,** con capacidad para analizar las necesidades del proyecto, definir el organigrama con distintos puestos de trabajo, sus atribuciones y responsabilidades, y adjudicarlos a personas concretas. La organización ha de realizar el seguimiento del proyecto a escala individual y colectiva, al propio tiempo ha de ser ágil y flexible para corregir, en tiempo y forma, eventuales desviaciones.

Al frente de toda organización, se encuentra una sola persona. Su función principal es la toma de las últimas decisiones. En una organización funcionalmente bien estructurada, dicha persona debería contar, para ello, con las observaciones y las opiniones de sus colaboradores más inmediatos.

Un proyecto de edificación complejo precisa la aportación de diversas empresas, de ramos muy dispares. El promotor suele encomendar la coordinación de todas ellas a una empresa especializada en direcciones integradas de proyecto (DIP) o, dicho en versión anglosajona, a un project manager.

- **Personas.** Las personas aportan, al trabajo en equipo, conocimientos profesionales, experiencia y sus capacidades de relación y de liderazgo. Es fundamental el encaje de cada persona en el lugar apropiado del equipo para que encuentre el marco adecuado para desarrollar su trabajo.

La formación académica en el ámbito europeo ofrece, en la actualidad, “competencias” como la asunción de capacidades para desarrollar determinadas tareas y resolver los problemas asociados a ellas. Han quedado atrás las “atribuciones” relacionadas con la exclusividad de determinadas profesiones con respecto a la realización de trabajos específicos, conceptualmente derivadas de planteamientos gremiales. Por ello, los textos legales más recientes se refieren al “profesional competente”; en lugar de citar una o más profesiones concretas.

El trabajo en equipo es practicado durante la formación académica de los profesionales, en particular, de los relacionados con la construcción de edificios, como una más de las llamadas competencias transversales.

Todo profesional que se precie debe incorporar dichas competencias a sus conocimientos de forma indisoluble para responder adecuadamente a los requerimientos de su actividad, como la capacidad de iniciativa y de relación, la estructura metodológica del trabajo, la expresión oral o el conocimiento de idiomas, por citar las más relevantes.

Cabe concluir que el logro principal del trabajo en equipo y la base de su éxito es la generación de sinergias, entendidas como el conjunto de interacciones que permiten conseguir, mediante una buena organización y la implicación de sus miembros, que los resultados de un equipo de trabajo sean superiores a la suma de los esfuerzos y las capacidades de cada uno de los miembros del equipo.

El desarrollo de aspectos normativos. El desarrollo de aspectos normativos, en cualquier ámbito de la ciencia o de la técnica, es un reflejo del trabajo en equipo expuesto en el apartado anterior.

Los aspectos normativos se redactan, en la actualidad, al amparo de instituciones gubernamentales vinculadas directamente a los ministerios del ramo correspondiente. Dan respuesta, desde iniciativas emanadas de las respectivas profesiones, a necesidades sociales, por lo que su cumplimiento tiene carácter de ley. En consecuencia, los profesionales están obligados a conocerlos y a aplicarlos, tanto en la fase del proyecto como durante la ejecución de los trabajos derivados del mismo. Su incumplimiento puede dar lugar a las responsabilidades correspondientes en el ámbito civil e incluso en el criminal.

Al hacer referencia a la construcción científica, se vio que detrás de un determinado avance o aportación había el nombre de una persona. Por el contrario, los aspectos normativos que regulan las actividades profesionales y, en especial, las relacionadas con la construcción son prácticamente anónimos. Ello no es de extrañar, puesto que la redacción de los aspectos normativos es el resultado del análisis de un conjunto de experiencias y su puesta en común por un conjunto de profesionales.

El propósito de tales acciones es disponer de un documento, o varios, que den respuestas precisas de actuación sobre cómo, cuándo y por qué han de abordarse determinadas cuestiones derivadas de la práctica profesional. Por estas razones, se trata de documentos “abiertos” cuya redacción se perfecciona y se adapta a los tiempos en función de nuevas situaciones y del estado del conocimiento. Están redactados por un comité de expertos cuya composición suele variar en cada nueva actualización.

Disponer de una normativa de referencia es un valor añadido para las profesiones vinculadas a la edificación, que se traduce en un elemento básico para la toma de decisiones y una plataforma de conocimientos “seguros” desde la cual abordar nuevos retos.

Los aspectos normativos referidos al ámbito de la construcción son extraordinariamente amplios y completos: abarcan la legislación urbanística, las ordenanzas propias de cada municipio y, desde el año 2006, el Código Técnico de la Edificación (CTE), que a su vez incorpora la EHE-08 y el conjunto de normas UNE.

La normativa permite adoptar soluciones correctas a problemas específicos y repetitivos, que se dan en el proyecto y en la construcción de cada nuevo edificio.



Es preciso, además, verificar y demostrar frente a terceros que esta se cumple, de modo que el desarrollo de herramientas informáticas para resolver los casos más usuales de forma integrada y de fácil aplicación tiene futuro.

Por su interés social, merecen una mención especial las iniciativas orientadas a la publicación y posterior aplicación de normas específicas para garantizar la seguridad y la salud laboral de los trabajadores de la construcción. En la actualidad, los aspectos relativos a la seguridad y la salud laboral constituyen una especialidad científico-técnica.

Gracias al valor legal de los preceptos normativos relacionados con la seguridad y la salud laboral, resulta impensable desarrollar una herramienta o un sistema constructivo sin considerar los riesgos que se puedan derivar de su utilización y sin establecer los mecanismos de protección necesarios, tanto a escala individual como, en su caso, colectiva. Ello supone formar adecuadamente a los trabajadores en función de los riesgos derivados de su actividad.

Resueltos, en buena medida en las últimas décadas del siglo pasado, los grandes riesgos derivados de caídas, cortes o golpes; en la actualidad se incide, desde la fase de proyecto y durante la ejecución de la obra a través de los coordinadores de seguridad y salud, en la reducción drástica de los efectos de las largas exposiciones, mediante el control y la adopción de las medidas de protección necesarias en aspectos como las emisiones de polvo, de gases tóxicos o de ruido.

El marco legal vigente en material de seguridad y salud laboral en el ámbito de la construcción es muy amplio. Basta con citar como documentos básicos de referencia, además de la LOE, Ley 38/1999, el Real Decreto 1627/1997, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.

El control de calidad. Este apartado tiene por objeto dejar constancia de la aplicación tardía, en la construcción tecnológica, de los mecanismos ensayados en la industria, de forma masiva, durante la Segunda Guerra Mundial, con el propósito último de producir los más diversos productos sin defecto alguno. El lector que precise ampliaciones sobre el tema dispone de una amplia bibliografía a su alcance sobre la historia, el desarrollo práctico y las aplicaciones del control de calidad en el ámbito de la construcción.

El nomadismo propio de la construcción ha constituido un obstáculo para la aplicación de técnicas y procedimientos inicialmente pensados para producciones realizadas en factorías, es decir, con un carácter marcadamente sedentario y protegido de las inclemencias del tiempo.

En este último sistema de trabajo descrito, el operario de una industria se encuentra en su lugar de trabajo y efectúa un número limitado de acciones sobre las piezas, que son las que se desplazan. Durante la construcción de un edificio, sobre un mismo espacio de trabajo inmóvil un conjunto de operarios de diversos ramos y oficios ha de actuar sucesivamente realizando operaciones complejas.

Ello explica que el trabajo realizado por un operario pueda ser accidentalmente alterado por otros que intervengan en fases posteriores. De ahí la necesidad de efectuar “reposos” al final de las obras, tarea delicada, que si no se realiza correctamente, puede ser generadora de conflictos.

Otro punto de contraste para hacer efectivo, en época temprana, el control de calidad en la construcción deriva de la mayor facilidad de valorar estadísticamente las grandes series, propias de los productos industriales, que la ejecución de piezas únicas y complejas, propias del proceso edificatorio.

El control de calidad en la construcción tecnológica se aplica a lo largo de todo el proceso edificatorio (en caso contrario, dejaría de serlo), comenzando por la materia prima –el proyecto–, continuando por la construcción y acabando en el mantenimiento del edificio durante toda su vida útil.

A lo largo de este trabajo sobre análisis constructivo, se exponen dos instrumentos de control de la fase de proyecto por su utilidad para conocer cómo y por qué debe proyectarse para construir de un modo eficiente, con calidad y con respeto hacia el medio ambiente: los planes maestros y las auditorías de proyecto.

El CTE establece la necesidad de documentar el control de obra, de forma que se pueda efectuar un seguimiento, si fuere preciso, y dilucidar las eventuales responsabilidades de los distintos agentes intervinientes. De su aplicación actual, solo cabe decir que ha de perfeccionarse para que sea más un control de calidad efectivo y menos un instrumento testimonial. Para ello, basta con aplicar los aspectos siguientes, derivados de la LOE vigente:

- **Documentación eficiente de la contratación.** Cláusulas de garantía, fianzas (avales, depósitos, retenciones).
- **Proceso de recepción estructurado.** Pruebas de conformidad (estanqueidad, aislamiento acústico), puesta en marcha de instalaciones, revisiones, limpiezas. Acta de recepción. Fecha explícita a efectos del plazo de garantía.
- **Períodos de garantía.** Un año por defectos en el acabado; tres años para las instalaciones o por incumplimiento de los requisitos de habitabilidad, y diez años para los cimientos y la estructura (art. 17.1 LOE).
- **Garantizar la responsabilidad después de la construcción.** Póliza de seguros con intervención de las OCT (Oficinas de control técnico). Corresponsabilidad. Responsabilidad subsidiaria.

Puede concluirse que la consecución de la calidad a través de su control es uno de los aspectos vinculados a la cultura de las sociedades avanzadas y un factor que potencia la competitividad de las empresas y entre ellas. El control de calidad es, por último, un factor social de confianza, asociado a la garantía de satisfacción del cliente. Ello clarifica los mercados y facilita las transacciones comerciales.



La celeridad en los cambios. En un mundo cambiante como el actual, una de las pocas cosas de las que se puede estar seguro es que se van a seguir produciendo cambios, de toda índole, a un ritmo difícil de prever y de controlar.

La construcción no va a quedar al margen de los mismos. La generación de nuevas técnicas constructivas, más eficientes y con menor impacto ambiental, el perfeccionamiento de los modelos edificatorios existentes o la creación de otros nuevos y la rehabilitación del parque edificatorio con valores patrimoniales son los vectores de futuro. Por tanto, cabe concluir que, sean cuales sean los cambios, los procesos edificatorios seguirán siendo necesarios y un valor estratégico para el desarrollo de las sociedades.

Es evidente que hacer frente a los cambios es un reto constante para los profesionales y para las instituciones. Ambos han de adaptarse no solo a las modificaciones normativas sino también, de forma colateral, a nuevos conceptos y a formas distintas de hacer, de controlar y de presentar determinados trabajos. Los trámites telemáticos tienen cada vez mayor protagonismo en las relaciones entre profesionales y de estos con la administración.

Las respuestas y las necesarias adaptaciones a los cambios se encuentran en la formación continuada, a la cual han de acudir todos los estamentos laborales. Ello supone desarrollar la capacidad de “aprender a aprender” desde las primeras fases de la formación y mantener dicha actitud a lo largo de toda la vida profesional.

Frente a la estabilidad propia de las formas de trabajar de épocas anteriores, las incertidumbres y las servidumbres que suponen las adaptaciones a los cambios requieren un esfuerzo anímico y económico constante de los profesionales, las empresas y las instituciones a las que ha tocado en suerte vivir la época de la construcción tecnológica y, en contrapartida, disfrutar de los logros sociales derivados del esfuerzo común. No reconocer la importancia y la necesidad de la formación permanente supone pagar el coste elevado de la ignorancia. Impensable.

Sostenibilidad. Se ha escrito mucho sobre sostenibilidad, y se seguirá escribiendo. No se trata de una moda. El uso que hacemos de la energía y de los recursos naturales afecta la continuidad y la salud de la “aldea global” que es nuestro planeta.

El conjunto de la sociedad, empezando por los mayores consumidores, tiene el derecho y la obligación de contribuir a la sostenibilidad, analizando lo que es necesario y lo que resulta superfluo o inconveniente. Es preciso depurar los procesos de producción tradicionales para hacerlos compatibles con el futuro.

La aplicación del viejo principio de las tres erres preconizado por la organización ecologista Greenpeace –reducir, reciclar, reutilizar– sigue siendo una buena re-

ferencia para hacer una construcción eficiente y, a la vez, sostenible. Es preciso aplicar, una vez más y con un nuevo sentido, la frase de Mies van der Rohe: “menos es más”

La triada “reducir, reciclar, reutilizar” debe enmarcarse en los requerimientos y las prestaciones que establece el CTE; no hacerlo así puede llevar a aceptar reducir la calidad del producto final.

Reducir. En la construcción tecnológica, el concepto de reducción no ha de afectar las prestaciones. Sin entrar en aspectos de índole política, manteniendo el discurso exclusivamente en el plano técnico, es posible reducir sustantivamente los impactos ambientales de la edificación modificando determinados modelos edificatorios desde el planeamiento urbanístico, evitando su repetición mimética por inercia en lugares y situaciones inapropiados.

El carácter de ley que otorga al planeamiento urbanístico su aprobación definitiva, así como su aplicación ejecutiva como instrumento de gestión del desarrollo de los espacios urbanos, permiten incidir, desde el mismo, para cuestionar la necesidad y la conveniencia de efectuar determinadas construcciones bajo rasante, en especial cuando se conoce la existencia de niveles freáticos muy altos, y establecer a partir de estudios analíticos el número de plantas óptimo para la edificación.

En espacios de nueva urbanización, es preciso plantear, desde el punto de vista ambiental y económico, la inconveniencia de construir bajo rasante por el sobrecosto inicial y el derivado de las servidumbres de ventilar y proteger contra el fuego los espacios resultantes a lo largo de su vida útil.

Con respecto a las alturas de la edificación, el urbanismo maneja parámetros tales como el número de viviendas por hectárea o los metros cuadrados de techo por metro cuadrado de suelo. Ello se acaba transformando, en función de la anchura de las calles, en un número determinado de plantas sobre rasante. No se tiene en consideración el cambio producido, en los últimos tiempos, en los modelos estructurales para obtener de ellos el máximo partido. La mera observación de zonas de nuevo desarrollo permite apreciar, en la mayoría de las ocasiones, la construcción de modelos edificatorios que son una simple copia de los desarrollados en épocas anteriores, realizados con materiales de prestaciones muy inferiores.

Desde el ámbito de la construcción, para colaborar en la reducción del impacto ambiental, han de desarrollarse nuevas técnicas de prefabricado y semiprefabricado, orientadas a reducir los tiempos de ejecución y los costes de mantenimiento. Estas premisas han permitir realizar una construcción más simple, ligera y eficaz, sin los problemas de compatibilidad entre elementos portantes y portados propios de los modelos actuales. Dichas técnicas deberán desarrollarse, en buena medida, contando con materiales reutilizados y adaptar sus capacidades portantes al número de plantas previsto.



Igualmente, en la reducción ha de prevalecer el sentido común de los agentes implicados en la construcción para evitar los costes ambientales y económicos derivados de la elección de acabados que solo se justifican por un afán de notoriedad mal entendida.

Por último, la reducción ha de afectar las instalaciones, incidiendo tanto en la incorporación de equipos de mayor eficiencia y, por tanto, de menor consumo, como en la disposición de energías alternativas en el propio edificio. La normativa vigente al respecto está recogida en el Real Decreto 1826/2009, por el que se modificó el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE), aprobado por Real Decreto 1027/2007, y las subsiguientes correcciones del Decreto 1286/2009, publicadas en los BOE núm. 38 y 127 de 2010.

Reciclar. En construcción, reciclar ha supuesto, entre otros aspectos que se irán detallando, transformar el tradicional concepto de “derribo” por el de “deconstrucción”.

El derribo consiste, simplemente, en efectuar las actuaciones necesarias para suprimir, del modo más operativo y simple posible, una construcción obsoleta o inapropiada. La deconstrucción, manteniendo el mismo propósito que el derribo, parte de actuaciones coordinadas para permitir la separación en origen de los distintos materiales que conforman el edificio, en aras de su reciclaje y reutilización posterior.

Ha supuesto, también, iniciar la gestión de los residuos en la propia obra, ya sea de deconstrucción o de nueva planta, habilitando contenedores separados para madera, para plásticos y embalajes, para metales y para los residuos de obra. Igualmente, se ha dispuesto de una red de gestores últimos de residuos con vertederos controlados y plantas de machaqueo para producir áridos reciclados.

En Catalunya, la norma que regula en la actualidad el programa de producción y de gestión de residuos de la construcción y la demolición es el Decreto 89/2010, que establece un canon sobre la deposición de dichos residuos para garantizar la eficiencia, la continuidad del proceso y la correspondiente reducción del impacto ambiental ante una gestión descontrolada o, simplemente, una no gestión.

Con todo, los aspectos más relevantes relativos a la sostenibilidad y las posibilidades de reciclar han de provenir del propio proyecto, bajo el paraguas del planeamiento urbanístico, como ya se ha indicado. Cuando se proyecta una construcción, se le otorga una vida útil al final de la cual deberá ser deconstruida. Para facilitar esta labor o la adaptación a los cambios que el edificio pueda tener a lo largo del tiempo, es preciso plantear, desde el proyecto, soluciones constructivas cuya base sea el montaje, por encima de la tradicional “vía húmeda”.

Si bien las exigencias sociales y de mercado marcan tendencias aceptando o rechazando determinadas formas de construir y de acabar los edificios, ello no es suficiente. Se requieren estudios analíticos y dedicar un esfuerzo mayor a I+D

en el ámbito de la construcción para reciclar los modelos constructivos actuales hacia otros más eficaces. El margen de mejora en los procesos constructivos es tan amplio como reticentes a los cambios son algunos de los poderes fácticos que controlan el proceso constructivo. Cabe pensar, aunque sea como consuelo, que es difícil detener el tiempo y el progreso.

Reutilizar. El concepto de reutilizar o reutilización tiene, en la edificación, un vocablo equivalente: *rehabilitación*.

La rehabilitación abarca un amplio campo de actuaciones, desde las que afectan la mejora de la calidad y de los servicios de los espacios urbanos o las intervenciones en las fachadas y los servicios comunes de los inmuebles, y ocasionalmente en el interior de las viviendas, hasta las actuaciones integrales, que afectan la totalidad de uno o más inmuebles, incluidas sus instalaciones.

La rehabilitación parte de la conservación de la trama urbana y humana, de modo que participa de los conceptos descritos previamente de reducción y reciclaje.

Reduce esfuerzos, con respecto al crecimiento generado mediante la creación de nuevos espacios, al reducir los desplazamientos de las personas, y aprovechar infraestructuras, servicios y edificios existentes. Permite, además, el juego político entre el reciclaje a escala urbana e individual.

La gestión de la rehabilitación en las zonas urbanas es un problema complejo que ha de resolverse mediante programas de larga duración. Para abordarlo en condiciones de éxito, los ámbitos público y privado han de actuar conjuntamente. La inversión pública habitualmente arrastra la privada a través de actuaciones en el ámbito urbano, efectuando promociones de rehabilitación integral y estableciendo programas de ayuda para que los particulares se sumen a la iniciativa.

La opción por la rehabilitación supone respetar los valores patrimoniales y sociales frente a otras alternativas de crecimiento más rápido. Es preciso advertir que elegir la segunda opción acaba pasando factura en forma de antiguos centros abandonados y de ciudades mal estructuradas.

La rehabilitación es también una buena oportunidad para conservar, con la debida dignidad profesional, algunos oficios relacionados con la construcción o afines, que de otro modo se habrían perdido definitivamente.

1.3. Los modelos estructurales en la construcción de edificios

La estructura de un edificio, entendido como el conjunto resistente formado por la cimentación, la edificación bajo rasante –si la hay– y las plantas sobre rasante, por sus funciones resistentes y de soporte constituye una parte fundamental del mismo, a los efectos de su análisis constructivo.



Aspectos como su fiabilidad frente a situaciones límite, su durabilidad, los problemas derivados de la construcción bajo rasante, las medidas a adoptar para corregirlos o las interacciones entre los elementos portantes y portados han de tenerse en cuenta, tanto en el diseño de los futuros edificios, como en el análisis de los construidos.

También han de ser objeto de análisis otros enfoques relativos a la estructura de un edificio, como su coste global y relativo con respecto al conjunto, sus tiempos de ejecución, las servidumbres generadas durante su construcción con respecto a las fases siguientes de la edificación, los consumos energéticos y las emisiones de CO₂.

El desarrollo y el conocimiento de los apartados anteriores permite realizar estudios no solo de carácter cualitativo, sino también cuantitativo y comparativo entre modelos de edificios. Tales estudios han de contribuir a avanzar para construir de forma más eficiente, segura y respetuosa con el medio ambiente.

En cualquier edificio, por complejo que sea, y con independencia de las prestaciones de los materiales que lo compongan, es posible distinguir un máximo de tres modelos estructurales. De forma convencional, según los planteamientos del profesor Fructuós Mañà, se denominan:

- Cueva
- Cabaña
- Tienda

No es propósito de este trabajo entrar en disquisiciones sobre qué modelo fue históricamente anterior a otro. Se trata, simplemente, de establecer unos mecanismos para la clasificación, el estudio y el análisis de distintos tipos edificatorios.

A través de su conocimiento y estudio, se pretende llegar a extraer conclusiones útiles sobre los mismos, aptas para ser aplicadas a diferentes propósitos, orientados a:

- Conocer la construcción del pasado, entendiendo como tal desde la prehistoria hasta el día de ayer, para hacerlo mejor en el futuro.
- Construir de forma más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.
- Optimizar los diseños constructivos, a través del conocimiento y la mejora de las prestaciones de los materiales.
- Conocer, de forma analítica y crítica, las distintas opciones que ofrece la técnica constructiva para un mismo propósito.
- Mejorar, para cada caso concreto, todos o alguno de los parámetros que puedan considerarse aceptables de modo habitual, relativos a la calidad, al precio y al tiempo de ejecución.



- Fomentar la investigación en el campo de la edificación. A cada nueva respuesta, surgen más preguntas.

A continuación, se exponen la composición, las características y las prestaciones de cada uno de los modelos.

1.3.1. Modelo “cueva”

Los edificios construidos según el modelo “cueva” se caracterizan por su masividad. Se trata de edificios de paredes gruesas en los que estas asumen tanto la función estructural como la de cerramiento.

El modelo “cueva” más simple es el dolmen o trilito, construcción de época prehistórica. El tipo más sencillo es el que se ilustra en la fotografía inferior izquierda. Está formado por dos piedras colocadas verticalmente, sobre las cuales descansa un dintel del mismo material. El de la derecha responde a la tipología denominada “de corredor”.



Las fotografías siguientes muestran la vigencia del sistema en nuestros días. Han cambiado los materiales y las técnicas; no así el concepto constructivo: depositar un elemento rígido longitudinal sobre unos soportes previamente preparados.

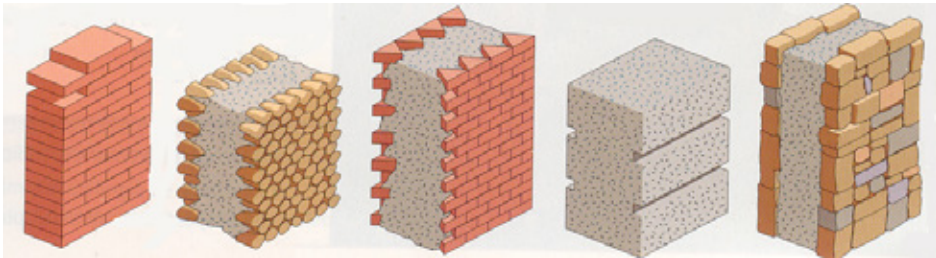




La base de la construcción del modelo “cueva” son las fábricas, de las cuales se conoce una amplia variedad, en especial desde las épocas griega y romana. Las fábricas se elaboran con materiales pétreos o cerámicos, dispuestos en seco o, más comúnmente, unidos mediante un aglomerante.

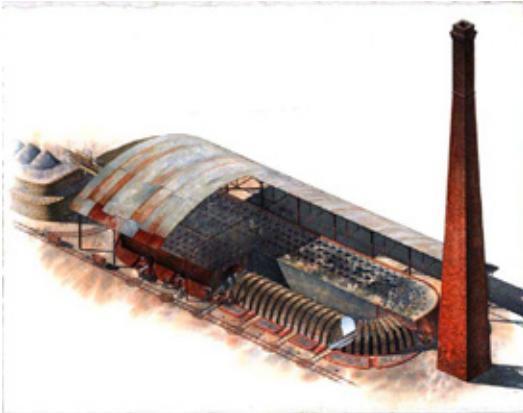
El aparejo es determinante para el buen comportamiento mecánico de las fábricas. Establece la ley de distribución espacial de las piezas que componen una fábrica a partir de la cual se elaboran los distintos paños de muro necesarios para conformar una construcción o un edificio.

Un aparejo bien diseñado evita las coincidencias de juntas verticales y garantiza el enjarje correcto de esquinas y elementos singulares. Además, para que el sistema funcione correctamente, el diseño general del edificio ha de disponer, de forma regular y perpendicularmente al muro de carga, muros de arriostramiento y de traba.



En el desarrollo del modelo “cueva”, es determinante la técnica, de origen romano, consistente en la ejecución de muros mediante dos hojas pétreas paralelas, enlazadas por piezas pasantes y el relleno de los espacios intermedios con hormigón de cal (*opus incertum*). Esta forma de proceder se mantuvo a lo largo de siglos. Con todo, el sistema se fue degradando por medio de reducciones sucesivas de los gruesos de los muros hasta llegar a situaciones de colapso durante el siglo XVIII.

Un avance significativo en la construcción basada en el modelo “cueva”, reduciendo gruesos de muro sin renunciar a la resistencia estructural, se llevó a cabo con la aparición, en 1859, de los hornos de anillo de tipo Hoffman para cocer los ladrillos (v. gráfico en página siguiente a la izquierda). Estos, al abaratar sustantivamente los costes de producción, facilitaron el empleo de la fábrica de ladrillo, y la aparición y el desarrollo posterior de la técnica constructiva denominada *albañilería*, de la cual son una buena muestra el Raval y, posteriormente, el Ensanche de Barcelona. Los hornos Hoffman, al permitir un ciclo continuo de producción, reducían a una tercera parte el consumo de los hornos ordinarios.



La albañilería conjuga ladrillos de diferentes grosores para formar muros, arcos y bóvedas, de modo que es posible construir todo un edificio sin necesidad de emplear otros materiales (v. fotografía superior derecha). De ahí que, en nuestro país, desde mediados de siglo XIX hasta mediados de siglo XX, se asociara, de forma casi indisoluble, el ramo de albañilería a la construcción de edificios.

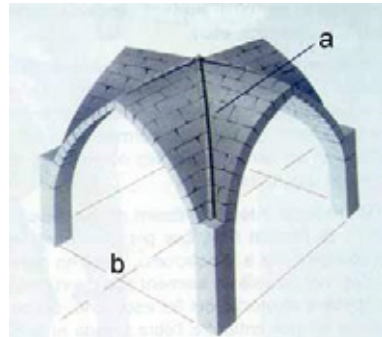
Las limitaciones del modelo "cueva" vienen impuestas por el mayor dispendio energético que comporta su construcción, con respecto a los modelos "cabaña" y "tienda", y las bajas prestaciones mecánicas que, en general, tienen las fábricas elaboradas con materiales pétreos. Ello obliga a ejecutar muros muy gruesos y arriostrados para evitar los efectos del pandeo.

Las fábricas pétreas no suelen superar tensiones de trabajo superiores a los 10 kg/cm^2 , debido al gran número de juntas entre las piezas y a la menor resistencia del aglomerante. Este actúa a modo de cojín entre las piezas, repartiendo de forma homogénea las tensiones puntuales que resultarían de su contacto directo.

El módulo de deformación de las fábricas se sitúa entre los 20.000 y los 35.000 kg/cm^2 . Se trata de valores relativamente reducidos (del orden de 10 veces menos que el hormigón); por ello, las fábricas tradicionales cuyos módulos de deformación se sitúan en la zona baja de la gama admiten deformaciones y pérdidas de verticalidad, perceptibles a simple vista, sin la aparición de grietas.

Los edificios elaborados siguiendo el modelo "cueva" pueden cubrirse mediante elementos flectados (habitualmente, forjados y techumbres de madera) o con bóvedas construidas con materiales pétreos sujetos a esfuerzos de compresión (v. fotos en página siguiente).

En el primer caso, las edificaciones son más sensibles a los efectos del fuego que en el segundo; por el contrario, un forjado o una cubierta de madera resultan más económicos de construir que una bóveda.



Una consecuencia directa de la masividad es el alto grado hiperestático de los edificios de tipo “cueva”. En ellos, es posible abrir huecos relativamente grandes, puesto que se forman, de manera natural, arcos espontáneos de descarga. Estos desvían las solicitaciones a zonas no alteradas de la estructura y, a cambio, reducen el coeficiente de seguridad de la misma. Esta propiedad hiperestática de las fábricas es comúnmente utilizada en los trabajos de rehabilitación y de reforma para realizar plantas más diáfanas o, simplemente, para adaptar la posición de los huecos originales a una nueva distribución.

El comportamiento térmico de los edificios que responden al modelo “cueva” se caracteriza por su gran inercia y por la conductividad relativamente elevada de los materiales pétreos que constituyen sus fábricas; por ello, resultan más aptos para mantener una temperatura interior fresca en verano que templada en invierno.

El aislamiento acústico está garantizado por el peso por m^2 de las paredes; sin embargo, la deficiencia de ajuste de puertas y ventanas penaliza notablemente el resultado final. En conjunto, por muy elevado que sea el aislamiento acústico de un muro, resulta difícil mejorar en más de 5 dB, en una dependencia determinada, el aislamiento acústico del cerramiento que lo tenga menor, habitualmente este corresponderá a una puerta o a una ventana. Por ejemplo, si en una habitación tenemos una ventana que proporciona un aislamiento acústico de 20 dB, por muy aislante que sean sus paredes, conseguiremos un aislamiento máximo de 25 dB.

Cabe destacar, por último, la larga durabilidad de los edificios que responden al modelo “cueva”, puesto que constituyen el grueso de los edificios patrimoniales y algunos de ellos, como sucede con las iglesias románicas más antiguas, tienen más de 1.000 años de existencia a sus espaldas y todavía conservan, en algunos casos, una salud estructural excelente.

1.3.2. Modelo “cabaña”

El modelo “cabaña” tiene su origen en las construcciones palafíticas. Una primera aproximación al modelo muestra los aspectos siguientes:

- La estructura es independiente de los cerramientos.
- La estructura está formada por barras y nudos.
- Los nudos resuelven el enlace y la confluencia de las barras en un punto determinado.
- Es más ligero que el modelo “cueva”.
- Los aislamientos térmico y acústico están condicionados a la calidad del cerramiento.
- En los modelos iniciales, basados en la utilización estructural de la madera, hay mayor sensibilidad al fuego que en las construcciones de fábrica.

La fotografía izquierda muestra un modelo original, mientras que la de la derecha pone de manifiesto la evolución del modelo dentro de un mismo contexto.



El modelo “cabaña” combina la ligereza, la resistencia y la especialización de sus elementos. Permite la creación de estructuras de nudos tanto isostáticos como hiperestáticos. En el primer caso, es preciso introducir elementos de rigidez, en forma de cruces de San Andrés, para hacer frente a los esfuerzos horizontales, generados por empujes de agua, tierras, viento y sismo.



Tal es el caso de las dos *maisons à colombages* de las fotografías inferiores. La estructura leñosa, con sus cruces de San Andrés, es perfectamente visible desde el exterior, así como los paños de plementería encargados de cubrir los huecos resultantes de la estructura.



Al observar la gran cantidad de madera necesaria para llevar a cabo un edificio de este tipo, se pone de manifiesto la presión que ejerció sobre los bosques, desde la Alta Edad Media hasta bien entrado el siglo XVIII, la construcción terrestre y la naval, especialmente en unas épocas en las que, además, la madera era el combustible básico.

Si tuviera que definirse el modelo “cabaña” con una palabra, esta sería, sin duda, *versatilidad*. Versatilidad para:

- Construir con diversidad de materiales: madera, acero, hormigón.
- Conformar nudos resistentes, tanto isostáticos como hiperestáticos.
- Edificar en altura. Prácticamente todos los rascacielos responden a variantes estructurales del modelo “cabaña”.
- Hacer frente, de forma eficiente, a los esfuerzos del viento y de los sismos.
- Elegir los cerramientos y las divisorias más apropiadas para cada situación y uso. Sobre una misma estructura, puede optarse por el tipo de piel más apropiado al uso y a la situación climática del edificio.
- Disponer de plantas diáfanos donde poder introducir y modificar cualquier configuración espacial.



La fotografía de la izquierda muestra el John Hancock Center de Chicago; la central, el Hotel Arts de Barcelona y, la de la derecha, el edificio Leadenhall de Londres. Los tres edificios, como otros muchos, comparten en su estructura, de forma visible, el modelo “cabaña”, lo cual pone de manifiesto su capacidad de adaptación a los tiempos.



1.3.3. Modelo “tienda”

El modelo “tienda” está asociado, en sus primeros tiempos, al nomadismo, a las campañas militares y al comercio itinerante. Con la aparición de nuevas técnicas y materiales, a partir de la segunda mitad del siglo xx, el modelo “tienda” ha visto ampliado notablemente su campo de acción y su presencia en el ámbito de la edificación.

Resulta evidente que las realizaciones estructurales del modelo “tienda” son minoritarias dentro de la producción global de la edificación, pero no es menos cierto que sus aportaciones resultan indispensables para abordar, de forma eficiente, problemas específicos cuya resolución sería mucho más compleja e incluso imposible, empleando los modelos “cueva” o “cabaña”. Por requerir menos espacio, todos los aspectos relativos al modelo “tienda” incluidos en este trabajo se describen en este apartado.

El modelo “tienda” presenta, como características más destacadas, su ligereza, el carácter isostático de sus estructuras y la limitación de las prestaciones térmicas y acústicas. Es también limitada su resistencia al fuego, en especial la de las membranas que conforman los cerramientos.

La eventual propagación del fuego dentro de recintos de tipo “tienda” ha de evitarse empleando, en su construcción, membranas no propagadoras de llama y que al arder no produzcan gases nocivos. Ello no excluye los sistemas de



prevención habituales, tanto activos como pasivos. El comportamiento frente al fuego ha de ser uno de los aspectos clave en la elección de las membranas.

La ligereza, factor consustancial del modelo, permite desmontar, transportar y volver a montar la construcción, si es necesario o previsible, con costos de operación relativamente bajos frente a otras opciones.

Las limitaciones y los riesgos que comportan las estructuras rigurosamente isostáticas, en que el colapso de uno de sus elementos puede comportar la ruina de la construcción, se solventa, en el modelo "tienda," incrementando el número de los mismos. Se garantiza así la estabilidad del conjunto, incluso ante el eventual fallo en algún punto de la estructura.

Los déficits térmicos y acústicos asociados al modelo "tienda" y el modo de atenuar sus efectos se detallan en el apartado denominado "El control ambiental en el modelo 'tienda'".

Algunos modelos tradicionales de tienda

A continuación, se comentan dos modelos tradicionales de tienda que, incluso en la actualidad, siguen dando cobijo y protección a las etnias que las utilizan, para las cuales constituyen un elemento primordial de su cultura.

La foto de la izquierda muestra una jaima, un tipo de construcción utilizada por los nómadas del desierto del Sáhara realizado con pieles de camello. La foto de la derecha corresponde a un tipi de los indios de América del Norte. Originalmente, los tipis estaban confeccionados con pieles de búfalo.



Ambas construcciones comparten algunos aspectos: estructura de madera, forma apuntada, cubierta de piel y facilidad de montaje, de desmontaje y de transporte.



La consecución de la estabilidad de la estructura presenta ligeras diferencias entre la jaima y el tipi. La estabilidad de la jaima depende de uno o más soportes de madera y de tirantes fijados a la piel de la cubierta y al suelo. Con esta disposición, la piel de la cubierta queda tensada y forma parte de la estructura.

En el tipi, la piel es una simple cubierta de la estructura cónica autoestable, formada por varas de madera clavadas en el suelo. Estas sustituyen la función estabilizadora que los tirantes ejercen en la jaima.

Elementos del modelo “tienda” tradicional trasladados a la arquitectura textil

Cuando la tensión ejercida sobre la membrana se efectúa por medio de estructuras auxiliares, de acuerdo con los esquemas tradicionales descritos, tres son los elementos básicos del modelo “tienda” tradicional: soportes, tirantes y membrana.

Soportes. Los soportes pueden responder a una gran variedad de modelos, desde elementos simples, como los mástiles, a estructuras más complejas, como pórticos, trípodes y arcos cruzados. Incluso es posible utilizar, como elemento de soporte, partes de edificaciones convencionales.

Los soportes están sometidos, fundamentalmente, a esfuerzos de compresión y flexocompresión. Su función es transmitir al suelo, con anclajes de tipo rótula o empotrados, el peso de la membrana y los esfuerzos frente al viento a que esté sometido el modelo “tienda” en cuestión.

Las cuatro fotografías siguientes muestran algunas de las muchas posibilidades para sustentar construcciones realizadas de acuerdo con el modelo “tienda”:

La fotografía superior izquierda muestra un paraboloide sustentado por mástiles y tirantes. En la fotografía superior derecha, la membrana está sustentada mediante cables a una estructura triangulada de pórticos de acero.

La fotografía inferior izquierda de la página siguiente muestra una estructura tubular de base, de la cual emergen sendos mástiles para el soporte de unos conoides. La fotografía inferior derecha corresponde a la cubierta de una gradería. La estructura primaria de soporte está constituida por dos arcos y dos mástiles. El soporte de la membrana se realiza por medio de arcos tubulares y tensores.

Debido al peso por metro cuadrado relativamente escaso frente a los modelos estructurales “cueva” y “cabaña”, obtenido de la ratio peso/superficie, y a la elevada capacidad de deformación del modelo “tienda”, este requiere poca cimentación y soporta, sin excesivos problemas, asientos del suelo que en otras tipologías serían el origen de graves lesiones.



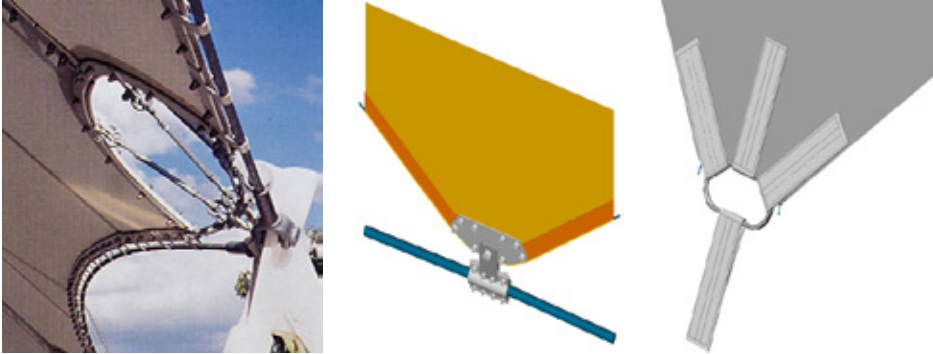
Tirantes. Los tirantes, también denominados vientos, como su nombre indica son elementos que trabajan a tracción. Están formados, habitualmente, por cuerdas o cables de acero. Su función es mantener estables tanto la estructura de soporte como la membrana destinada a cubrir una superficie determinada.

Los tirantes suelen introducir puntos de acumulación de tensión en su contacto con la membrana. Ello se resuelve mediante refuerzos de la membrana o incrementando la superficie de contacto lámina-tirante. Las tres fotografías siguientes muestran tres soluciones habituales para resolver el encuentro membrana-tirante.

La primera evita, mediante un corte, que la tela confluya en el punto de mayor tensión para evitar arrugas. Se refuerza el borde generado, disponiendo una mayor superficie para el reparto de las acciones de la membrana, y se colocan tensores de rosca inversa para controlar las tensiones locales. Corresponde a una solución para membranas de gran formato con elevadas concentraciones de esfuerzos.

En la segunda, elaborada para casos de tensiones intermedias, resulta suficiente un accesorio de prensado de la tela para absorber los esfuerzos sin generar arrugas.

La tercera es la solución más simple, apta solamente para membranas de formato reducido y de utilización estacional. Los esfuerzos se reparten a través de una simple argolla y tres refuerzos de tela.

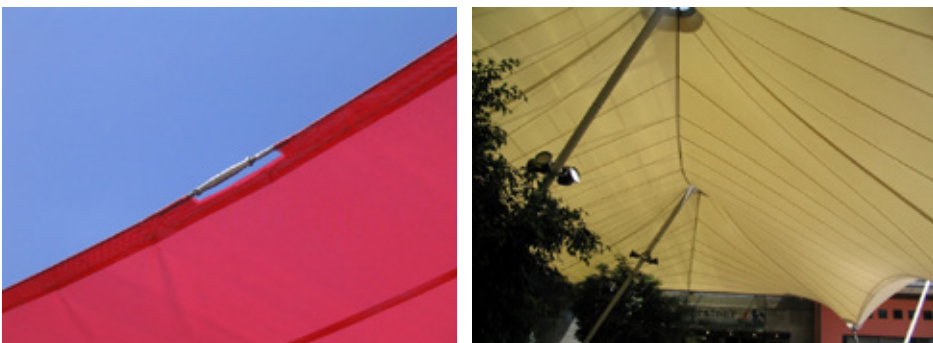


Para evitar deformaciones excesivas en las formas que han de adoptar las membranas, es preciso que los tirantes estén sujetos previamente a tensión y que estos sean indeformables. A tal fin, los tirantes han de estar dotados de tensores u otros mecanismos que permitan darles la tensión adecuada.

La disposición de cables de acero de alta resistencia, utilizados como tirantes, así como numerosas soluciones constructivas y accesorios para vincularlos a la membrana y a los puntos de anclaje, permiten construir modelos “tienda” ligeros, durables y de grandes luces.

Membrana. Desde la construcción, puede definirse como membrana aquel elemento superficial flexible, de espesor despreciable con respecto a su longitud y su anchura. Para que una membrana cumpla con su función arquitectónica y constructiva, es preciso que esté sometida a esfuerzos de tracción en dos direcciones ortogonales. Es igualmente necesario que la forma de la membrana sea la apropiada, cóncava, convexa o una combinación de ambas, para resistir las cargas gravitatorias y de viento.

Las dos fotografías siguientes muestran dos membranas en estado de servicio. En ellas, pueden apreciarse las tensiones a que están sometidas, gracias a las cuales no se producen arrugas en su superficie. También es significativo el contraste de colores entre ambas láminas. El color puede utilizarse en las láminas como elemento de integración y/o de contraste con el ambiente circundante.





La base de las membranas suele ser un tejido al que se le añaden acabados superficiales, por ambas caras, para mejorar sus propiedades de durabilidad, resistencia mecánica, pasividad al fuego e impermeabilidad; por ello, las edificaciones realizadas según el modelo “tienda” reciben la denominación de *arquitectura textil*.

En su desarrollo, han sido determinantes las aportaciones de la química orgánica, de modo que en la actualidad existen membranas capaces de resistir a la intemperie, sin alteraciones sustanciales, durante períodos de más de 30 años.

Estructuras presostáticas

Además de las estructuras tensadas clásicas, que derivan directamente de modelos “tienda” tradicionales, como las que se han detallado en los apartados precedentes, cabe añadir al modelo “tienda” las estructuras presostáticas de membrana única o de doble membrana, también conocidas con el nombre de *estructuras hinchables*.

Estructuras presostáticas de membrana única. En las estructuras presostáticas de membrana única, mediante una o más turbinas se genera, en el recinto interior de la membrana, una sobrepresión un 10 % superior a la presión atmosférica. En estas circunstancias, se producen esfuerzos tangenciales sobre la membrana de cierre que garantizan su estabilidad, incluso frente a situaciones de viento de hasta 100 km/h.

Las turbinas compensan las pérdidas de presión causadas por la permeabilidad de la membrana y por las pérdidas que necesariamente se producen por sobrepresión cuando se pretende acceder al interior. Para evitar pérdidas excesivas de presión que podrían llegar a afectar la forma de la estructura y, por tanto, su estabilidad, el acceso al interior de las estructuras presostáticas se efectúa mediante exclusas.

La foto inferior izquierda muestra una estructura hinchable hemisférica de 30 m de diámetro en fase de montaje. La foto de la derecha permite apreciar la esclusa de acceso..





Estructuras presostáticas de doble membrana. Con objeto de evitar tanto los efectos de la sobrepresión sobre las personas que están habitualmente en este tipo de recintos, como el engorro en los accesos que suponen las exclusas, se han desarrollado estructuras hinchables de doble membrana, en las que entre las dos membranas se ubica un colchón de aire con sobrepresión, que genera esfuerzos tangenciales sobre las membranas que ayudan a mantener la estabilidad y la forma de la estructura.

La foto inferior izquierda muestra una estructura hinchable de doble lámina. La foto de la derecha permite apreciar las turbinas que facilitan el hinchado inicial y el mantenimiento de la forma. El hinchable se mantiene en posición, en este caso, gracias al lastre obtenido tras llenar con agua las bolsas destinadas a contener el aire, hasta un nivel determinado. En otras situaciones, se recurre al anclaje directo al suelo o la utilización de bloques de hormigón como lastre.



Ambos modelos, el de lámina simple y el de lámina doble, por su facilidad de montaje y desmontaje se pueden utilizar, en determinados casos, de forma ventajosa frente a otras soluciones de características igualmente nómadas.

Del análisis de los modelos “tienda” anteriores se establece que el elemento básico del modelo “tienda” presostático es la membrana sometida a esfuerzos perpendiculares de tracción producidos por la presión del aire interior. Igualmente se requiere la existencia de mecanismos para la producción de sobrepresiones en el interior del recinto, o en el colchón de aire, en los modelos de doble membrana.

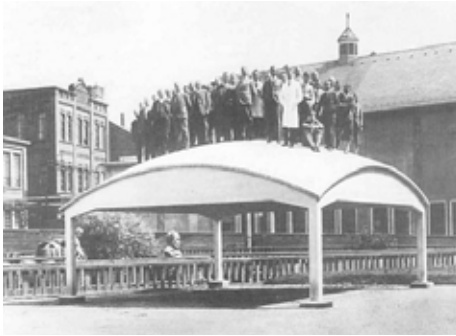
Lámina y membrana

No deben confundirse los conceptos de lámina y membrana. Este último ha sido expuesto en el apartado “Elementos del modelo ‘tienda’ tradicionales trasladados a la arquitectura textil”.

En las láminas, el grueso, aunque es relativamente delgado con respecto a la luz, no es despreciable. Su trabajo mecánico es fundamentalmente de compresión y, en menor grado, de flexión. La forma cóncava que adoptan las membranas es determinante en su rigidez.



La fotografía histórica de la izquierda corresponde a un ensayo sobre una lámina de hormigón en forma de casquete esférico, realizado por Franz Dischinger (1887-1953), materializando adecuadamente las condiciones de contorno para evitar tracciones parásitas. La de la derecha muestra una lámina de hormigón armado, formada por dos paraboloides hiperbólicos, en proceso de construcción.



Las láminas, también denominadas *cascarones* por su escaso espesor, pueden responder a curvaturas simples y dobles. A diferencia de las membranas, pueden construirse con materiales pétreos, cerámica u hormigón, aunque también con madera, madera laminada encolada y metales.

El control ambiental en el modelo “tienda”

Uno de los grandes déficits de las construcciones desarrolladas según el modelo “tienda” es la dificultad de establecer mecanismos para lograr controlar adecuadamente la calidad ambiental en su interior. Ello limita las posibilidades de integración del modelo “tienda” en determinados ámbitos urbanísticos y restringe su uso a situaciones de estacionalidad favorable. Los aspectos ambientales que se consideran en este estudio son los siguientes:

- Acondicionamiento térmico
- Control de la estanqueidad y de la humedad
- Transmisión acústica

Acondicionamiento térmico. El aislamiento térmico que ofrecen las membranas es muy bajo, debido a su bajo espesor. Por la misma razón, la inercia térmica de un modelo “tienda” es reducida, de modo que, en función de las condiciones exteriores, se calienta y se enfría con gran rapidez.

Las actuaciones más simples para mejorar el ambiente térmico interior, en situaciones cálidas, han de consistir en facilitar la circulación de aire por convección. Para ello, han de establecerse circuitos con entradas de aire fresco por la parte inferior de la construcción y salidas por la superior. Además, puede considerarse la posibilidad de humectar y bajar la temperatura del aire de entrada pulverizando agua.

En situaciones de bajas temperaturas, ha de restringirse la circulación de aire y aprovechar el efecto invernáculo mediante la permeabilidad de la membrana a los rayos solares. Igualmente, puede mejorarse el acondicionamiento térmico en ambientes fríos, aportando calor mediante quemadores. La baja inercia térmica aconseja limitar su uso exclusivamente a los períodos de utilización de los recintos.

Control de la estanqueidad y de la humedad. Una de las condiciones impuestas a las membranas es la de su estanqueidad. Únicamente es preciso intervenir para corregir problemas derivados de la estanqueidad si se produce algún desperfecto en la membrana.

En determinadas circunstancias, caracterizadas por las bajas temperaturas exteriores y por los niveles de confort en el interior y con presencia de un gran número de personas, se producen saltos térmicos significativos entre los valores de las temperaturas interior y exterior del recinto. El área crítica es la superficie fría de la membrana, pues sobre ella pueden producirse condensaciones y acabar “lloviendo” en su interior. Con independencia de ello, un ambiente excesivamente húmedo desvirtúa las condiciones de confort del local. Para evitarlo, es preciso establecer sistemas de ventilación que mantengan el porcentaje de humedad ambiental dentro de los parámetros de confort y evitar las condensaciones.

Control acústico. El aislamiento acústico del modelo “tienda” es muy bajo, debido a su escasa masa; en cambio, en el interior de la membrana, la transmisión del sonido es correcta. En ámbitos de gran tamaño, con objeto de mejorarla, pueden emplearse equipos de amplificación del sonido.

La arquitectura textil

El modelo “tienda” ha acabado desembocando en la creación de un nuevo concepto, la llamada “arquitectura textil”, caracterizada por la presencia de telas y membranas, desarrolladas en los últimos años por la industria de la química orgánica. Dichas telas tienen garantizada una duración a la intemperie superior a los treinta años, en algunos casos.

Los inicios de la arquitectura textil, tal como es conocida en la actualidad, se producen en los años sesenta en Europa, de la mano de Frei Paul Otto (1925); a finales de dicha década en Japón, y a principios de los setenta en Estados Unidos.

En la arquitectura textil confluyen, además de las membranas, una serie de factores y de recursos técnicos que la han hecho posible:

- Programas de ordenador, vinculados a mesas de corte, que permiten realizar con gran precisión las piezas necesarias para lograr las formas proyectadas, así como la maquinaria específica para manipular y unir las telas, preferentemente mediante termosoldadura.



- Materiales y soluciones técnicas “de repertorio” para enlazar telas y cables, en especial en aquellos puntos en que se producen elevadas concentraciones de tensiones.
- Combinación de cables con elementos rígidos de soporte, como mástiles, pórticos, arcos u otras estructuras.
- Técnicas fiables para el anclaje de las construcciones textiles al suelo, a la madera o al hormigón, tanto para las de tipo provisional como para las permanentes.

Debido a sus prestaciones, la arquitectura textil tiene unos campos de aplicación limitados, en los que puede competir por razones de precio, ligereza, durabilidad, sostenibilidad, facilidad de montaje y desmontaje, calidad ambiental y formal con otras alternativas constructivas.

En el capítulo 6 “Tubos, cables y membranas. Construcción y creatividad”, apartados “El concepto estructural de las ruedas de bicicleta aplicadas a la arquitectura” y “Otras tipologías constructivas con tubos, cables y membranas”; se exponen algunos ejemplos en que se muestran las posibilidades resultantes de la combinación de estos tres elementos.

1.3.4. Las otras formas de construir

Todo planteamiento radical de construir ofrece unos resultados distorsionados con respecto a los que aportan las construcciones generadas bajo premisas más convencionales; sin embargo, no por ello se pueden ni se deben obviar sus aspectos de interés y sus valores.

Una visión amplia e integradora ha de saber analizar y traspasar, de forma ventajosa y oportuna, conceptos, criterios, técnicas y materiales a otras situaciones y circunstancias constructivas, posiblemente muy alejadas de los planteamientos generadores iniciales.

Habitualmente, “las otras formas de construir” son tratadas, en la bibliografía técnica, de forma monográfica desde unos planteamientos poco objetivos, orientados preferentemente a mostrar de forma poco crítica solo las bondades del sistema en cuestión, con el propósito de crear nuevos adeptos.

En este apartado, se analizan varios conceptos relativos a otras formas de construir, algunos de cuyos valores tienen o pueden tener aplicación en la construcción tecnológica.

- Las construcciones “*low-tech*”
- Las construcciones vernáculas o tradicionales
- La bioconstrucción



- La construcción bioclimática o “construir con el clima”
- La construcción efímera
- La construcción con materiales reciclados

Las construcciones “low-tech”

La construcción “low-tech”, contrapuesta a la “high-tech”, engloba todas aquellas construcciones realizadas con materiales naturales en estado primario o con unas transformaciones mínimas. Tal es el caso de la madera, las cañas, las fibras vegetales o la tierra, materias primas utilizadas para realizar construcciones simples pero eficientes, dentro de su ámbito de utilización, y con un bajo impacto ambiental.

En ellas, se recoge la experiencia ancestral, obtenida por la evolución de las técnicas constructivas y de los modelos hasta conseguir las máximas posibilidades de los materiales disponibles, tanto desde el punto de vista estructural como estético.

No cabe duda de que en la construcción “low-tech” se encuentra, en buena parte, la base de la construcción actual “high-tech”, tan alejada de ella en apariencia. Para demostrarlo, es basta con observar la variedad de formas y el valor estético de algunos de sus modelos, así como su eficiencia estructural.

Su sencilla complejidad no ha podido ser incorporada a las construcciones realizadas con materiales convencionales hasta muy recientemente. Para emularlos, ha sido preciso despertar sensibilidades y lograr el desarrollo científico y la capa-





cidad tecnológica. Tal es el caso de formas propias de la construcción “*low-tech*” como los conoides o los paraboloides hiperbólicos.

Si las construcciones “*low-tech*” han sobrevivido hasta nuestros días, ello no es debido tanto a su difusión, en los ámbitos académicos y profesionales, como a que todavía en muchos lugares siguen siendo la mejor opción, cuando no la única.

Las cuatro fotografías anteriores muestran, de izquierda a derecha y de arriba abajo, el amplio abanico de posibilidades que engloba la “*low-tech*”: una cubierta de paja; una estructura para cubierta, realizada con cañas de bambú (conocido también como *guadua* en América Latina); una casa realizada con tierra, y un cobertizo, en fase de construcción, cuyas paredes están formadas por balas de paja.

Las construcciones vernáculas o tradicionales

El análisis objetivo de las construcciones vernáculas o tradicionales, cualesquiera que sean su situación geográfica, emplazamiento, morfología o tamaño, presenta una serie de características comunes que merecen ser tenidas en consideración como requerimientos básicos para las nuevas construcciones que vayan a incorporarse en la misma zona:

- La adaptación al clima, con el porcentaje de huecos en las fachadas; la incorporación de barreras y filtros en las ventanas; la organización de las cubiertas y sus aleros; los colores de los paramentos; la orientación y las ventilaciones cruzadas como mecanismos principales de control.
- El uso de unos modelos constructivos y formales, depurados por una experiencia ancestral, caracterizados por su durabilidad y facilidad de mantenimiento.
- La fidelidad a dichos modelos, que favorece su integración en el paisaje y su uniformidad.
- La utilización exclusiva de los materiales de la zona.
- La racionalidad constructiva y la economía de medios, que se traduce en construcciones con bajo impacto ambiental.

Como aspectos negativos de dichas construcciones, que han de corregirse mediante aportaciones técnicas externas, se encuentran:

- Las limitaciones de confort, como consecuencia de los rigores climáticos y las restricciones de los materiales disponibles en la zona, así como los escasos requerimientos planteados inicialmente, en este sentido, para las soluciones constructivas.

- El déficit e incluso la carencia de algunas instalaciones básicas.
- Los déficits prestacionales de los materiales para poder ofrecer luces más amplias o muros más esbeltos.
- La necesidad de un mantenimiento frecuente de cubiertas y fachadas.



Las fotografías anteriores permiten apreciar, entre otros aspectos, que la cubierta continua del caserío vasco se adapta mejor al clima lluvioso que la cubierta fragmentada de la masía. La cubierta de la masía, con faldones a distinto nivel, facilita la disposición de ventanas en las fachadas laterales de la planta superior.

La comparación de una casa ibicenca con un cortijo andaluz (v. fotografías siguientes), ambos situados en zonas con veranos muy cálidos, permite deducir la diferencia de pluviometría entre ellas en las restantes estaciones.



Como último ejemplo, las solanas continuas constituyen una forma de paliar el clima húmedo y poco soleado de A Coruña; en cambio, la potente luz mediterránea precisa ser matizada con un porcentaje menor de huecos, como puede apreciarse en este edificio del Ensanche de Barcelona.



La bioconstrucción

La bioconstrucción se fundamenta, en buena medida, en los principios propios de las construcciones tradicionales, complementados con un mayor rigor científico en determinados aspectos:

- Orientación obtenida con la ayuda de la geobiología para evitar fuentes de contaminación. A partir de ella se establecen la orientación y la distribución de los distintos espacios que configuran la vivienda.
- Diseño personalizado para obtener niveles de confort elevados.
- Elección de materiales biocompatibles e higroscópicos, considerando su salubridad. Se evitan los plásticos, en especial en los aislamientos térmicos, y el hormigón armado, y se potencia el uso de la cal y de la madera en estado natural.
- Optimización de los recursos climáticos. La generación de ventilaciones cruzadas, regulando o matizando las entradas de luz solar, disponiendo aislamientos térmicos o el aprovechamiento del agua de lluvia son algunos de los mecanismos empleados en bioconstrucción.
- Implantación de sistemas y equipos que faciliten el ahorro energético y que produzcan energías limpias y renovables. Las placas solares, las placas fotovoltaicas o las calderas de biomasa constituyen algunos de los ejemplos más representativos de producción energética.
- Recuperación de residuos y depuración de vertidos. Habitualmente, se habilitan recipientes para el compostaje de la materia orgánica; se separan las aguas negras de las grises, y se someten a depuración.

Ello da como resultado unos edificios confortables, dotados de las instalaciones más avanzadas y que estéticamente no tienen por qué diferir sustantivamente de los convencionales. Algunas de las técnicas constructivas expuestas a propósito de la “*low-tech*” pueden integrarse plenamente en la bioconstrucción.



Las dos fotografías anteriores muestran dos viviendas unifamiliares, con estilos y aspectos muy distintos, construidas ambas según los principios de la bioconstrucción, aunque, en apariencia, apenas se distinguen de otras en que no se han considerado estos aspectos.

La bioconstrucción se basa, en buena medida, en una implantación correcta del edificio, en la utilización de materiales saludables y en la reducción del impacto ambiental, tanto durante la construcción como a lo largo de la vida útil del edificio.

Como contrapartida, la bioconstrucción “pura” queda limitada al ámbito de la vivienda unifamiliar aislada, toda vez que, en la mayoría de las ocasiones, la orientación y los gálibos de las restantes tipologías edificatorias vienen impuestos.

Otro aspecto que frena el desarrollo de la bioconstrucción es la utilización de determinados materiales, poco comunes en la construcción convencional. Ello supone que, mayoritariamente, estos no están avalados por certificaciones emitidas por laboratorios oficiales. Su utilización supone correr riesgos con respecto a la bondad de su comportamiento. Los agentes directamente responsables de la construcción difícilmente los asumirán en trabajos para terceros.

Por último, el control y el mantenimiento de algunas de las instalaciones vinculadas a la bioconstrucción requieren conocimientos y dedicación para que los resultados resulten plenamente satisfactorios. Tal es el caso, por ejemplo, de los sistemas de depuración de aguas para piscinas, vinculados a microecosistemas.

La construcción bioclimática o “construir con el clima”

La construcción bioclimática se fundamenta en el diseño de los edificios con objeto de actuar sobre las circulaciones de aire por convección como factor relevante en el confort interior; en el empleo de recursos para producir y almacenar y ceder calor con base en el efecto invernadero y las masas térmicas, y en la utilización de materiales naturales de bajo impacto ambiental.

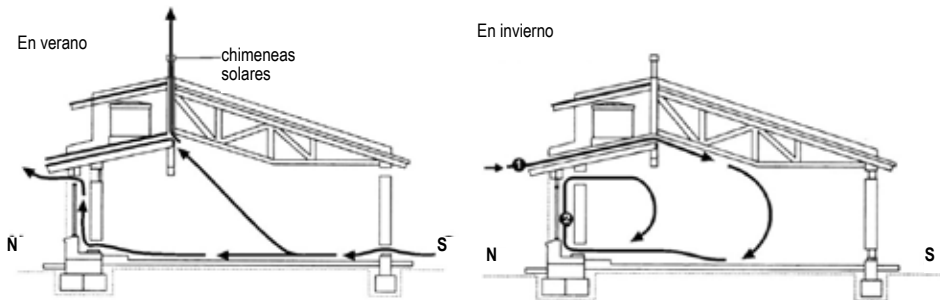
En la construcción bioclimática, también pueden integrarse aportaciones procedentes de la energía geotérmica.



El propósito de la construcción bioclimática “pura” es evitar, mediante el conocimiento y el control del clima local, tener que utilizar aparatos de aire acondicionado en verano y de calefacción en invierno. Alcanzar estos objetivos, en determinados climas, puede llegar a penalizar sustantivamente el diseño. Cualquier planteamiento “racional” debería analizar, a fondo, tanto el funcionamiento real de los mecanismos naturales de control climático como el período de retorno de las inversiones necesarias para su establecimiento y mantenimiento, frente a las soluciones convencionales.

El aprovechamiento y la reflexión de la energía solar son determinantes en los planteamientos constructivos y de diseño. Con este propósito, se establecen ventilaciones cruzadas, chimeneas, ventanales, claraboyas..., así como mecanismos para su regulación y control. Los principios descritos tienen incidencia directa en la elección de los materiales, las técnicas constructivas y la calidad y el espesor de los aislamientos térmicos.

Los dos gráficos siguientes muestran los circuitos de ventilación natural que se establecen en una construcción bioclimática con objeto de mantener el confort ambiental durante todo el año.



Los principios que rigen la construcción bioclimática son, en esencia, los siguientes:

- Controlar la recepción de la radiación solar, favoreciéndola, atenuándola o impidiéndola.
- Dirigir su energía hacia aquellos sectores del edificio más necesitados de ella.
- Ponderar los intercambios de temperaturas entre el interior y el exterior, con objeto de obtener una situación de confort en el interior del edificio.

La fotografía siguiente muestra un modelo de vivienda construida bajo principios bioclimáticos, en que la gran superficie acristalada cerrada proporciona calor en invierno, mediante el efecto invernadero. En verano, es preciso favorecer la circulación de aire, abriendo cristales para evitar el sobrecalentamiento. La

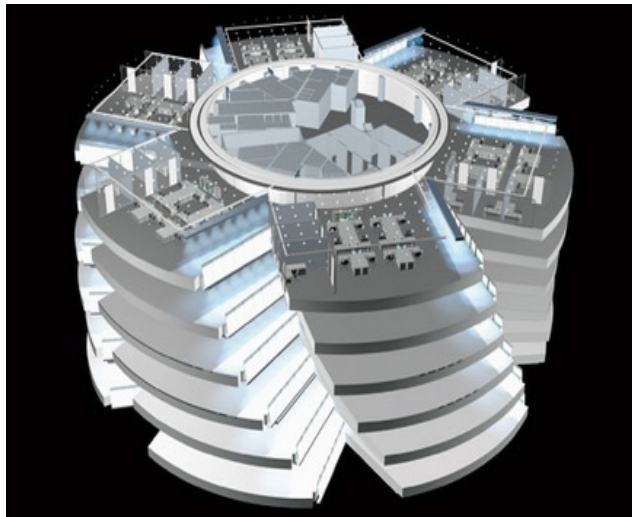


operación se podría completar incorporando elementos reflectantes del sol y generando sombras ventiladas, como es el caso de los *brise-soleils* (v. fotografía adjunta).



El Gherkin de Londres (v. fotografía inferior), diseñado por Foster y Asociados, ganó el prestigioso Premio Stirling (RIBA) de arquitectura en 2004, entre otras razones porque su diseño incorporaba algunos principios bioclimáticos que reducían sustantivamente, con respecto a los estándares habituales hasta entonces, el consumo energético necesario para mantener el confort en el interior del edificio a lo largo del año.

Por razones de seguridad contra incendios, el edificio está sectorizado. Como puede observarse en el gráfico inferior, cada sector dispone de seis atrios. Cada planta gira 5° con respecto a la precedente. A través de ventanas practicables, accionadas mecánicamente, los atrios pueden recibir aire del exterior, de forma regulada, en función de las situaciones climáticas exteriores e interiores, lo cual reduce el consumo energético en calefacción y en aire acondicionado.





En la actualidad, los edificios más significativos incluyen, entre las premisas de diseño definidas en su plan maestro, el ahorro energético para lograr la calidad ambiental en su interior. Por su función subsidiaria como laboratorios de edificación, los logros alcanzados en dichos diseños serán aplicados en breve a las edificaciones convencionales, y así surgirán nuevos estándares.

En determinados climas, la construcción bioclimática, planteada de forma "extrema", puede dar lugar a aberraciones edificatorias y constructivas. Con todo, no es menos cierto que el conocimiento y la utilización racional de sus principios puede contribuir a sustanciales ahorros energéticos, con respecto a los estándares habituales, para garantizar el confort de un edificio determinado.

La gran aportación de la construcción bioclimática es haber incorporado un nuevo requerimiento a los diseños edificatorios de vanguardia: el ahorro energético pasivo. La integración de sus principios reduce sustancialmente (del orden del 30 %) el consumo con respecto al de los edificios convencionales.

La aplicación inexcusable de los principios bioclimáticos en el diseño de los edificios marca un antes y un después en las formas de concebirlos y construir y, a igualdad de circunstancias, penaliza la valoración de aquellos en que se aplican poco o, simplemente, no se aplican.

Las construcciones efímeras. Son aquellas que se plantean para dar respuesta a una utilización limitada en el tiempo. Sus antecedentes históricos se sitúan en época romana, aunque seguramente son anteriores.

Los arcos de triunfo romanos se construyeron, inicialmente, para el acto de celebración de un evento guerrero afortunado, después del cual, perdida su función, eran desmantelados. El modelo hizo fortuna y acabó convirtiéndose en permanente, y en la actualidad existen numerosos ejemplos, incluso de construcción relativamente reciente, como el Arco de Triunfo de París (v. foto inferior izquierda).

Durante el Renacimiento y, en especial, durante el Barroco, era usual crear, con motivo de la celebración de determinados festejos, escenografías y decorados, contruidos en gran parte como una tramoya, los cuales eran desmontados después del acto. En ocasiones, los edificios representativos eran utilizados para





sustentar dichas decoraciones efímeras. La fotografía anterior muestra un grado de la época que representa la Real Iglesia de Santiago y San Ildefonso de los Españoles, situada en la Piazza Navona de Roma, mostrando las decoraciones efímeras ejecutadas con motivo de los funerales romanos de Felipe V.

En la actualidad, para dar respuesta a las necesidades de una sociedad cada vez más diversificada y dinámica, las construcciones efímeras tienen una amplia demanda. A título de ejemplo, escenarios para festivales y giras artísticas, stands y pabellones para ferias y exposiciones, o edificios de fácil transporte y para atender situaciones de emergencia son algunos de los ejemplos más significativos. Otro campo de la construcción efímera es el experimental, en que se utilizan materiales de bajo coste relativo para materializar nuevas propuestas formales.

La importancia de las construcciones efímeras es tal que su diseño se ha convertido en una especialidad dentro de la arquitectura. En la concepción de las arquitecturas efímeras, predominan, sobre los parámetros de durabilidad y coste, los relativos al impacto visual, la ligereza y la facilidad de transporte y montaje.

Las fotografías inferiores muestran dos tipos de construcción efímera con planteamientos bien distantes. El stand de la fotografía de la izquierda se ha diseñado para estar a cubierto y dar respuesta a las necesidades de los pocos días que dura una feria comercial. Los módulos de la fotografía de la derecha son reutilizables y aptos para soportar las inclemencias del tiempo durante un período de uso de varios años.



Dentro de las arquitecturas efímeras actuales, cabe destacar las de los escenarios desmontables para conciertos multitudinarios que se ofrecen durante las giras por diferentes ciudades de un país o de un continente. La fotografía inferior izquierda que encabeza la página siguiente corresponde a uno convencional, formado por pórticos desmontables de estructura metálica en celosía. La fotografía de la derecha muestra el que el grupo U2 montó en junio de 2009, para su actuación en el Camp Nou de Barcelona, en forma de nave espacial y con una estructura arácnida de cuatro patas y una altura total de casi 50 m.



1.3.5. Algunas formas curiosas de construir

Este apartado no es ni pretende ser exhaustivo. Es tan solo un simple testimonio de la multitud de objetivos y posibilidades que se derivan de la aplicación imaginativa de materiales, modelos y técnicas constructivas distintos de los comúnmente utilizados y aceptados en la construcción convencional.

Este apartado no hace referencia, por ejemplo, al reciclaje por trituración de materiales de construcción procedentes de demoliciones. Los áridos así obtenidos pueden aplicarse para la confección hormigones, para la realización de pavimentos o como materia prima en la elaboración de nuevos productos.

Las razones por las cuales se plantean otras formas de construir se explican, habitualmente, por la conjunción de determinadas situaciones, en algunos casos límite, y por la inquietud de determinados profesionales para reducir costes, impactos ambientales y los residuos derivados de la construcción.

Los resultados obtenidos desde ópticas “puras” como las descritas, en cuanto a la dualidad de requerimientos y prestaciones, distan poco de la anécdota, en la mayoría de las ocasiones. La objeción mayor a tales formas de construir es su falta de rigor normativo y de ensayos capaces de garantizar aspectos relativos a la durabilidad y la seguridad de las obras realizadas siguiendo este tipo de técnicas constructivas.

Es preciso considerar tales experimentos con mentalidad abierta. Muchos de los principios y de las ideas que sostienen estas “otras formas de construir” merecen ser tenidos en consideración y pueden aplicarse en las construcciones convencionales por su capacidad de mejora de las mismas.

Han de valorarse positivamente aquellos aspectos orientados a la obtención de reducciones de tiempos y de costes sin merma de la calidad. Tal es el caso, por ejemplo, de la utilización de aislamientos térmicos obtenidos del reciclaje de papel de periódico, la aplicación directa de materiales poco transformados o la recuperación de morteros de cal para determinados revestimientos.



Los principios sustentadores de estas “otras formas de construir” se basan, en la mayoría de las ocasiones, en el reciclaje directo de elementos residuales y en la utilización de materiales reciclados procedentes de desechos que, de otro modo, irían a parar a un vertedero o a una planta incineradora.

Dentro de la primera línea –reciclaje directo de elementos residuales generados por el consumo–, las fotografías siguientes muestran construcciones realizadas con latas de refrescos, con botellas de plástico diseñadas para contener bebidas gaseosas, con botellas de vidrio y con neumáticos.

Como no podía ser de otro modo, la base tecnológica de este tipo de construcciones es muy simple. Consiste en crear fábricas, con sus aparejos correspondientes, sustituyendo los ladrillos o cualquier otro material propio de las fábricas usuales por las piezas indicadas. La presencia de mortero elaborado con cal o pórtland es indispensable.

En el caso de las latas, es más determinante su geometría circular como encofrado, al permitir generar muros de mortero aligerado, que su capacidad resistente o su durabilidad, si están expuestas a la intemperie sin protección.



Las botellas de cristal (v. fotografías inferiores) ofrecen mejores prestaciones de resistencia y de durabilidad que las latas; sin embargo, su utilización directa en la construcción solo puede plantearse ante la imposibilidad del reciclaje, o cuando no se dispone de una alternativa mejor, puesto que su coste de producción inicial es superior al de un ladrillo o al de un bloque de hormigón de volumen equivalente.



La segunda vía –la del reciclaje primario de desechos (con escasas transformaciones)– ofrece un amplio espectro de posibilidades, entre ellas la utilización de neumáticos usados, triturados o no, y el papel de periódico en forma de pulpa, aglomerado con cal o cemento de Pórtland:

La utilización de neumáticos triturados tiene una larga trayectoria como árido para hormigón o, una vez pulverizados, como aditivo incorporado a los asfaltos para carreteras.

Como puede apreciarse en la foto inferior izquierda, los neumáticos desechados constituyen un problema que puede paliarse con su reciclaje en el ámbito de la construcción. Solamente en España se consumen unas 300.000 toneladas de neumáticos al año, la mayor parte de los cuales van al vertedero.





El triturado no excluye el empleo directo de neumáticos rellenos de tierra para la formación de muros de carga o de contención, tal como se muestra en las fotografías siguientes.



Las fotografías inferiores muestran el empleo de papel de periódico reciclado, en forma de pulpa, combinado con agua y un aglomerante, cal o cemento de Pórtland. La primera de la izquierda muestra la formación de la masa. Con esta masa, al fraguar el aglomerante, se consiguen unos bloques ligeros, denominados *papercrete*, que pueden utilizarse como material de construcción.

Los bloques resultantes, como puede apreciarse en la foto inferior izquierda son ligeros pero suficientemente rígidos para construir arcos, los cuales, a su vez, pueden soportar un casquete esférico de unos 6 m de luz (foto inferior central).

El termo prensado primario de residuos plásticos para formar bloques es otra de las múltiples posibilidades de generar un material de construcción a partir de materiales de desecho sometidos a un reciclaje primario, como se muestra en la fotografía inferior derecha.





Las premisas de tales formas de proceder son construir de forma más eficiente y con menor impacto ambiental. Resulta igualmente evidente que la construcción no puede plantearse exclusivamente como el ramo receptor y aplicador de productos elaborados con materiales reciclados procedentes de residuos de actividades industriales.

Un planteamiento racional de la utilización de los materiales reciclados ha de orientarse hacia el autoreciclado de cada uno de los ramos de la producción. Es preciso tender hacia el residuo cero. En este sentido, la industria del automóvil, con productos con ciclos de vida sensiblemente inferiores a los de la edificación, marca la pauta a seguir por su alto grado de reciclaje, que no ha dejado de crecer en los últimos años.

1.3.6. Los modelos avalados por la evolución, la difusión técnica y la práctica profesional

La larga tradición e historia de las construcciones arquitectónicas han permitido su progresiva depuración hacia modelos funcionales, destinados a los usos más diversos y al desarrollo de su soporte tecnológico y técnico. Sin embargo, a pesar de su gran diversidad temática, los usos para los cuales se construye son fundamentalmente tres: residenciales, industriales y terciarios.

Los mal llamados “usos defensivos de la construcción” –la poliorcética, a la cual tanta imaginación, esfuerzos y recursos se han dedicado a lo largo de la historia– no se tratan en este estudio.

El propósito por el que se construye, desde la arquitectura, es el mismo para los tres usos comunes: ofrecer a las personas que utilicen un determinado edificio unas condiciones de uso seguras, eficientes y durables.

En la actualidad, el proyectista dispone, tanto en papel como en soporte digital, de un amplio repertorio de modelos funcionales. Además, el marco técnico y normativo, siempre en perfeccionamiento y evolución constantes, acota y configura los principios tecnológicos y las bases técnicas sobre las cuales asentar el proyecto.

A partir de la concepción espacial del edificio, la metodología habitual de trabajo de los proyectistas actúa sobre la dualidad que establecen los requerimientos normativos y su relación con las prestaciones que ofrecen determinados materiales para cumplirlas. De entre ellos, es preciso saber escoger el óptimo, en función de diversos parámetros ponderados.

A título de ejemplo para analizar la conveniencia de un determinado material frente a otros, suelen considerarse, como más comunes, los parámetros de durabilidad, facilidad de mantenimiento, disponibilidad, gama de colores, coste inicial y coste de mantenimiento. El propósito final no es otro que construir un edificio bien resuelto en su globalidad y en que todos los elementos cumplan su función de forma armónica y satisfactoria.

Según lo expuesto en los procesos de análisis propios de la construcción tecnológica, realizados sobre un determinado edificio o construcción, es preciso distinguir entre la concepción espacial y las soluciones tecnológicas y técnicas que le dan soporte.

Un edificio correctamente estructurado espacial y funcionalmente puede verse afectado negativamente por la elección de unas tecnologías inapropiadas para materializarlo. E incluso siendo acertada la elección de la tecnología, su ejecución, es decir los recursos humanos y técnicos para llevarlo a cabo, pueden no estar a la altura de las circunstancias.

Los modelos constructivos mejor resueltos, dentro de su categoría, son aquellos que se han construido y depurado de forma más reiterada y abundante en un período dilatado de tiempo; tal es el caso de los edificios residenciales, en todas sus variantes.

Resulta de especial interés la evolución constructiva y formal de los edificios de vivienda plurifamiliar entre medianeras en nuestro país. Constituyen una alternativa local, basada en la tradición constructiva y el desarrollo de la albañilería y sus oficios vinculados, frente a los modelos residenciales derivados del movimiento racionalista, los bloques lineales y las torres.

A continuación, se efectúan unos breves comentarios sobre la construcción de edificios de viviendas plurifamiliares entre medianeras. Su propósito es dejar constancia de la evolución de este modelo “cueva” en el ámbito geográfico de Catalunya y, en particular, en el Ensanche de Barcelona.

Por último, indicamos que los modelos racionalistas, por su interés histórico, social y constructivo, así como por su proyección futura, son tratados en el capítulo 5; Diseño y construcción de la vivienda colectiva.

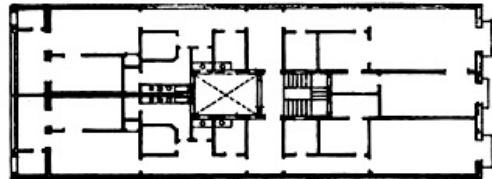
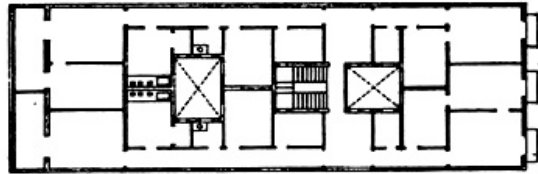
1.3.7. La evolución espacial y constructiva de las viviendas plurifamiliares entre medianeras

La vivienda plurifamiliar se impuso, a partir del siglo XIX, por cuestiones de economía, funcionalidad y disponibilidad de una tecnología constructiva adecuada para abordarla, a la vivienda unifamiliar en las grandes ciudades, lo cual generó unos modelos constructivos de gran interés.

Los ensanches decimonónicos, junto con el desarrollo de la albañilería propiciada por la producción industrial de ladrillos, constituyeron el caldo de cultivo de un nuevo tipo de edificio urbano: la casa de renta.

Numerosos son los estudios dedicados a este tipo de edificios, entre ellos la tesis doctoral “La casa de veïns del segle XIX a Barcelona”, de Pere Giol Draper (enero de 1995), y el libro *Secrets d'un sistema constructiu*, de Antoni Paricio Casademunt (UPC, 2002).

El prototipo de la casa de renta respondía a una fachada de entre 10 y 15 m de anchura (v. fotografía inferior izquierda) y una profundidad edificable comprendida entre 18 y 25 m, de dos a cuatro viviendas por rellano, con planta baja diáfana para uso comercial o industrial, piso principal (donde se situaba la vivienda del propietario) y cuatro plantas piso, destinadas habitualmente al alquiler. Una escalera sin ascensor, construida con bóveda tabicada, también llamada “a la catalana”, daba servicio a las viviendas. Los gráficos de la zona inferior derecha muestran dos plantas representativas de tales edificios.



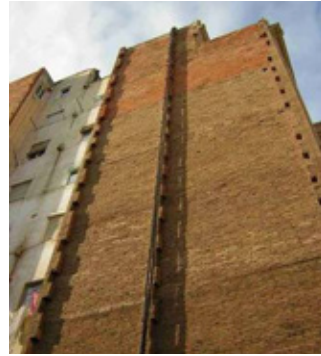
La cimentación estaba constituida por zapatas corridas. Cabe destacar que el primer propietario que construía efectuaba, en la zona de las medianeras, el cimiento propio y el del vecino, y edificaba una pared de 30 cm hasta la primera planta, disponiendo 15 cm a cada lado de la medianera. Igualmente, en las paredes medianeras y a toda altura, se construían, a tramos regulares de entre 2,5 y 3 m, machones con enjarjes, con un espesor de 30 cm.

Mientras el vecino no realizaba su edificio, por la cara exterior de los machones se construía un tabique ventilado, llamado *tabique pluvial*, cuya misión era evitar que penetrara agua a través de los muros medianeros desprotegidos.

Cuando el propietario de la finca vecina edificaba, pagaba al convecino o a los convecinos el llamado *carregament*, correspondiente a la parte proporcional de cimentación y muro medianero que estos habían abonado al construir en primer lugar. Por su parte, el propietario que edificaba en segundo lugar tenía el derecho de demoler el tabique pluvial hasta la altura que alcanzara su edificación.

La fotografía izquierda de la página siguiente muestra una medianera al descubierto, protegida mediante un tabique pluvial, en que pueden observarse huecos de ventilación para garantizar el rápido secado de los paramentos.

La edificación de la fotografía derecha carece de tabique pluvial, lo que permite apreciar los enjarjes de la fábrica para garantizar el enlace correcto entre el muro medianero y el tabique pluvial.



Los usos y costumbres indicados en el párrafo anterior son muy anteriores a la realización de los edificios residenciales propios del Ensanche de Barcelona. Corresponden a las *Ordinacions d'en Sanctacilia*, redactadas por este jurista posiblemente en el siglo xiv, a partir de textos del rey Jaume II (1267-1327). Son también denominadas *Consuetuts de la ciutat de Barcelona sobre les servituts de las casas e honor*. Se trata de un conjunto de setenta preceptos sobre servidumbres entre fincas urbanas y rústicas, y de policía sobre dichos temas, que se aplicaron en la ciudad de Barcelona.

La estructura de estos edificios, denominados “casas de renta” porque las viviendas de las plantas superiores se destinaban al alquiler, estaba formada por muros de carga de fábrica de ladrillo de 15 cm de espesor en las medianeras y los interiores y de 30 cm en las fachadas.

Los forjados se constituían mediante vigas de madera y revoltones, que paulatinamente fueron sustituidos, desde mediados de siglo xix, por vigas metálicas de ala estrecha.

Las crujías se disponían cruzadas: la primera, perpendicular a la fachada y, las centrales, paralelas. De este modo, se arriostraba el conjunto ortogonalmente.

La cubierta era plana y accesible. Se trataba de una azotea formada por un tablero cerámico de tres gruesos de rasilla, asentado sobre tabiques conejeros y exento perimetralmente para permitir las dilataciones. El encuentro entre el tablero de la azotea y los muros perimetrales se resolvía mediante un mimbel.

La ventilación interior se efectuaba mediante patios situados en posición central formando cuerpo con la escalera, o en las medianeras. La falta de ventilaciones eficientes en las cocinas provocaba que los olores derivados de estas fueran perceptibles en la escalera. En el “debe” del modelo, hay que situar el aislamiento térmico de las fachadas, los patios y la cubierta.

Con la adición de un ascensor, el modelo perduró, con pocas variantes –como la incorporación de viguetas de hormigón o metálicas en los forjados–, hasta los años cincuenta del siglo xx.



A partir de estas fechas, a causa de la política proteccionista de la vivienda impuesta por el régimen franquista, la llamada *casa de renta* dejó de ser rentable, debido a la congelación de los alquileres y los derechos adquiridos por los inquilinos conforme a la nueva ley.

Las condiciones descritas propiciaron un cambio de modelo de propiedad. La propiedad vertical dio paso a la horizontal. Desde entonces, la mayoría de las viviendas de los edificios residenciales que se construyen se destinan a la venta individualizada. Por ello, todas las plantas se realizan con el mismo nivel de acabados.

En los años cincuenta, también irrumpen los pórticos de hormigón armado, que liberan las distribuciones de la rigidez y las reducidas luces impuestas por los muros de carga. El ladrillo empieza a perder su función estructural para convertirse en cerramiento.

A finales de los sesenta, empieza a imponerse la necesidad tipológica de construir bajo rasante para acomodar los automóviles que no caben en las calles. Ello es posible gracias a la aparición, en los años cincuenta, de máquinas pantalladoras, equipadas con cucharas bivalvas.

El modelo constructivo resultante ve incrementada su sección en una o más plantas bajo rasante. También es preciso aumentar la longitud de la fachada a un mínimo de 12 m para permitir el giro de los vehículos, y prever el acceso al bajo rasante mediante una rampa de pendiente inferior al 20 %. Para disponer de un espacio razonable de aparcamiento, se recurre, en ocasiones, a desarrollar un subterráneo común a dos o más edificios de vivienda plurifamiliar.

Durante los años sesenta, desaparecen también los pórticos convencionales de hormigón, que son sustituidos por jácenas planas y forjados unidireccionales de hormigón pretensado. Posteriormente, a la vista de los problemas ocasionados por la aparición de flechas diferidas, son relevados, a principios de los setenta, por forjados reticulares realizados con casetones de hormigón.

Cabe concluir que, entre los años sesenta y setenta, los muros de carga desaparecen al requerirse mayores luces en los sótanos y en las plantas bajas, características que difícilmente podían conseguirse con las prestaciones propias de los muros de carga.

A partir de los años setenta, el modelo de edificio de vivienda plurifamiliar entre medianeras, considerado en planta y sección, ha evolucionado poco hasta el presente. Los cambios más sustantivos provienen del marco normativo, orientado a mejorar la seguridad y la fiabilidad estructural, las condiciones de confort y la mejora y la ampliación de las instalaciones.

En las últimas etapas, se han producido adaptaciones con el fin de reducir las superficies y el número de habitaciones y dar respuesta al creciente número de familias monoparentales.



Cabe concluir que el modelo de edificio de vivienda plurifamiliar entre medianeras, iniciado en fábrica de ladrillo y continuado con estructura de hormigón armado y cerramientos cerámicos, necesita reinventarse sin demora si quiere seguir funcionando.

En la actualidad, se trabaja en la reducción de los impactos ambientales de la industria de la construcción. En este sentido, en el próximo futuro serán determinantes, para dar respuesta a los nuevos requerimientos, sin menoscabo de las prestaciones, las estructuras semiprefabricadas, los cerramientos fácilmente montables y desmontables, así como plantear, desde el proyecto, la deconstrucción del edificio al final de su vida útil.

Deberán justificarse numéricamente los impactos ambientales mediante estudios basados en el ciclo de vida de los materiales. Posiblemente, en función de su impacto ambiental, habrá que procurar evitar construir bajo rasante en áreas de nueva implantación.

El hecho de que un determinado tipo de construcción pueda hacerse y pagarse no supone, necesariamente, que esta sea la mejor opción, desde el punto de vista económico y ambiental. Por tanto, es necesario reflexionar sobre ello y evitar, desde el planeamiento, las inercias que llevan a aplicar determinadas tipologías edificatorias; si es preciso, habrá que adaptarlas o crear otras nuevas.

El hecho de disponer de capacidad tecnológica, recursos energéticos y dinero suficientes para efectuar el abatimiento de un nivel freático en un frente marítimo o junto a un río caudaloso no supone que deba hacerse necesariamente, "porque no hay alternativa", "porque está establecido así" o "porque el coste del suelo no lo permite".

Es evidente que existen alternativas y, si son razonables desde el punto de vista económico y ambiental, han de aplicarse, por ejemplo, construyendo sobre rasante edificios de aparcamiento para dar servicio al entorno próximo o incrementando en una o dos alturas los edificios para albergar los aparcamientos sobre rasante necesarios con el fin de garantizar un tráfico fluido en las calles y una buena accesibilidad.

→ 2



Las herramientas para el análisis constructivo del proceso de diseño de los proyectos arquitectónicos: Auditorías de proyecto y planes maestros

2.1. Introducción

El propósito de este capítulo es exponer el desarrollo de las herramientas propias del análisis constructivo y su integración en el proceso de diseño de un proyecto arquitectónico. Estas herramientas son las auditorías de proyecto y los planes maestros. Su conocimiento y el manejo de los recursos técnicos que comportan pueden aplicarse también a procesos de valoración y análisis de edificios construidos.

Se trata de herramientas de amplio espectro que requieren de los profesionales, por un lado, especialización y, por el otro, capacidad de trabajo en equipo.

Tratar de abordar en solitario cualquiera de estas dos vertientes, en un proyecto de mediana complejidad, conduce a resultados poco satisfactorios. En su caso, se recomienda reducir el estudio, como máximo, a uno de los ámbitos de especialización que se exponen más adelante.

Mediante la descripción detallada, aunque necesariamente genérica, de sus propósitos y objetivos, se pretende ofrecer una hoja de ruta sobre “cómo” están estructuradas cada una de estas herramientas para poder aplicarlas en el desarrollo de un proyecto concreto.

Ambas herramientas comparten materias primas comunes: las derivadas del conocimiento y de las experiencias adquiridas en proyectos arquitectónicos de características similares al propuesto realizados con anterioridad. Por ello, al principio del capítulo se expone la composición y el formato de un proyecto arquitectónico. Ello permite incidir sobre ambos esquemas de trabajo y así disponer de una base sólida de referencia. En primer lugar, se tratan las auditorías de proyecto y, posteriormente, se detallan los planes maestros.



2.1.1. Auditorías de proyecto

Las auditorías de proyecto suponen la supervisión estructurada, analítica y crítica del proceso de diseño y de redacción de un proyecto arquitectónico por un equipo profesional capacitado, distinto del equipo redactor e independiente.

El propósito de las auditorías de proyecto es conseguir, mediante interacciones positivas entre ambos equipos, proyectista y auditor, un proyecto racional, técnicamente bien resuelto y equilibrado. Se pretende con ello realizar una ejecución de obra sin errores, de acuerdo con los parámetros previamente establecidos, relativos a calidad, precio y tiempo, siguiendo un plan maestro.

2.1.2. Planes maestros

Por último, se abordan los planes maestros, también conocidos como *master plans* o planes directores. Estos recogen y recopilan, mediante el trabajo de un equipo pluridisciplinario, el conjunto estructurado de los requerimientos que se plantean como objetivos a alcanzar en el diseño y la redacción un proyecto determinado.

El grado de satisfacción del proyecto elaborado será verificado y contrastado, en su momento, mediante la auditoría correspondiente, con la cual concluirá un ciclo productivo.

El carácter cíclico del proceso resta significación al orden en que se tratan ambos conceptos, puesto que son interdependientes. Análogamente a las auditorías, los planes maestros requieren independencia total entre el equipo redactor y el proyectista, como ya se ha indicado.

Puede concluirse que el conjunto documental compuesto por el proyecto, la auditoría y el plan maestro forma parte de un ciclo de conocimientos y de experiencias, que se autoalimenta. Su objetivo último es perfeccionar y mejorar el proceso derivado del proyecto arquitectónico que da lugar a la ejecución de una obra, desde las ideas iniciales hasta el proceso de mantenimiento del edificio.

2.1.3. El proyecto: definición y alcance

El concepto general de la palabra *proyecto* es extraordinariamente amplio. Se vincula a la voluntad de desarrollar alguna actividad. Las actividades involucradas por un proyecto pueden ser tanto las meramente intelectivas como las físicas derivadas de ellas. En el lenguaje común suele decirse, como ejemplo de lo indicado: "proyecto escribir una novela", "proyecto hacer un viaje" o "proyecto montar un armario".

En el ámbito estrictamente físico, la palabra *proyecto* puede definirse como un conjunto estructurado de documentos de carácter técnico, tanto gráficos como escritos, orientados a la plasmación, en el plano real, de unas ideas profesionales que pertenecen a los ámbitos de la ingeniería y de la construcción.

Según las premisas expuestas, un proyecto define y establece:



- Lo se pretende conseguir o construir: un barco, un automóvil, una máquina, un edificio...
- Las dimensiones que lo conforman, mediante el empleo de recursos gráficos y/o maquetas.
- El material o los materiales de que está constituido el elemento objeto del proyecto.
- Los sistemas de unión y ensamblaje de dichos materiales.
- El proceso de montaje de los mismos.
- Los medios auxiliares y las herramientas necesarios para llevarlo a cabo con eficiencia y seguridad para las personas y los bienes.
- Los niveles de calidad y precisión exigibles a cada una de las partes.
- El tiempo o los tiempos necesarios para montar el conjunto y cada una de las partes.
- El presupuesto preciso para llevarlo a cabo.
- Otros aspectos vinculados a la ejecución, como la financiación, la publicidad, la distribución y venta del producto obtenido, así como el servicio posventa.

Del contenido de los apartados precedentes, cabe concluir lo siguiente:

- El concepto *proyecto*, incluso acotando el círculo de las posibles actuaciones al ámbito exclusivo de la edificación, sigue siendo un término muy amplio, puesto que su intencionalidad y su contenido pueden ser muy diversos.
- En todo proceso edificatorio, es preciso partir de un proyecto, puesto que constituye la materia prima sobre la cual desarrollar la totalidad de los trabajos.
- La calidad del proyecto es condición necesaria, pero no suficiente, para garantizar una ejecución correcta del objeto del mismo.
- Entre los trabajos que quedan englobados bajo el título de proyecto arquitectónico, se encuentran aspectos tan dispares como:
 - Una fase de un proyecto más complejo. Tal es el caso de los proyectos de cimentación, de estructuras o de instalaciones, para enumerar algunos de los más comunes que forman parte de un proyecto ejecutivo.
 - La enorme variedad de modelos arquitectónicos y tipologías constructivas.



- A pesar de su aparente complejidad los objetivos finales de un proyecto de edificación y, en general de la mayoría de los proyectos, se centran en tres aspectos básicos: calidad, precio y tiempo.

A través de la redacción del proyecto, se pretende:

- Conseguir el nivel de calidad propuesto mediante la dualidad de requerimientos y prestaciones definidos en el mismo.
- Obtener la calidad a un precio razonable, de acuerdo con los parámetros del mercado para edificaciones similares y la situación coyuntural de este.
- Lograr dicha calidad y precio en el menor tiempo posible, conociendo las necesidades y disponiendo de mano de obra, materiales y medios auxiliares más apropiados, y estructurando las acciones mediante la programación y la organización de los trabajos.

Documentos y estructura propios de un proyecto arquitectónico

Este apartado es una reflexión sobre la estructura documental propia de los proyectos arquitectónicos orientados a la edificación. No pretende ofrecer una exposición exhaustiva. Se trata, simplemente, de esbozar el marco en que han de desenvolverse las herramientas de análisis de los proyectos arquitectónicos: las auditorías de proyecto y los planes maestros.

La documentación de un proyecto arquitectónico comprende los documentos siguientes:

Memoria. Suele estructurarse en diversos apartados con objeto de adaptar la documentación contenida a las necesidades del proyecto. Así, en general, existen las memorias descriptiva, justificativa, de oficios y de calidades. La memoria contiene, además, documentación relativa al control de calidad del proceso constructivo, y a la seguridad y salud laboral (estudio de seguridad y salud).

A continuación, se expone el contenido de cada uno de los apartados citados:

- **Memoria descriptiva.** Comprende los datos identificativos del proyecto, el emplazamiento, el promotor y el proyectista, así como aspectos informativos generales sobre la solución adoptada, el número de plantas sobre y bajo rasante, los destinos de las mismas, y los cuadros de superficies útiles y construidas.

También se detalla el importe global previsto para la ejecución de las obras. Opcionalmente, puede incluir un cronograma con los tiempos de ejecución previstos para las grandes partidas. Los proyectos no suelen disponer de *plannings* orientados a la ejecución.

- **Memoria justificativa.** Hace referencia al cumplimiento normativo, tanto desde el punto de vista urbanístico (alturas, volúmenes, ocupación...) como normativo. Dentro de este apartado, se incluye la justificación del cumplimiento de los aspectos contenidos en los documentos básicos (DB) del Código Técnico de la Edificación (CTE). En esencia, son:



- Seguridad estructural
 - Seguridad en caso de incendio
 - Seguridad de utilización y accesibilidad
 - Salubridad
 - Protección frente al ruido
 - Ahorro energético
- **Memoria de oficios.** Se detalla, para cada uno de ellos, qué soluciones constructivas han de aplicarse y cómo deben llevarse a cabo.
 - **Memoria de calidades.** Recoge el tipo, el formato, el modelo y, en algunos casos, la marca de los materiales de acabado, interior y exterior, así como de los equipos que han de ser instalados en el edificio.

Control de calidad. En el apartado relativo al control de calidad, el proyectista establece, de acuerdo con la normativa vigente, qué materiales es preciso controlar, cuándo y cómo deben controlarse. En la fase de ejecución, el director de ejecución de obra (DEO) desarrollará y llevará a cabo el programa de control de calidad.

Estudio de seguridad y salud. En el estudio de seguridad y salud, el proyectista analiza el riesgo de las distintas actividades que implica la realización de la obra proyectada. Sobre la base de este análisis, se establecen una serie de medidas correctoras, tanto a escala individual como colectiva, para que el DEO o el coordinador de seguridad y salud se encarguen de aplicarlas a la obra.

Pliego de condiciones. Indica cómo deben hacerse los trabajos definidos en el proyecto. Establece, de forma unívoca, los criterios de aceptación y de rechazo (tolerancias) para cada elemento constructivo definido en el proyecto. El pliego de condiciones, como parte integrante de un proyecto, se convierte en un documento contractual si en él constan las firmas del promotor y del constructor.

Su complejidad y extensión se resuelven estructurándolo en diversos apartados:

- Pliego de condiciones generales
- Pliego de especificaciones técnicas
 - De materiales y equipos
 - De ejecución
- Pliego de cláusulas administrativas

A continuación, se efectúa un breve comentario de cada uno de ellos.

- **Pliego de condiciones generales.** Comprende, a partir de la descripción general del contenido del proyecto, los criterios o aspectos normativos, legales y administrativos vinculados a su ejecución correcta.
- **Pliego de especificaciones técnicas.** Especifica cómo han de desarrollarse los trabajos a través de dos apartados perfectamente diferenciados.



- **Especificaciones de materiales y equipos.** Detallan los materiales, los equipos, las máquinas, las instalaciones y los medios auxiliares necesarios para llevar a cabo el proyecto.
- **Especificaciones de ejecución.** Indican cómo y con qué criterios de aceptación o de rechazo se realizará la construcción, conforme a las directrices del proyecto, a partir de los materiales y las técnicas previstas.
- **Pliego de cláusulas administrativas.** Establece la forma de medir las partes ejecutadas del proyecto, de valorarlas y de pagarlas.

Estado de mediciones y presupuesto. La base del estado de mediciones son las unidades de obra, también llamadas *partidas*. Cada unidad de obra tiene asignado un precio, que se obtiene por descomposición de sus componentes.

El estado de mediciones determina aritméticamente, a través del conjunto de partidas que conforman la realización del proyecto, las cantidades de cada una de ellas, medidas sobre el plano. Las partidas, a su vez, se agrupan por afinidades en capítulos.

El presupuesto está vinculado al estado de mediciones y se obtiene por la suma del producto entre las cantidades establecidas en el estado de mediciones y los precios unitarios.

Es preciso considerar que el estado de mediciones y presupuesto es un documento de análisis constructivo de primer orden. A partir de la definición volumétrica de los planos y del detalle de los materiales, las calidades, los acabados y los procesos de construcción definidos en la memoria y en los pliegos de condiciones, se pasa de los aspectos cualitativos a los cuantitativos, de modo detallado y preciso.

Ello no solo permite efectuar una valoración económica minuciosa de la obra, sino que también facilita la determinación de otros aspectos significativos, como el consumo energético necesario para llevarla a cabo, la emisión de CO₂ o los residuos que se van a generar. Tales resultados son posibles por que determinadas bases de datos contienen no solo la descomposición de los materiales y la valoración económica de cada uno de ellos, sino también los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ asociados al desarrollo de la actividad.

En la trilogía calidad-precio-tiempo, la calidad adopta nuevos significados al quedar incorporados en ella los aspectos relativos a la reducción del impacto ambiental.

La posibilidad que la construcción tecnológica ofrece a los proyectistas de elegir, entre distintas prestaciones equivalentes, las de menor impacto ambiental acabará, a través de estudios específicos, marcando tendencias y facilitando la generación de modelos edificatorios más racionales y respetuosos con el medio ambiente.

Planos. Los planos de un proyecto arquitectónico ejecutivo cumplen diversas funciones, entre ellas:



- Definición espacial general del edificio
- Desarrollo constructivo de la cimentación, de las contenciones, en su caso, y de la estructura
- Grafiado de redes e instalaciones
- Planillas de la carpintería y de la cerrajería exterior e interior
- Detalles constructivos

Habitualmente, los planos de un proyecto se estructuran por afinidades, que dan lugar a las distintas series. Y, dentro de ellas, estos se organizan mediante un orden numérico correlativo, establecido, como norma general, en función de su prioridad de uso dentro del proceso constructivo.

Comúnmente, un proyecto ejecutivo dispone de series de planos de arquitectura, de estructura y de instalaciones. Dentro de los planos de arquitectura, se suelen englobar los detalles constructivos no estructurales y las planillas de carpintería y cerrajería.

Todos los planos han de tener un cajetín o carátula en que se recojan, como mínimo, los aspectos siguientes:

- El proyecto al cual pertenecen
- El título del plano, en referencia a su contenido
- La serie de la cual forman parte y el número correlativo que les corresponde
- La fecha de la última modificación
- En los proyectos complejos, en que es habitual que se produzcan cambios, los cajetines disponen de casilleros para dejar constancia de las fechas de modificación, quien la llevó a cabo y quien lo supervisó

Coherencia y transversalidad

A la vista de la diversidad y de la complejidad de los documentos que son precisos para definir, de forma clara, precisa y unívoca, la ejecución de un proyecto arquitectónico, se llega a la conclusión de que se trata de un mecanismo muy delicado.

La alteración de cualquier parámetro en la documentación gráfica o escrita ha de ser considerada en el conjunto del proyecto. Los errores o la falta de rigor en la gestión de los cambios acaban incidiendo, de forma más o menos notoria en función de su alcance y circunstancias, en la calidad, en el precio y en el tiempo. Es fácil que durante la redacción, en que se suelen producir modificaciones y cambios con cierta frecuencia, se produzcan errores de coherencia, tanto entre el contenido de los distintos documentos escritos como entre las indicaciones de los documentos escritos y los gráficos.



Por ello, el contenido de los diversos documentos de un proyecto ejecutivo ha de ser analizado bajo dos premisas, de modo que sea coherente con los objetivos programados y que, además, exista concordancia entre ellos, en cuyo caso se dará la transversalidad necesaria en la información.

2.2. Auditorías de proyecto

2.2.1. Introducción

En este apartado se detalla, desde el conocimiento de las carencias y lagunas de la legalidad vigente, cómo debe efectuarse una auditoría de proyecto arquitectónico.

Para ello, se incide en el desarrollo de los apartados siguientes:

- La situación de la legalidad vigente y su grado de indefinición en lo referente al control de proyectos
- El concepto de proyecto integral
- La composición del equipo profesional y humano necesario para llevar a cabo las auditorías
- Los principios operativos. Recomendaciones para estructurar y facilitar la labor de los profesionales auditores
- Los defectos más comunes que se detectan en las auditorías de proyecto
- Cómo llevar cabo una auditoría de proyecto arquitectónico
- Consideraciones finales

2.2.2. La situación de la legalidad vigente y su grado de indefinición en lo referente al control de proyectos

Dentro del marco general definido por la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE) y el Real Decreto 314/2006, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE), el artículo 6.2 del Libro 1 del CTE hace referencia al control del proyecto, cuyos efectos serían equivalentes a los relacionados previamente bajo el concepto de auditoría.

Dicho artículo establece lo siguiente:

1. “El control de proyecto tiene por objeto verificar el cumplimiento del CTE y demás normativa aplicable y comprobar su grado de definición, la calidad del mismo y todos los aspectos que puedan tener incidencia en la calidad final del edificio proyectado. Este control puede referirse a todas o algunas de las exigencias básicas relativas a uno o varios de los requisitos básicos mencionados en el artículo 1.



2. Los DB establecen, en su caso, los aspectos técnicos y formales del proyecto que deban ser objeto de control para la aplicación de los procedimientos necesarios para el cumplimiento de las exigencias básicas.”

Como puede observarse, el articulado se limita a exponer que el control del proyecto debe hacerse y que este tiene como propósito verificar el cumplimiento del CTE. No indica ni quién ni cómo ha de realizarlo.

En el contexto legal vigente, a falta de otras referencias más precisas, debe entenderse que es el propio proyectista quien ha de efectuar el control de la calidad y de idoneidad del proyecto.

Bajo las premisas precedentes, queda alterado el principio de independencia para asegurar la calidad: “quien produce no controla; quien controla no produce”. La experiencia, avalada por la estadística de las entidades aseguradoras, muestra que la vía del principio de corresponsabilidad emanada de la LOE conduce, con excesiva frecuencia, a actuaciones de carácter judicial.

En dichas actuaciones, se han de resolver conflictos entre las partes afectadas cuyo origen son las patologías y deficiencias que acaban afectando la funcionalidad normal y la durabilidad del edificio. Muchas de ellas podrían haberse corregido, en la fase del proyecto, mediante las prescripciones derivadas de una auditoría.

Es evidente que las auditorías de proyecto no son la panacea ni constituyen la garantía absoluta para evitar todos los defectos. Sin embargo, su eficacia es indudable y su coste queda ampliamente compensado.

Jurídicamente, es difícil imponerlas; sin embargo, la complejidad creciente de los proyectos arquitectónicos las reclama, en aras de una mayor eficiencia y economía en el proceso de ejecución y mantenimiento de los edificios.

2.2.3. El concepto de proyecto integral

El proyecto integral responde, como concepto, a un conjunto estructurado y ordenado de documentos, elaborados por distintos equipos profesionales, concebidos de forma funcional, racional y técnicamente competitiva para efectuar el diseño, la construcción y el mantenimiento de un edificio.

Está formado por el plan maestro, el proyecto básico, el proyecto básico avanzado, el proyecto ejecutivo, la auditoría de proyecto, los documentos de contratación, los documentos de seguimiento de obra, los documentos de puesta en marcha de las instalaciones y el programa de mantenimiento.

Cronológicamente, el plan maestro es previo al proyecto básico, mientras que la auditoría se inicia a la conclusión del proyecto básico y finaliza con la emisión del informe del proyecto ejecutivo, sin que ello impida llevar a cabo posibles seguimientos finales del proceso de diseño.

El conjunto de documentos y experiencias de un proyecto integral forman parte de la espiral de conocimientos estructurados científicamente que conforman y facilitan la evolución de la construcción tecnológica.



2.2.4. Equipo necesario para llevar a cabo una auditoría de proyecto

De forma general, la auditoría de un proyecto arquitectónico supone revisar todos los documentos integrantes del mismo, generados como resultado de su proceso de diseño y redacción. Tales acciones deben ser llevadas a cabo por un equipo profesional capacitado, distinto del equipo redactor, para garantizar tanto el principio de independencia como el de revisión *inter pares*.

Al igual que la redacción de un proyecto arquitectónico de una cierta complejidad requiere un equipo pluridisciplinario, para realizar una auditoría de proyecto, con garantías de obtener un resultado satisfactorio, es preciso disponer de un equipo de similares características. Este ha de tener una capacidad, unos conocimientos técnicos y una experiencia cuando menos equivalentes a los del equipo redactor.

Desarrollar la auditoría de un proyecto arquitectónico precisa, como mínimo, un equipo formado por cuatro personas, todos técnicos superiores, organizados del modo siguiente:

- Un especialista en el apartado de las interacciones suelo-cimentación, contenciones y estructuras.
- Un responsable de la revisión del diseño arquitectónico y del cumplimiento normativo (para evitar tener que efectuar correcciones y sufrir retrasos por incumplimientos, durante la tramitación administrativa del expediente).
- Un experto en instalaciones en edificios (según la complejidad del edificio, puede precisarse más de uno).
- Un coordinador que analice la transversalidad y la coherencia de los contenidos de los informes de los distintos especialistas, y tenga la capacidad de síntesis y de liderazgo necesarios para generar un documento estructurado y preciso.

Con ello, se pretende:

- Mejorar la calidad, reducir el precio y acortar los tiempos de ejecución, siempre respetando los valores profesionales y éticos.
- Minimizar errores, siguiendo el principio de independencia que rige las normas de calidad: “Quien produce no controla; quien controla no produce.”
- Facilitar el proceso constructivo, aportando, si es posible, la denominada *ingeniería de valor*. Esta consiste en proponer soluciones constructivas alternativas ventajosas con respecto a las previstas inicialmente; por ejemplo, sustituir un proceso artesanal por otro prefabricado de prestaciones similares.
- Optimizar el tiempo de ejecución, tanto por el control de los errores del proyecto, como por las mejoras introducidas, en su caso, en el proceso constructivo.



De todo lo expuesto, se desprende que las auditorías de proyecto requieren disponer de una organización empresarial consolidada, propia de una ingeniería o de una firma de *project management*, con capacidad para aglutinar a un equipo de profesionales de primer nivel en un cometido común. Igualmente, cabe concluir que los proyectos han de alcanzar una cierta entidad para que sea razonable llevar a cabo la auditoría.

Como conclusión de este apartado, conviene indicar que efectuar auditorías de proyecto es extraordinariamente rentable. La experiencia demuestra que queda mucho camino por recorrer en la mejora de la calidad de los proyectos.

Los estudios sobre las indemnizaciones que pagan las compañías aseguradoras en concepto de responsabilidad civil en el ramo de la construcción señalan que los errores de proyecto suponen el 43 % del total. Los problemas derivados de una mala ejecución, el 31 %, y solamente el 13 %, el 11 % y el 4 % son atribuibles, respectivamente, a materiales defectuosos, al uso y a causas naturales.

Idealmente, debería desarrollarse la auditoría en paralelo al proyecto, planteado, en este caso, como un "proyecto integral". La falta de cultura empresarial de los promotores suele conducir, en la mayoría de las ocasiones y en el mejor de los casos, a realizar las auditorías directamente sobre un proyecto ejecutivo.

Efectuar correcciones directamente sobre un proyecto ejecutivo resulta más costoso y complejo, debido a la gran cantidad de modificaciones que cualquier cambio obliga a realizar en el conjunto de documentos.

Es evidente que los mejores resultados de una auditoría de proyecto se obtienen por medio de un seguimiento continuado de un proyecto integral. Mediante el mismo, las grandes divergencias se corrigen en origen y, por tanto, afectan pocos documentos. De este modo, en las fases más avanzadas, las correcciones solo inciden sobre aspectos puntuales.

2.2.5. Principios operativos

A continuación, se formulan unas recomendaciones para estructurar y facilitar la labor de aquellos profesionales que, dentro de su campo de especialidad, actúen como auditores de proyectos arquitectónicos:

- Actuar del todo a la parte. La revisión ha de iniciarse verificando el cumplimiento de los conceptos generales o básicos y acabar incidiendo en los aspectos de detalle.
- Revisar la constructibilidad y la idoneidad técnica de las soluciones contenidas en las diversas fases del proyecto. Ponderar la presencia de aspectos relativos a la sostenibilidad, a la seguridad, a la economía y a la facilidad de ejecución. Proponer, en su caso, soluciones alternativas.
- Verificar la coherencia y el contenido documental. Para ello, se realiza un estudio transversal del proyecto cruzando los datos y los resultados de los profesionales encargados de la revisión (principio de transversalidad).



- Graduar la incidencia de los aspectos observados en la revisión para el desarrollo del proyecto. Los defectos y las deficiencias han de calificarse conforme a una escala de valores prefijada.
- Atender la necesidad de especialización que una auditoría comporta. Para ello, es preciso considerar la capacidad profesional del auditor.

2.2.6. Defectos comunes que se detectan en las auditorías de proyecto

Los proyectos, a lo largo de su proceso de gestación, pueden presentar defectos más o menos graves; de ahí la importancia de que el equipo auditor actúe desde el origen, antes que efectuar auditorías sobre el proyecto ejecutivo. En cualquier caso, es preciso detectar los defectos y los errores, y corregirlos para que no constituyan un lastre durante la ejecución de la obra. A los efectos del presente estudio, se han sistematizado bajo los conceptos siguientes:

- Carencias
- Indefiniciones
- Incoherencias
- Errores de grafismo
- Errores de concepto

Carencias. Además de la falta de algún plano, especialmente los correspondientes a secciones y a detalles constructivos, cuya ausencia puede provocar incertidumbres o errores de interpretación durante el curso de las obras, una de las carencias más comunes consiste en no incorporar, en el estado de mediciones, alguna o algunas de las partidas necesarias para la realización del edificio.

En otras ocasiones, pueden faltar cotas, niveles de planta o la indicación de las dimensiones de los peldaños. También suelen presentar carencias los planos de instalaciones.

Indefiniciones. Las indefiniciones suelen plantearse en la redacción de las memorias y en los estados de mediciones. Es frecuente que las descripciones de las partidas no estén suficientemente detalladas, o bien que en ellas se indiquen materiales genéricos. Estos pueden tener variedades con precios muy diversos. Es necesario velar porque la redacción de las partidas sea la más precisa posible, con objeto de evitar errores.

Incoherencias. Las incoherencias pueden tipificarse como diferencias entre los conceptos expresados en los distintos documentos de proyecto relativos a un mismo aspecto. Suelen detectarse haciendo una lectura transversal de la documentación del proyecto. Si no son significativas o graves y es posible discernir, razonablemente, la previsión del proyectista, no es preciso comunicarlas. Un exceso de puntillismo puede resultar perjudicial para el objetivo básico del auditor, que no es sino facilitar que el proyecto permita llevar a cabo la obra sin problemas, de acuerdo con las premisas del contrato.

Errores de grafismo. En general, suelen ser errores de orden menor. No afectan sustantivamente la realización de la obra, pero pueden dar lugar, si no se detectan a tiempo, a correcciones a posteriori, habitualmente abriendo nuevos



huecos con martillo neumático o con brocas de campana. Casos típicos de errores de este tipo son la no coincidencia en la vertical de huecos de bajantes, las reservas para pasos de escalera con medidas incorrectas, el marcaje erróneo de las caras fijas de los pilares o errores en las cotas.

Errores de concepto. Los errores de concepto se materializan bajo muy diversos aspectos, tanto constructivos como de diseño. A título indicativo, se detallan algunos de los más frecuentes.

Un primer grupo responde al incumplimiento de alguna normativa básica que puede haber pasado desapercibida en la fase de diseño, incluso con la licencia ya obtenida. Aspectos relativos a la accesibilidad, las dimensiones y la ubicación de las vías de evacuación suelen encontrarse entre los más frecuentes.

Otro apartado importante lo constituyen los errores en la disposición de impermeabilizaciones y baberos para garantizar la estanqueidad de encuentros o puntos conflictivos o, simplemente, su olvido en los detalles constructivos o en el estado de mediciones.

También suelen detectarse problemas en las alturas libres de paso de escaleras, en las dimensiones inadecuadas de los peldaños (especialmente en las escaleras compensadas), en las cotas de saneamiento, en la resolución de sótanos con sistemas de contención inadecuados...

Las distancias excesivas entre juntas de dilatación y las incompatibilidades entre elementos portantes y portados por efectos higrotérmicos son otros de los puntos a revisar para evitar reclamaciones posteriores y reparaciones costosas.

No dejar juntas estancas entre sectores de losas de cimentación de distinto canto sometidas a tensiones diferenciales puede provocar fisuras y, en el peor de los casos, grietas por las cuales se filtre el agua freática al interior del vaso.

Aunque la carátula de un plano indique "proyecto ejecutivo", ello no supone necesariamente que pueda ser ejecutado con seguridad y eficiencia con los métodos constructivos indicados en el proyecto. A título ilustrativo, los sistemas de contención de más de seis metros de altura encofrados a una cara contra un suelo de baja cohesión son un ejemplo paradigmático de este tipo de errores de concepto. En estos casos, se impone cambiar la solución constructiva propuesta por un muro pantalla u otro elemento previo de contención..

Otro error trascendental de concepto puede producirse, en determinados suelos de baja cohesión y con nivel freático alto, al plantear unos muros pantalla perfectamente estancos. En estos casos, al diseñarlos debe preverse el espacio necesario para formar una cámara de aire ventilada y canales para recoger las eventuales filtraciones. La pérdida de entre 30 y 40 cm de luz libre en los sótanos (entre 15 y 20 cm por cara) puede tener trascendencia en la distribución de los aparcamientos.

El apartado de instalaciones es proclive a una gran variedad de errores de compatibilidad en la previsión y dimensión de los espacios reservados en los huecos de la estructura. Suele haber problemas de tiraje en las calderas al diseñar tramos



de evacuación prácticamente horizontales y excesivamente largos. También se producen errores de prescripción en el tipo de caldera al no tener debidamente en cuenta las condiciones de volumen del local donde han de ser instaladas.

2.2.7. Cómo llevar a cabo una auditoría de proyecto arquitectónico.

En este apartado, se describe la estructura genérica que, de modo razonable, debería adoptar una auditoría de proyecto. Como se ha indicado, existe escasa cultura en el ámbito de los promotores de obras con respecto a las auditorías de proyecto. Todavía es frecuente que, en el mejor de los casos, se realice una auditoría de proyecto sobre un proyecto ejecutivo. En estas circunstancias, revocar determinadas decisiones comporta graves problemas económicos y logísticos. En cambio, en fases previas, la corrección resulta más simple y eficiente.

La auditoría de un proyecto arquitectónico ha de seguir un proceso estructurado, previamente establecido y pactado entre el equipo proyectista y el equipo auditor, cuya base es, o debería ser, un plan maestro.

La auditoría ha de comprender todas las fases del proyecto. A tal efecto, se propone descomponer la generación del proyecto en tres partes y, al final de cada una de ellas, disponer de un tiempo razonable para efectuar la auditoría correspondiente. A partir de la misma, deberán realizarse, en su caso, las correcciones pertinentes, en tiempo y forma, antes de pasar a la fase siguiente.

El esquema general del proceso de auditoría, de acuerdo con los planteamientos precedentes, es el siguiente:

- Primera fase. Sobre el proyecto básico concluido
- Segunda fase. Sobre el proyecto básico avanzado
- Tercera fase. Sobre el proyecto ejecutivo

Primera fase de la auditoría

Idealmente, la primera fase de la auditoría debería desarrollarse sobre un proyecto básico, redactado a partir de un plan maestro. En buena lógica, aunque ello no es imprescindible, el equipo auditor ha de ser el responsable del plan maestro. En esta fase, se analizan los aspectos siguientes y se emite el informe correspondiente sobre ellos:

- El cumplimiento normativo urbanístico
- La composición general del edificio
- La organización espacial
- La ubicación y el dimensionado de los núcleos de comunicaciones
- El esquema estructural

Actuar sobre el proyecto básico permite detectar a tiempo y corregir fácilmente aspectos de la organización general del proyecto, como la composición volumétrica, la orientación, la ubicación de los accesos en función de la importancia de las calles o el diseño de los núcleos de enlace vertical, por citar algunos ejemplos significativos de casos que no coinciden con las previsiones del plan maestro o que, a juicio del equipo auditor, podrían ser objeto de revisión.



Segunda fase de la auditoría

La segunda fase de la auditoría debería hacerse sobre un proyecto básico “avanzado”. En ella, el equipo proyectista ha de disponer de un estudio geotécnico, desarrollado de acuerdo con las prescripciones del CTE, que determine la idoneidad o no de las soluciones constructivas propuestas en los apartados de cimentación y contenciones.

Ha de incidir en aspectos como la existencia o no de nivel freático, la estratigrafía y calidad del suelo, y la obtención parámetros geotécnicos que permitan orientar las decisiones relativas a las soluciones constructivas más apropiadas.

Los puntos de interés a verificar y que han de plasmarse en el informe de auditoría son los siguientes:

- El cumplimiento de las indicaciones y correcciones de la primera auditoría
- La idoneidad o no del sistema de contenciones propuesto por el equipo redactor, en su caso
- La adecuación o no del sistema de cimentación propuesto
- El sistema o los sistemas estructurales previstos y sus posibles interacciones; su idoneidad y posibles alternativas
- La verificación del cumplimiento de la normativa general
- Los cerramientos previstos de fachada y sus posibles alternativas
- Las calidades y acabados propuestos, y sus posibles alternativas

Tercera fase de la auditoría

La tercera fase de la auditoría debería realizarse sobre el proyecto ejecutivo. Habitualmente, las dos primeras fases no se realizan. Insistimos en que es un error, pues obliga a corregir “cuando todo está hecho”. En este sentido, es preciso recordar que un proyecto ejecutivo no es necesariamente un proyecto “ejecutable”, que un proyecto “ejecutable” no es necesariamente un buen proyecto, y que un proyecto “ejecutable” y auditado correctamente no garantiza, por sí solo, una buena ejecución.

La ejecución correcta de un proyecto ejecutivo se consigue mediante un proceso profesional de selección de los agentes participantes y mediante la planificación y el control continuo e integrado de todas sus fases.

En la línea indicada, tanto en la preparación de la documentación por parte del proyectista como en la redacción de la auditoría de proyecto ha de primar la sistematización. En este sentido, cada vez son más los equipos de proyectistas y de auditores que implantan métodos de trabajo para el aseguramiento de la calidad.



A continuación, se detallan algunos aspectos generales para orientar la mecánica de ejecución de las auditorías de los proyectos. No se trata, en modo alguno, de presentar una lista exhaustiva de comprobación, puesto que es un objetivo inalcanzable en función de la diversidad y del alcance de los proyectos a que va dirigido.

En los párrafos siguientes, se expone un esquema general para desarrollar una auditoría de proyecto ejecutivo. Los puntos de análisis han de responder a los apartados siguientes:

- Existencia de un índice de documentos que permita localizar, de forma ágil y precisa, la información deseada
- Verificación sectorial (cimientos, contenciones y estructura, diseño arquitectónico y cumplimiento normativo e instalaciones) de la coherencia y estructura del contenido de los diferentes documentos que conforman la fase del proyecto objeto de estudio
- Cumplimiento de la normativa básica, adecuada a cada fase, como definidora de la racionalidad formal y técnica del proyecto. A título indicativo, se acompaña una lista de referencia:
 - Urbanística. Edificabilidad, superficies, volúmenes, ocupación, profundidades edificables, alturas, vuelos, dimensiones de patios...
 - Accesibilidad. Ficha justificativa. Dimensiones de paso, dotación de sanitarios y otros espacios adaptados
 - Sistema o sistemas de cimentación y contenciones adoptados en función de los parámetros del estudio geotécnico y las características del edificio
 - Racionalidad de la estructura
 - Prevención de incendios. Fichas justificativas del CTE
 - Accesibilidad y seguridad de uso. Fichas justificativas del CTE. Vías de evacuación, número de peldaños, dimensiones de pasos y escaleras, dirección de apertura de puertas, sistemas activos y pasivos
 - Aislamiento térmico. Fichas de cumplimiento del CTE
 - Aislamiento acústico. Fichas de cumplimiento del CTE
 - Gestión de residuos. Ficha de cumplimiento
 - Dimensiones y número de ascensores en relación con las necesidades de servicio
 - Programa de control de calidad, con valoración de su coste
 - Ubicación y previsión de espacios para montantes, pasos y servicios de las instalaciones



- Estudio de seguridad y salud
- Listado de instalaciones (y, si procede, de proyectos complementarios) que el proyecto ha de contener. A título meramente enunciativo:
 - Telecomunicaciones
 - Ventilación del aparcamiento
 - Fontanería
 - Gas
 - Electricidad
 - Aire acondicionado-calefacción
 - Aparatos elevadores
 - Alarmas
 - Prevención de incendios
 - Energías alternativas
 - Necesidad o no de una estación transformadora
- Posibilidad de ejecución cumpliendo las normas de seguridad y de buena construcción de las obras proyectadas con los sistemas constructivos especificados en el proyecto. Ello puede resumirse con el concepto general de *constructibilidad* de la propuesta y valorando su grado de eficiencia y dificultad frente a otras alternativas aplicables.
- Homogeneidad de prestaciones en cuanto a la calidad y los acabados de las diferentes dependencias del edificio.
- Referencias a marcas y modelos, cuando corresponda, como elementos definitorios del fin perseguido.
- Existencia, en los documentos del proyecto, de mecanismos de control para conocer en cada momento qué documentación está vigente y cuál es obsoleta. A tal fin, suelen utilizarse carátulas con indicaciones de la fecha, de la causa de la modificación, de quién modifica, de quién revisa y a qué documento sustituyen.

Como resultado de las auditorías de seguimiento, elaboradas durante la fase de diseño y redacción del proyecto arquitectónico, para cada una de ellas se elabora un documento, que se somete a la consideración del equipo redactor.

Cada uno de los apartados que conforman las auditorías parciales o, según proceda, directamente la auditoría del proyecto ejecutivo (cimientos, contenciones y estructura, diseño arquitectónico y cumplimiento normativo e instalaciones), se estructuran en dos subapartados, correspondientes a la documentación escrita y a la documentación gráfica, respectivamente.

En cada uno de ellos, se refieren el documento y la página o el número de plano, según corresponda. Se especifican así los defectos localizados y su ubicación dentro del conjunto documental que conforma el proyecto arquitectónico. Basándose en el mismo, el equipo redactor del proyecto efectuará las correcciones pertinentes o expondrá las consideraciones que justifiquen y, en su caso, ratifiquen las decisiones de diseño adoptadas.



Los profesionales del equipo auditor han de estar en condiciones de reunirse, si es preciso, con los responsables del proyecto auditado para exponer y defender sus razones, siempre con espíritu positivo y de colaboración.

La redacción de la auditoría, en la medida que afecta el trabajo de terceros, ha de ser muy objetiva, respetuosa y neutra. El trabajo del director del equipo auditor es determinante como elemento aglutinador y de moderación de los contenidos.

Es preciso coordinar y estructurar, en el informe de auditoría, las experiencias y los resultados obtenidos en las distintas áreas de análisis en que se ha descompuesto el proyecto. Ha de ser de lectura unívoca y fácilmente comprensible.

Resulta necesario priorizar los aspectos críticos, si existen, en el resumen final que ha de acompañar el grueso del informe, y resaltarlos frente a aquellos que, aun siendo significativos, no constituyen un serio obstáculo para la realización del proyecto. Como "aspectos críticos", deben catalogarse los incumplimientos normativos, las carencias graves o los errores dimensionales significativos.

2.2.8. Consideraciones finales.

A modo de conclusión del conjunto de apartados que conforman la exposición correspondiente a las auditorías de proyecto, se detallan algunos conceptos aclaratorios sobre el alcance de la actuación de los técnicos redactores de las mismas.

La consideración de que una auditoría de proyecto ejecutivo es un mecanismo de control de calidad en modo alguno ha de suponer "reproyectar", "recalcular" o "remedir" al 100 %. Como todo control de calidad, las auditorías de proyecto se basan en la "detección de defectos" mediante la utilización del "efecto cruce" y en la clasificación de dichos defectos.

Las auditorías han de fundamentarse más en el conocimiento y en el análisis de los aspectos conceptuales que en los de detalle. El auditor debe ser un conocedor de los procesos constructivos sobre los cuales trabaja y tener capacidad para analizar el proyecto en la globalidad de sus documentos.

Efectuar un cálculo preciso y completo puede ser muy complejo y laborioso; en cambio, establecer el orden de magnitud de un empuje de tierras, la carga sobre un pilar, el momento y los armados de una jácena o el diámetro de una evacuación puede hacerse de forma sencilla. Mediante los llamados "números gordos", es posible obtener datos de verificación fiables con poco esfuerzo.

La revisión y la comprobación de las mediciones han de entenderse desde la óptica de que los objetivos del auditor se centran más en la detección de carencias en las partidas o en la localización de errores de bulto que en el detalle del aspecto numérico.

Por ello, se insiste en la necesidad de que el auditor conozca el proceso constructivo analizado. Solo en el caso de que no se detecten carencias, o que estas sean poco significativas, se analizan los aspectos más de detalle.



2.3. Planes maestros

2.3.1. Planes maestros: conceptos generales

Un plan maestro puede definirse como un conjunto estructurado de ideas, plasmadas documentalmente de forma gráfica y escrita, procedentes de la consideración de aspectos muy diversos: estéticos, formales, compositivos, legales, urbanísticos y técnicos, orientados a abordar la elaboración de un proyecto.

En nuestro caso, habitualmente se trata de un proyecto arquitectónico con el fin de desarrollar, mediante una programación previa de requerimientos, prioridades y viabilidad, un edificio o un complejo de edificios de cierta envergadura.

Como concepto, un plan maestro puede asimilarse a una maqueta. Con un coste operativo reducido, es posible incidir, de modo eficiente, sobre dos aspectos sustantivos:

- La viabilidad económica, técnica y social de una propuesta edificatoria determinada. Ello determina el punto de partida o de abandono.
- Si se decide llevar a cabo la ejecución, disponer de una base sólida a partir de la cual elaborar el proyecto o los proyectos que permitan ejecutar la construcción.

El plan maestro es un paso significativo que permite avanzar en la consecución de las tres premisas fundamentales de toda construcción: calidad, precio y tiempo, por lo que estas han de formar parte, necesariamente e inexcusablemente, del mismo. La carencia o los déficits sustantivos en cualquiera de las premisas indicadas invalidan la aplicación práctica y eficiente, como plan maestro, de cualquier documentación fragmentaria.

Los planes maestros han de ser documentos flexibles, pero temporalmente limitados. Han de incorporar, correcciones, aportaciones e ideas procedentes de los diferentes agentes que intervienen en el proceso edificatorio, solo hasta que se decida la fecha de cierre, o esté prevista en el cronograma correspondiente.

Puesto que toda obra es perfectible, es preciso conjugar adecuadamente los parámetros del beneficio obtenido con respecto al tiempo empleado. Esta forma de proceder garantiza una mayor eficiencia y economía de tiempo.

Del apartado anterior se concluye que, una vez iniciado un plan maestro, una de sus piezas claves es la realización de un cronograma. El mismo debe contener, en función del conocimiento, el estudio y la extrapolación de los datos contrastados obtenidos de proyectos similares, los tiempos que han de dedicarse, durante la fase de redacción del proyecto, a las actividades siguientes:

- La elaboración del proyecto básico
- La revisión del proyecto básico
- Las correcciones del proyecto básico
- La elaboración del proyecto básico avanzado



- La revisión del proyecto básico avanzado
- Las correcciones del proyecto básico avanzado
- La elaboración del proyecto ejecutivo
- La revisión del proyecto ejecutivo
- Las correcciones del proyecto ejecutivo

Los planes maestros toman modelo del urbanismo. Los planes urbanísticos, en sus distintas variedades y alcances, definen, mediante documentación gráfica y escrita, cómo se pretende que sea el desarrollo urbanístico de un ámbito determinado según si este se encuentra pendiente de urbanizar o ya posee las características del suelo urbano.

El propósito último de un plan maestro es optimizar recursos y, por tanto potenciar la eficacia y la dirección de las decisiones adoptadas durante la redacción del proyecto arquitectónico.

Se procede a ello mediante el análisis profesional del producto que se pretende construir. Dicho análisis debe realizarlo un equipo independiente, que selecciona entre las opciones de diseño, técnicas y constructivas conforme a unos parámetros objetivos, previamente establecidos.

El documento resultante, con el título genérico de “plan maestro”, constituye una guía de diseño que simplifica, acota, dirige y facilita la labor del equipo proyectista.

Estructura y funciones de un plan maestro de edificación

A continuación, se comentan, de modo genérico, la estructura y las funciones de un plan maestro de edificación. A partir de los aspectos genéricos reseñados, han de efectuarse, en cada caso, las adaptaciones pertinentes en función de las necesidades y requerimientos propios de cada proyecto.

Los parámetros generadores básicos de un plan maestro son la funcionalidad o las funcionalidades y el uso o los usos para los que se pretende construir un edificio determinado, todo ello relacionado con las necesidades de espacio necesarias para desarrollarlos.

El concepto de funcionalidad expresa la eficiencia con que puede desarrollarse un uso determinado dentro de un espacio construido. Cada uno de los parámetros constituye una condición necesaria. Solo la conjunción de ambos permite alcanzar la calificación de condición necesaria y suficiente.

A efectos prácticos, ello se traduce en que, además de garantizar unas ratios de superficie razonables para unos fines determinados, es preciso que los espacios resultantes resulten agradables y garanticen un aprovechamiento óptimo. A tal efecto, el plan maestro ha de incidir sobre una gama amplia de factores de prediseño, cuyo propósito fundamental es facilitar la toma de decisiones del equipo redactor del proyecto en cada una de las fases de desarrollo del mismo.



2.3.2. Aspectos de prediseño

A continuación, se expone el esquema formal y se desarrollan los aspectos de prediseño que, de modo genérico, ayudan a configurar un plan maestro.

El esquema formal se desarrolla sobre la base del índice siguiente:

- El emplazamiento
- El gálibo
- El programa de necesidades
- Configuración orgánica
- Configuración espacial
- Configuración volumétrica y formal
- Configuración tecnológica
- Calidades y acabados
- Imagen corporativa
- Estimación de costes unitarios y totales
- Consideración del tiempo

El emplazamiento

El emplazamiento está asociado, en el planeamiento, a una determinada calificación o clave urbanística. De ella dependen no solo los parámetros edificatorios a que se hace referencia en el epígrafe siguiente, sino también las posibilidades de uso de la edificación que se pretende construir.

A título ilustrativo, los usos residencial, terciario, industrial o de equipamientos son los más comunes. Cada calificación urbanística suele tener tres tipos de usos: permitidos, tolerados y prohibidos, en función del tipo de desarrollo previsto en cada zona.

Además de la adecuación al uso, el emplazamiento permite establecer múltiples consideraciones, especialmente si el edificio proyectado presenta dos o más fachadas. Si así es, debe establecerse, en primer lugar, cuál será la fachada principal y cuál o cuáles las secundarias. Para ello, han de considerarse y ponderarse aspectos como su orientación, sus dimensiones, el tipo de vial, el valor comercial, las vistas, las circulaciones de vehículos o la topografía, por citar los aspectos más significativos.

Decidida la fachada principal, ha de determinarse la posición idónea de los distintos accesos que se prevean para el edificio: principal, de servicio, de mercancías, al aparcamiento subterráneo... Siempre que sea posible, las rampas de acceso a los sótanos se suelen colocar en los puntos de cota más baja, puesto que así resultan más cortas.

El gálibo

El gálibo corresponde al valor del volumen máximo de edificación, sobre y bajo rasante, permitido por las normas urbanísticas del solar de referencia sobre la base de su calificación en el planeamiento.



Además del volumen edificado en función del tipo de ordenación a que esté sujeto cada emplazamiento, aparecen otros parámetros definidores de la edificabilidad, como la profundidad edificable, la altura reguladora o el porcentaje de ocupación en planta, por citar los más significativos. Por ello, resulta imprescindible que en el equipo redactor del plan maestro intervengan uno o más profesionales que conozcan en profundidad el planeamiento urbanístico de referencia.

La aplicación de los parámetros de edificación a cada caso concreto permite obtener las dimensiones y, por tanto, la superficie máxima edificable de las distintas plantas. Así puede conocerse el potencial de superficie construida sobre y bajo rasante. La superficie y la morfología de las plantas determinan las posibilidades de aprovechamiento.

El potencial edificatorio sobre y bajo rasante debe cotejarse con el programa de necesidades. La combinación de ambos factores puede determinar la continuidad o el abandono de la redacción del plan maestro.

El programa de necesidades

El programa de necesidades se redacta a partir del estudio analítico de unos edificios, tres como mínimo, que se consideren modelos de referencia para el edificio propuesto. Mediante dicho estudio, se establecen las dependencias que han de conformar el edificio y sus superficies orientativas, así como otros aspectos complementarios. El programa de necesidades ha de considerar los aspectos siguientes y sus interrelaciones:

- Configuración orgánica
- Configuración espacial
- Configuración volumétrica y formal
- Configuración tecnológica

Configuración orgánica. La configuración orgánica de un edificio tiene por objeto definir:

- Dependencias o departamentos a incluir y número de cada uno de ellos
- Relación funcional entre dependencias o departamentos
- Superficies necesarias para cada dependencia
- Número de puestos de trabajo y su configuración, en su caso
- Tipos de mobiliario y de equipamientos previstos
- Necesidad de espacios, abiertos, semicerrados o cerrados

Configuración espacial. Ha de orientarse a:

- Ubicar los distintos usos y servicios del inmueble en la planta correspondiente, tanto sobre como bajo rasante.
- Establecer la posición preferente de los distintos accesos al inmueble.
- Determinar la posición preferente y el número de enlaces verticales, principales y de servicio. Hacer una previsión de las superficies.
- Prever las vías de evacuación. Hacer una estimación de las superficies.
- Prever las necesidades de sectorización.



- Prever, en su caso, plantas técnicas.
- Considerar la utilización prevista de la cubierta.

Configuración volumétrica y formal. La configuración volumétrica puede quedar muy condicionada entre medianeras en los edificios urbanos, no así en edificios aislados.

Si es físicamente posible, el equipo de redactores del plan maestro ha de interpretar el criterio del cliente con respecto a la voluntad de singularidad o no del edificio que se pretende construir; el predominio de la horizontalidad o de la verticalidad, o la presencia de vuelos. Ello conduce a establecer directrices de prediseño, traducido en conceptos como volumen único, torre aislada o dos o más torres sobre una base común. Los mismos pueden ser expresados en el plan maestro mediante escritos, gráficos o maquetas simples.

Basándose en ellos, el proyectista podrá acabar de interpretar y encajar el contenido del plan maestro en el contexto general del edificio.

Igualmente cabe considerar, en su caso, la presencia y el tratamiento de los volúmenes interiores como espacios de dos o más alturas, los vestíbulos o los espacios singulares en general.

Los aspectos formales, tanto interiores como exteriores, más allá de las calidades, deberán definirse en las directrices del plan maestro, siempre atendiendo las indicaciones del cliente.

Los aspectos formales determinan, en buena medida, la imagen y el carácter de los edificios, e incluso llegan a constituir una imagen de marca cuando son repetidos de forma sistemática, aspecto nada desdeñable desde el punto de vista comercial. A título de ejemplo: no es necesario identificar el logo de determinadas entidades bancarias para reconocer, en una fachada determinada, la presencia de una de sus agencias.

Configuración tecnológica. La configuración tecnológica de un edificio tiene por objeto establecer, con respecto a las bases normativas que establecen los parámetros mínimos que han de cumplirse, previsiones sobre:

- La cimentación, las contenciones y la estructura
- Los estándares deseados de respuesta térmica y acústica de las fachadas y de los cerramientos del edificio
- El saneamiento
- Las ventilaciones
- Los montantes de suministros
- El tipo y el alcance de las instalaciones de energías alternativas
- La estimación de las necesidades de calefacción y aire acondicionado, y la tipología de los equipos necesarios para cubrirlas



- La previsión de las potencias y capacidades de las acometidas de los distintos servicios
- Los niveles de iluminación en las distintas áreas y los equipos necesarios para alcanzarlos
- La previsión de tomas de energía y de datos
- La necesidad o no de falsos suelos
- La previsión de equipos de seguridad frente a la intrusión y al fuego

La lista anterior es tan solo enunciativa: debe ampliarse o adaptarse en función del tipo o de los tipos de edificios y de las actuaciones que compongan un proyecto arquitectónico determinado.

Incidir en un plan maestro sobre la cimentación, las contenciones y la estructura puede parecer innecesario o aventurado, a primera vista. Nada más lejos de la realidad. Se trata de romper con esquemas de actuación que, con demasiada frecuencia, han ocasionado serios problemas durante la ejecución de las obras, derivados de informaciones fragmentarias o simplemente de la falta absoluta de información sobre el suelo.

A título de ejemplo, algunas de las “sorpresas” más habituales son errores causados por deficiencias de información en las secciones estratigráficas, presencia de estratos duros o excesivamente blandos en lugares o a cotas no previstas, restos de cimientos, aparición de depósitos o de construcciones subterráneas, bolos no detectados, existencia de avenamientos o presencia del nivel freático a cotas más altas de las previstas.

De los párrafos precedentes debe concluirse que, para analizar plenamente la viabilidad económica de un proyecto, entendida como la fase previa de un plan maestro, conviene disponer de un estudio geotécnico detallado, así como de las condiciones del entorno y del perímetro del solar de referencia.

Una vez establecida la viabilidad económica, se podrá incidir, de forma genérica pero eficiente, sobre el tipo o los tipos de cimentación previsibles, el sistema o los sistemas de contención de las tierras, tanto provisionales como definitivas, y marcar directrices sobre el sistema estructural propuesto.

Es preciso recordar que las instalaciones requieren espacio y servidumbres de paso, por lo que hay que valorar en todo momento las interacciones de aquellas con los distintos aspectos que determinan y constituyen el programa de necesidades.

Calidades y acabados

La definición de las calidades y los acabados incide sobre diversos aspectos, siendo los más significativos los siguientes:

- El carácter del edificio



- El nivel tecnológico
- La utilización
- El uso
- El coste de mantenimiento
- La durabilidad
- La relación calidad-precio

A continuación, se detallan los aspectos reseñados:

Carácter y nivel tecnológico. El carácter y el nivel tecnológico que se quiere otorgar al edificio son dos de los criterios que han de regir a la hora de escoger las calidades y los acabados, tanto en lo referente a los materiales de construcción propiamente dichos, como a las instalaciones y los servicios.

El carácter y el nivel tecnológico propuestos en el plan maestro se han de determinar, de forma equilibrada, de acuerdo con los planteamientos generales de la propiedad y siempre en consonancia con su función o funciones: sobrio, lujoso, austero, tecnológico, futurista, exótico o historicista, y sus combinaciones, constituyen algunas de las posibilidades a manejar.

En determinados casos, cada vez con mayor frecuencia, el carácter y el nivel tecnológico de los edificios tienden a manifestarse desde el propio diseño de la estructura.

Las tres fotografías siguientes son un buen ejemplo de ello. La de la izquierda corresponde al edificio Media TIC de Barcelona. La fotografía central y la de la derecha pertenecen a dos edificios de Hong Kong, el Banco de Hong Kong y el Banco de China, respectivamente. En la fachada lateral del edificio Media TIC, puede apreciarse la estructura de soporte de los forjados inferiores que cuelgan de la misma. Ello permite disponer de una planta baja completamente diáfana. En la fotografía central, se aprecian las megaestructuras que, seccionalmente, soportan los forjados del edificio del Banco de Hong Kong. En la de la derecha, las diagonales que rigidizan la estructura del edificio del Banco de China.

Puede concluirse que, en los tres edificios, tanto el carácter como el nivel tecnológico quedan reflejados en el tratamiento estructural y en cómo es abordado en el tratamiento de las calidades y los acabados de sus fachadas e interiores.

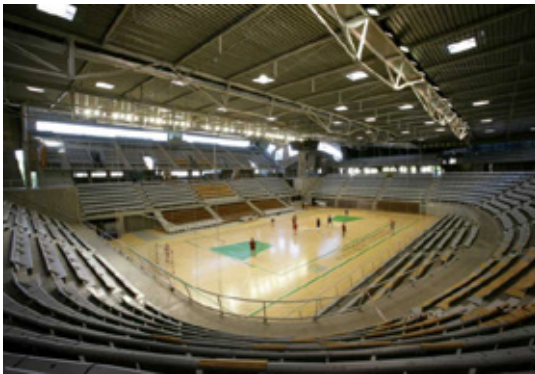




Utilización y uso. La utilización y el uso a que se destinan los espacios también han de ser considerados. Un espacio puede utilizarse de forma privada, semipública o pública. Ello incide sobre el número de personas que diariamente lo ocupan, lo habitan o lo transitan y, por tanto, en el grado de adecuación de determinados materiales en función de su resistencia al desgaste.

Considerar como factor de elección en el plan maestro la adecuación al uso de los materiales garantiza la funcionalidad de las soluciones propuestas. Ello se traduce en aspectos tales como el grado de adherencia de los pavimentos, las texturas de los acabados, su resistencia a la flexión y al impacto, el aislamiento térmico o la absorción acústica.

La fotografía inferior izquierda corresponde a un pavimento de parqué para uso deportivo y la fotografía inferior derecha, a un parqué doméstico. De la consideración de ambas, se concluye que un mismo material de base o genérico, en este caso un parqué, puede tener unas prestaciones y unos precios muy diversos en función de su utilización y de la intensidad de uso prevista.



Costes de mantenimiento

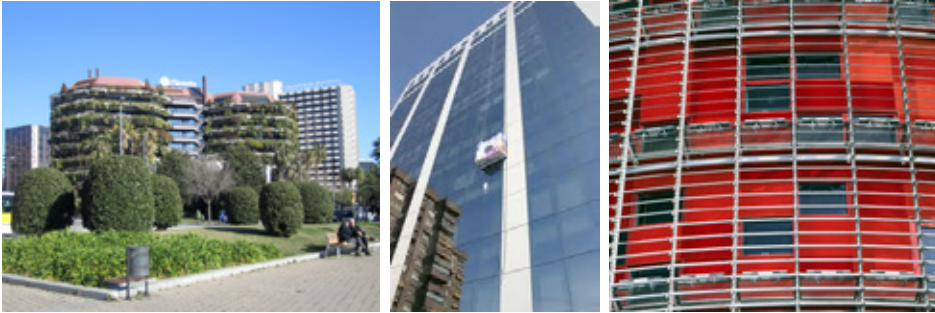
También deben analizarse los costes de mantenimiento que se está dispuesto a afrontar, en función de la obtención de unos fines determinados, para mantener, en todo caso, unos valores que estén dentro de los parámetros de la racionalidad.

A título de ejemplo, la presencia de jardineras, un acuario o cualquier otro motivo ornamental contribuyen a crear un ambiente agradable; sin embargo, es preciso ponderar si tales elementos son compatibles con la funcionalidad y la economía de mantenimiento de un edificio determinado en el momento de plantear un plan maestro.

En los planes maestros, con relación a los conceptos de utilización y uso han de establecerse unos criterios, a aplicar por los proyectistas, sobre la facilidad y la seguridad de accesos, y la previsión de equipos y espacios para garantizar el mantenimiento correcto del edificio.



Las tres fotografías siguientes permiten apreciar el contraste de planteamientos, en cuanto a mantenimiento de fachadas. En el edificio de la fotografía de la izquierda, las fachadas se configuran, en buena medida, por la presencia de plantas ornamentales. En el edificio de la fotografía central, se ha dispuesto una góndola para atender al mantenimiento y a la limpieza de la fachada. En el edificio de la fotografía de la derecha, pueden apreciarse los pasos de mantenimiento de la fachada, colocados como si se tratase de un andamio permanente.



Durabilidad

La durabilidad de los materiales ha de ponderarse, en el plan maestro, en función del período de vida útil previsto para el edificio y para sus dependencias, con objeto de optimizar la rentabilidad de la inversión.

Como ejemplo, cabe citar que los acabados interiores de un hotel tienen, habitualmente, un período de vida más corto que los de una vivienda. Ello puede traducirse en la elección de aquellos materiales de acabado que, dentro de una misma gama, tengan una vida útil que se corresponda con los períodos de renovación.

La elección de las calidades y los acabados en el plan maestro, considerando la relación calidad-precio, permite obtener un producto adecuado a los requerimientos y a un coste razonable.

El precio de un mismo material puede variar sustantivamente por el hecho de ser nacional o de importación, aunque sus prestaciones sean muy similares. Otro factor determinante en las variaciones significativas de precio son las marcas. El equipo redactor del plan maestro debe ponderar cuándo han de intervenir las marcas como argumento potenciador de las ventas, y cuándo estas han de quedar relegadas a un segundo plano.

Imagen corporativa

Cuando el objeto del plan maestro es un proyecto para una gran empresa, la expresión pública de la imagen corporativa constituye un elemento esencial. Debe definirse su ubicación o ubicaciones, su tamaño y, lo que es más importante: del propio edificio ha de emanar la imagen de la empresa.

Las fotografías siguientes corresponden a edificios de dos empresas punteras. En ellas se observa la diferente fortuna de la presentación de su imagen cor-



porativa. En la de la izquierda, la imagen corporativa queda perfectamente legible. Además, los logos que coronan las torres tienen un recorrido circular, lo que les otorga un carácter dinámico y potencia su legibilidad desde todos los ángulos. En la fotografía de la derecha, el logo no resalta sobre el fondo y es difícil de leer.



2.3.3. Estimación de los costes unitarios y totales

La estimación de costes y su comparación ulterior con el potencial de venta son el factor fundamental que determina la viabilidad de una operación en el mundo de los negocios. Por ello, es preciso que, desde las primeras fases de redacción de un plan maestro, el equipo redactor se ocupe en profundidad del mismo.

Se trata de establecer un mecanismo simple y fiable que determine la conveniencia de seguir avanzando o de suspender el proceso. El equipo redactor del plan maestro ha de contar con especialistas en la determinación de costes y disponer de una estructura que prevea tanto los costes directos como los indirectos de la operación.

En el ámbito de la construcción, los costes directos son aquellos que están indisolublemente ligados a la obtención del edificio, eso es, los de los materiales, la mano de obra y los medios auxiliares.

En la construcción, los costes indirectos son los derivados de la necesidad de documentar y financiar las acciones que permiten realizar el edificio. A continuación, se detallan de forma genérica los más comunes de ambos grupos.

- Costes directos:
 - Estudios previos
 - Adquisición del solar
 - Honorarios técnicos del proyecto y dirección de obra
 - Licencias y permisos
 - Costo de construcción

- Costes indirectos:



- Actos jurídicos documentados
- Gastos financieros y de administración
- Comercialización y posventa

La estimación de costes efectuada en un plan maestro tiene por objeto determinar el “presupuesto objetivo de partida” (POP), cuyo monto total se entiende como el máximo admisible para el proyecto en cuestión. A partir del mismo, el equipo proyectista y el equipo auditor del proyecto establecerán estrategias y adoptarán soluciones para tratar de reducirlo, sin renunciar por ello a los factores de calidad y de tiempo establecidos en el plan maestro.

La palabra *objetivo* contenida en el POP indica que el valor o los valores consignados se han obtenido mediante análisis detallados de edificios de características similares y, en su caso, consultas efectuadas a profesionales sobre aspectos concretos.

El POP está limitado por el valor máximo de la construcción, compatible con el margen de beneficio de la empresa promotora, calculado en función de los valores potenciales de venta del mercado. Ello no implica que se deba alcanzar necesariamente esta cota; más bien es preferible que se estructure y justifique con un cierto margen de reducción a la baja, tanto para hacer frente a posibles contingencias como por el hecho que un estudio más detallado puede permitir ajustes a la baja de los costes.

El equipo redactor del plan maestro, a partir de la estimación de las superficies, los volúmenes y los usos que han de configurar el edificio, de acuerdo con el programa de necesidades y el gálibo disponible bajo y sobre rasante, debería proceder de la forma que se indica a continuación.

Un POP puede empezar a elaborarse con valores unitarios por metro cuadrado de construcción global. Estos se obtienen mediante la ponderación de los datos de las distintas superficies, de las calidades empleadas y de los resultados económicos obtenidos en la construcción de edificios similares.

Para obtener este tipo de datos, es preciso disponer de una experiencia profesional y de un fondo documental significativo. La posibilidad de tener acceso a los mismos se reduce si se trata de un edificio exclusivo. Dicho de otro modo: es relativamente fácil y preciso estimar los costes de construcción de un bloque de viviendas, mientras que hacer lo mismo para un edificio singular está al alcance de pocos profesionales, tanto por la dificultad de obtener información contrastada y fiable como por el amplio margen de costos que puede haber en función de sus soluciones constructivas y formales.

Una primera referencia puede obtenerse, en todo caso, de publicaciones especializadas, en las cuales se actualizan periódicamente los costes de construcción unitarios por metro cuadrado de los tipos más comunes de edificios.

Los distintos valores unitarios que conforman los capítulos del presupuesto (movimiento de tierras, cimentación, estructura, impermeabilizaciones...) se presentan descompuestos en porcentajes, de modo que es posible estimar, sobre la base del coste unitario total, la previsión de los costes por capítulos.



Puede afinarse el proceso estableciendo, para cada edificio, una lista de usos con costes de construcción similares. Por ejemplo: espacios destinados a aparcamiento bajo rasante, espacios destinados a locales comerciales, espacios destinados a oficinas y espacios destinados a instalaciones y servicios sobre rasante.

El procedimiento responde al esquema siguiente:

- A cada uno de los espacios homogéneos se le asignan una calidad y un acabado determinados. A tal fin, deben tenerse en cuenta las instalaciones y los servicios.
- Se determinan las superficies respectivas de cada uno de ellos.
- Se ponderan los valores unitarios de otras experiencias similares, al alza o a la baja, en función de sus calidades y acabados.
- Por último, se aplican dichos valores a las superficies indicadas, y se obtiene así el valor total máximo previsto para la construcción por el plan maestro o POP.
- Como, en la mayoría de las ocasiones, resulta complejo disponer de datos contrastados que abarquen la totalidad del inmueble objeto del plan maestro, es preciso establecer mecanismos de control, solicitando presupuestos o una estimación del precio unitario a industriales competentes. Los resultados obtenidos deberán aplicarse a los parámetros de configuración general del inmueble: las superficies, los volúmenes, el número de plantas o la previsión de aislamiento global, por citar algunos de los más significativos.

2.3.4. La consideración del tiempo

El tiempo es dinero y es oportunidad. Una misma acción, que potencialmente sería rentable en una situación económica determinada, si se lleva a cabo fuera de tiempo puede ocasionar un desastre financiero.

En los apartados anteriores, se ha hecho referencia, en el desarrollo de la estructura de un plan maestro, a los aspectos relacionados con la calidad y el precio. Según el orden de análisis establecido, ahora hay que analizar cómo organizar y planificar el tiempo en un plan maestro.

Como se ha expuesto en las consideraciones generales, el plan maestro de un proyecto arquitectónico es equivalente a una guía que establece y acota unos objetivos para obtener la documentación necesaria para construir un edificio determinado.

Bajo estas premisas, en los apartados precedentes se ha destacado que el plan maestro ha de ofrecer un margen de maniobra atractivo para el equipo proyectista.



Siguiendo la misma tendencia conceptual, el factor tiempo ha de limitarse a establecer, al igual que los aspectos de prediseño y el POP, una serie de líneas rojas que no deben ser superadas.

Para que la estimación de los tiempos sea la adecuada, es preciso que el equipo redactor disponga de elementos en su composición que no solo conozca el proceso de generación del proyecto y de la construcción. El equipo redactor de un plan maestro también ha de ser capaz de establecer, de forma precisa, los procedimientos y los tiempos necesarios para llevar a cabo su gestión.

Es preciso considerar, por tanto, los tiempos y los medios necesarios para cumplir con los trámites administrativos, los tiempos y los medios precisos para efectuar las contrataciones, el tiempo que durará la construcción, en función de los medios de que se disponga y, por último, el tiempo y los medios necesarios para la puesta en marcha del edificio y sus instalaciones y para el proceso de posventa.

El apartado precedente muestra que el tiempo y los medios están absolutamente relacionados. Sin embargo, para la redacción de un cronograma, basta con fijar las fechas de inicio y de terminación de las grandes fases de la obra, con los solapes que, en su caso, procedan.

El equipo redactor del plan maestro ha de ser el primero en respetar la previsión de tiempo que el promotor haya establecido, de forma razonada y razonable, para la ejecución del trabajo. Igualmente, en función de las características y necesidades del edificio, ha de determinar los tiempos necesarios para la elaboración y el seguimiento del proyecto, para el cumplimiento de los trámites administrativos y de gestión, así como para la contratación, la construcción, la puesta en marcha y la posventa del edificio o de los edificios resultantes del proceso.

2.3.5. Algunos mecanismos de análisis y comparación

A continuación, se detallan algunos mecanismos que pueden facilitar tanto la redacción del plan maestro como la elección, técnicamente razonada, entre los planteamientos de dos o más proyectos concurrentes. Como puede observarse, se trata de parámetros "medibles" o ponderables. Los aspectos relativos a la estética, al estilo, a la composición o a la coherencia orgánica proyecto, del edificio o del complejo en cuestión han de ser necesariamente valorados subjetivamente, por su condición de intangibles.

La lista de mecanismos reseñados tiene carácter genérico y orientativo, y en ningún caso es limitativa. Está dirigida a dar respuesta a aspectos relativos a la calidad, al precio y al tiempo. Es la siguiente:

- Coste de construcción por metro cuadrado
- Costes de gestión y mantenimiento, y rendimientos de explotación
- Ratios de costes de construcción por capítulos
- Relación entre superficie construida y superficie útil
- Superficie ocupada por los servicios con respecto al total de la planta y del inmueble



- Metros lineales de fachada en relación con la superficie de la planta
- Superficie ocupada por unidad de referencia.
- Parámetros derivados de la técnica constructiva.

El orden en que estos están expuestos no supone prioridad de unos datos frente a otros. Los tres primeros son de carácter económico, los cuatro siguientes son de orden dimensional. El último comprende un amplio espectro de posibilidades de análisis, orientadas al uso de la técnica constructiva más apropiada para cumplir con un fin concreto. Todos ellos pueden ser más o menos útiles en función de cuáles sean las finalidades perseguidas.

Se concluye que es el conjunto de las informaciones obtenidas del análisis de un proyecto o de un edificio lo que permite constatar la adecuación de la solución propuesta a unos requerimientos determinados. Un solo dato o un número reducido de ellos no permiten establecer conclusiones válidas.

La diversidad de situaciones, tamaños y tipologías de edificios existentes evidencian la necesidad de establecer comparaciones entre edificios homogéneos o, por lo menos, afines.

Coste de construcción por metro cuadrado

Es un dato fácil de obtener mediante el cociente del coste por la superficie del elemento considerado. Además del coste de construcción, en determinados casos pueden y han de considerarse los costes derivados de la adquisición del solar, los honorarios técnicos, las tasas, los gastos de gestión, etc.

Las grandes inversiones públicas deberían valorarse considerando, entre otros muchos factores, el cociente entre el coste y el número de personas de su entorno inmediato. Se trata de un simple “número gordo” que, de haberse calculado en tiempo y forma, habría evitado los serios problemas económicos y de viabilidad que presentan, por sobredimensionados, muchos de los equipamientos culturales construidos durante la burbuja inmobiliaria.

Costes de gestión y de mantenimiento, y rendimientos de explotación

Habitualmente, estos conceptos se expresan por anualidades. Son fácilmente transformables, para facilitar su comparación, a un valor por metro cuadrado y año.

Por coste de gestión se entiende el generado por el personal asignado al funcionamiento orgánico de un edificio o complejo determinado, más el producido por su actividad. En él se integrarían los consumos energéticos, así como las tasas de recogida de residuos y de la administración.

A título ilustrativo, en una biblioteca, además del personal es preciso invertir en libros, en mobiliario, en consumibles, etc.

Los costes de mantenimiento son los necesarios para conservar el edificio en un estado correcto de servicio. Comprenden la limpieza, el cuidado de las instalaciones y la previsión económica necesaria para efectuar, con la periodicidad prevista en los planes de mantenimiento, trabajos en cubiertas, fachadas e in-



teriores. Los costes de mantenimiento también pueden asimilarse a un importe por metro cuadrado y año.

Los rendimientos de explotación son los ingresos derivados de la actividad que se genera en el interior del edificio. Si se trata de una actividad privada, el edificio se plantea como negocio que ha de rendir beneficios. En cambio, en las actividades públicas y de servicio, se pueden asumir ciertos déficits. Corresponde a los responsables políticos ponderar los valores máximos de déficit, al igual que los técnicos han de llevar a cabo los proyectos adecuados o, en su defecto, informar sobre las dificultades para alcanzar los fines propuestos.

Ratios de construcción por capítulos

Para facilitar un análisis económico más detallado, a partir de los importes de los capítulos que conforman un presupuesto de edificación, es factible determinar los porcentajes que suponen cada uno de ellos sobre el total. El mismo análisis puede hacerse, si es preciso, descendiendo al nivel de las partidas.

De hecho, efectuar estudios comparativos entre diferentes ofertas y, en su caso, homogeneizarlas es uno de los mecanismos que se emplean habitualmente en la adjudicación de obras.

Las revistas especializadas en la divulgación de precios de edificación publican tanto los costes globales de construcción de las tipologías edificatorias más comunes como las ratios por capítulos.

Los archivos de las empresas contienen información de primera mano sobre los costes reales y las desviaciones presupuestarias, aunque en pocas ocasiones llega a divulgarse a escala profesional debido al carácter confidencial de este tipo de datos.

La escasez o la simple carencia de datos económicos fiables explican gran parte de los errores en la estimación de costes de proyectos de gran envergadura. En otros casos, en los que la política manda, los técnicos pasan a un segundo plano.

Relación entre superficie construida y superficie útil

La superficie construida de una edificación es la suma de las superficies que se encuentran cubiertas y delimitadas por el plano exterior de las fachadas, en cada una de las plantas del inmueble. Las terrazas descubiertas se contabilizan al 50 % de su superficie.

La superficie útil es aquella que puede ser ocupada físicamente. Por tanto, es el resultado de restar a la superficie construida, en cada una de las plantas, el espesor de los muros, las divisorias y los elementos estructurales, así como los espacios ocupados por patios y conductos.

La comparación de las relaciones superficie construida-superficie útil entre un edificio de fábrica de mampostería, otro de fábrica de ladrillo y un tercero con estructura diáfana y cerramientos ligeros da valores orientativos del orden de 1,25, 1,12 y 1,05, respectivamente.



Superficie ocupada por los servicios con respecto al total de la planta y del inmueble

Este parámetro permite, al compararlo con modelos reconocidos, verificar si la superficie del conjunto de espacios destinados a elementos comunes está dimensionada correctamente. Los elementos comunes incluyen vestíbulos, cajas de escaleras, ascensores y conductos de todo tipo.

En los edificios de oficinas, los elementos comunes incluyen también el espacio destinado a servicios sanitarios y, en su caso, el espacio ocupado por las plantas técnicas.

Es preciso considerar, en este caso, que el valor numérico debe ponderarse por la calidad de los espacios generados en función de la ubicación de dichos servicios.

En esta tipología edificatoria, la ratio del conjunto de los servicios con respecto a la superficie de la planta es del orden del 30 %. Suelen situarse en la zona central de la planta, mientras que la zona perimetral en contacto con las fachadas se reserva para usos más nobles. Sin embargo, el uso de "soluciones sostenibles" o, simplemente basadas en conceptos racionalmente discutibles, incrementa la ratio hasta superar, en algunos casos, el 45 %, como se detalla en el capítulo 4 titulado "La construcción aplicada a la edificación en altura".

Metros lineales de fachada en relación con la superficie de la planta

Este parámetro indica la potencialidad del edificio o del sector de edificio considerado. Cuanto mayor sea este cociente, crecen las posibilidades de disponer de luz natural y asoleo y de ventilación directa del exterior.

Al igual que en el caso anterior, es preciso ponderar el dato tomando en consideración aspectos tales como la orientación, la calidad de las vistas o los ruidos ambientales.

Superficie ocupada por unidad de referencia

Las unidades de referencia se establecen en función del uso del edificio. Permiten determinar, por comparación con ejemplos reconocidos, si el aprovechamiento obtenido del espacio disponible es correcto o presenta déficits por exceso o por defecto.

Este parámetro es aplicable a edificios o a sectores de edificio con usos muy determinados. Es el resultado del cociente entre la superficie construida y el número de unidades consideradas. Algunos ejemplos son la superficie construida por plaza de aparcamiento, la cama de un hospital, la habitación de un hotel, un comensal en un salón comedor o un espectador en un auditorio.

Parámetros derivados de la técnica constructiva

Bajo este concepto, pueden agruparse multitud de aspectos sobre los cuales establecer cuadros comparativos: las luces de una estructura, los pesos por



metro cuadrado de los forjados y sus sobrecargas de uso, el consumo de acero por metro cuadrado de una estructura determinada o las cuantías de acero empleadas en una construcción o en parte de ella. Todo ello puede ser repercutido, si se desea, sobre la superficie construida.

Asimismo, dentro de este apartado pueden tratarse otros aspectos de estudio y análisis, como los consumos energéticos o las emisiones de CO₂, los tiempos de ejecución y la deconstrucción y puesta en valor de los residuos de la construcción.

2.4. Algunos ejemplos

2.4.1. Introducción

La evidencia muestra que son mayoría los edificios privados y públicos racionalmente diseñados y técnicamente bien construidos. En su concepción general, acaso sean más o menos vanguardistas o experimentales, y más o menos austeros en cuanto al dimensionado de sus espacios y/o a los materiales empleados.

Todos ellos tienen en común la obtención de unos resultados coherentes, en cuanto a previsiones, resultados y costes económicos derivados de su construcción. Puede concluirse, pues, que en la mayoría de los edificios se consiguen unas ratios calidad-precio correctas. Sin embargo, ello no excluye que en determinadas situaciones se alteren las condiciones de partida y se obtengan unos resultados alejados de los objetivos propuestos.

La lógica exige actuar del todo a la parte. En consecuencia, los primeros análisis y las correcciones subsiguientes han de orientarse hacia aquellos aspectos que, por diversas circunstancias, han quedado más alejados de la racionalidad y/o de los parámetros de eficiencia en la relación calidad-precio.

Por desgracia, no es difícil hallar ejemplos de proyectos distorsionados e informaciones sobre los mismos en los medios de comunicación, en que se detallan situaciones y circunstancias, cuando menos, desafortunadas. Dichos ejemplos quedan recogidos, de forma sucinta, en el apartado siguiente, denominado "Constatación de otras realidades". Los comentarios se han centrado, fundamentalmente, en aspectos técnicos.

2.4.2. Constatación de otras realidades

A la vista de los resultados técnicos y económicos de algunos de los equipamientos culturales de mayor relevancia realizados en nuestro país recientemente, se pone de manifiesto la necesidad de coordinar políticos y técnicos para racionalizar y optimizar el gasto público, no solo en la inversión inicial, sino considerando también los costes de mantenimiento.

A continuación, se ofrecen datos y resultados de algunos de ellos, de forma esquemática:



- Centro Niemeyer de Avilés
- Palacio de Congresos de Oviedo
- Cidade da Cultura
- Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia

Es evidente que la lista podría ser mucho más extensa, pero se limita a unos pocos casos concretos muy representativos. La inversión en "cultura", hasta que la crisis y el estallido de la burbuja inmobiliaria han puesto en evidencia excesos y desatinos de difícil reversibilidad, ha sido un campo abonado en que han sembrado políticos y técnicos, con intencionalidades diversas pero concurrentes.

Centro Niemeyer de Avilés

El Centro Niemeyer de Avilés, dedicado a fines tan nobles como la educación, la cultura y la paz, fue inaugurado el 3 de marzo de 2011. Su coste de construcción ascendió a los 43 millones de euros, asociados a un presupuesto anual de mantenimiento y funcionamiento de 3 millones de euros. Seis meses después de la inauguración, su gestión y su continuidad fueron cuestionadas por el gobierno asturiano.

Tiene su origen en el proyecto que el arquitecto brasileño Oscar Niemeyer (1907-2012) obsequió a la Fundación Príncipe de Asturias. Pretendía propiciar en Avilés, una ciudad castigada por la reconversión siderúrgica, un [cambio urbano y de modelo de desarrollo similar al que había generado en Bilbao](#) el Museo Guggenheim, sin considerar, entre otros muchos condicionantes, que Avilés tiene una población de 84.000 habitantes, mientras que la de Bilbao es de más de 350.000.

Las cifras hablan por sí solas. La construcción costó a todos y a cada uno de los habitantes de Avilés 512 euros, y el mantenimiento requiere 62,50 euros cada año.

La fotografía inferior izquierda permite comparar el tamaño del centro con el de la población; la de la derecha muestra la gran plaza con la cúpula y la torre mirador.

El Centro Niemeyer consta de cinco piezas a la vez independientes y complementarias:





- **La plaza.** Abierta al público, en ella se desarrollan actividades culturales y lúdicas.
- **El auditorio.** Tiene un aforo para unos 1.000 espectadores, con la peculiaridad de un escenario que se abre hacia el auditorio, pero que también se puede abrir hacia la plaza para las actuaciones al aire libre, y hacia el club para pequeñas actuaciones. También dispone de 3.000 m² para exposiciones fotográficas y pictóricas (en el *foyer*).
- **La cúpula.** Es un espacio expositivo diáfano de aproximadamente 4.000 m² para exposiciones de todo tipo y tiene funciones de museo.
- **La torre.** Mirador sobre la ría y la ciudad, de 18 metros de altura, donde actualmente se ubican el restaurante y la coctelería. Ambas instalaciones se encuentran en un entorno agradable para relajarse contemplando las vistas sobre la ría, la ciudad y el propio centro cultural.
- **El edificio polivalente.** Alberga el Film Centre, el gastrobar, varias salas para reuniones, conferencias, prensa, exposiciones..., la ludoteca y la tienda.

Las cifras precedentes indican que el conjunto se dimensionó muy por encima de las necesidades y de las posibilidades reales de la población. En la actualidad, supone más una carga que un beneficio, puesto que los objetivos previstos en relación con la atracción de turismo y como centro de conferencias y convenciones no se han cumplido.

Evidentemente, después de la inversión realizada, las autoridades no pueden abandonarlo a su suerte, por lo que seguirán invirtiendo dinero público para conservarlo en estado letárgico y utilizarlo muy por debajo de sus potencialidades.

Como epílogo y confirmación de lo indicado, basta con leer el siguiente párrafo de un extenso artículo publicado en *La Voz de Avilés* <lavozdeaviles.es> el 15 de noviembre de 2011:

“Primero fue el apagado de la iluminación nocturna en el mes de octubre, el domingo fue el cierre del cine y ayer el Centro Niemeyer anunciaba una reducción de los días que se mantienen abiertas sus instalaciones. Continúa así el cierre progresivo del centro cultural, ya que la fundación que lo dirige sólo tiene autorización para gestionar los edificios hasta el próximo 15 de diciembre y el Principado no parece que de momento vaya a realizar una nueva cesión. Hasta ahora, el Centro Niemeyer solo cerraba los lunes, pero desde hoy también lo hará los martes y los miércoles. Solo permanecerá abierto, por tanto, de jueves a domingo, cuatro días a la semana.”

Palacio de Congresos de Oviedo

Esta obra de Santiago Calatrava es también conocida, popularmente, como “o centollo”. Iniciada en 2003 e inaugurada en mayo de 2011, es una muestra de desmesura formal y física, un ejemplo claro de que, aunque algo pueda técnicamente llevarse a cabo, no por ello debe presuponerse, que su realización va a resultar positiva y va a satisfacer los fines propuestos, sin realizar antes detallados estudios previos y el correspondiente plan maestro.



Su construcción costó 350 millones de euros; teniendo en cuenta que Oviedo es una ciudad de unos 225.000 habitantes, ello supone una incidencia por habitante de 1.555 euros. Se desconocen los costes anuales de mantenimiento del Palacio de Congresos, pero es evidente que su funcionamiento depende de subvenciones públicas.

Además del auditorio, con capacidad para 2.150 localidades, tiene trece salas de reuniones, una sala polivalente y zonas de exposición interiores y exteriores, con una superficie construida que supera los 15.500 m². Ello permite acoger, simultáneamente, a 3.500 personas. Su entorno urbano dispone de una superficie para uso público de más de 30.000 m².

El conjunto se completa con un hotel con 155 habitaciones y un aparcamiento para 1.872 plazas.

Es preciso indicar que la ciudad de Oviedo ya contaba con el Palacio de Congresos-Auditorio "Príncipe Felipe", con capacidad para 2.000 personas, que había sido inaugurado en la primavera de 1999.

La fotografía inferior izquierda muestra el tamaño colosal del edificio, desproporcionado con respecto a los edificios del casco urbano de Oviedo. La fotografía inferior derecha permite apreciar las dificultades técnicas que se tuvieron que resolver para construir los volúmenes proyectados.

En la mayoría de las ocasiones, el sobrecoste generado para resolver temas formales no tiene incidencia en la funcionalidad del edificio y tampoco es apreciado, en toda su dimensión, por el ciudadano medio.



El párrafo siguiente, extraído del artículo "El edificio Calatrava se agrieta" de Federico Simón y Javier Cuartas, publicado en El País del viernes 10 de junio de 2011, no solo ilustra este caso concreto, sino que es el reflejo de una situación. La crisis económica y el "pinchazo" de la burbuja inmobiliaria han frenado este fenómeno, de forma eficiente aunque dolorosa, al menos durante un largo período de tiempo. Esta experiencia no debe caer en el olvido si se quiere trazar adecuadamente el futuro.

"Asiduo desde hace tiempo de los procesos judiciales y protagonista de culebrones jurídico-financieros acordes con el calibre de su indudable sabiduría y de sus proyectos, Calatrava da que hablar, aunque él no hable casi nunca. Y todo el ar-



gumentario de su prestigio global, ganado durante lustros a base de emocionar a la gente con apabullantes y revolucionarias obras de ingeniería civil –muchas de ellas inspiradas en formas de pájaros–, pero también cimentado sobre proyectos multimillonarios gracias a la *filantrópica* firma de algún que otro político sin escrúpulos, contrasta brutalmente con un inacabable rosario de problemas de todo tipo.”

La fotografía inferior izquierda muestra el interior del auditorio; la de la derecha, una imagen de conjunto de la obra en las últimas fases de construcción.



Cidade da Cultura

La Cidade da Cultura erigida en el monte Gaiás, cerca de Santiago de Compostela, ha tenido un largo proceso de construcción, debido a su desmesura.

El proyecto fue iniciado en 1999, las obras comenzaron en 2001 y no terminaron hasta 2011. El presupuesto inicial de 110 millones de euros ascendió finalmente a 487 millones de euros. Así pues, el coste por habitante es el más alto de los casos analizados hasta ahora: 5.126 euros, más de tres veces el coste proporcional del Palacio de Congresos de Oviedo o el de la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia.

El proyecto se debe al arquitecto Peter Eisenman. A partir del vaciado de la montaña, pretende reproducir el trazado del casco histórico de Santiago. La fotografía del encabezamiento de la página siguiente a la izquierda muestra el aspecto de la zona en 2001, antes del inicio de las obras. La fotografía inferior derecha corresponde a la maqueta del proyecto.

En su conjunto, la Cidade da Cultura tiene una superficie de 125.000 m², mientras que la ciudad de Santiago de Compostela tiene una población de 95.000 habitantes. Sobran los comentarios.

Entre otras dependencias, el equipamiento cultural dispone de una biblioteca con capacidad para un millón de volúmenes, aunque en la actualidad está semivacía.



El desarrollo de los medios informáticos está relegando el papel a usos más testimoniales que prácticos. Cada vez son más los libros antiguos informatizados y consultables sin necesidad de desplazarse. Al parecer, los responsables del proyecto actuaron más con mentalidad de pasado que de futuro.

Entre las múltiples anécdotas de su proyecto y construcción, destacan las siguientes:

- En su construcción se utilizó piedra brasileña, cuando Galicia dispone de gran abundancia de granito de primera calidad.
- Los trabajos de construcción se plasmaron en un documental de la serie "Megaconstrucciones". En el mismo, los obreros hacen comentarios jocosos sobre la complejidad técnica de la obra y los costes de determinados materiales y elementos constructivos.
- El programa *Salvados* de La Sexta realizó un reportaje en que el periodista Jordi Évole ponía en evidencia tanto los errores conceptuales del proyecto como el derroche de fondos públicos que ha comportado y la escasa utilización del equipamiento por parte de la población.

La Cidade da Cultura, una vez construida e inaugurada, seguirá siendo un lastre económico para la comunidad gallega, puesto que derribarla o adaptarla a otros usos constituiría una nueva fuente de polémica que los políticos no parecen muy dispuestos a generar en la situación actual. Sin duda, a medio plazo, cuando las





aguas se hayan serenado, será preciso abordar seriamente el problema y corregir la sangría económica que supone su mantenimiento para el erario público.

Las fotografías anteriores muestran dos aspectos de la compleja morfología de la Cidade da Cultura, una vez terminada.

Obsérvese la “lectura oficial” de la realidad, extraída de la página web del centro cultural:

“Situada en Santiago de Compostela y concebida como un polo cultural de gran envergadura, dedicado al conocimiento y a la creatividad contemporánea, la Ciudad de la Cultura de Galicia se perfiló desde sus orígenes como un instrumento que, conjugando pasado y futuro, permitiera a Galicia abordar de manera integral un ámbito estratégico para su desarrollo: el de la cultura.

Después de diez años de un intenso y rico debate, y de un cuidado proceso constructivo, la Cidade da Cultura de Galicia se pone en marcha. Con la apertura de la Biblioteca y del Archivo de Galicia, inaugurados por los Príncipes de Asturias en la simbólica fecha del 11 de enero de 2011 (11/1/11), se abre una nueva etapa en la que este proyecto cobra vida.”

Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia

En su construcción, en el espacio del antiguo cauce del Turia, se han invertido 1.300 millones de euros. En la página web de la Comunidad Valenciana, en la sección relativa a los Parques de Ocio y Temáticos, puede leerse: “Este espacio de ocio, en que la cultura es protagonista, basa su actividad en tres grandes áreas temáticas: Arte, Ciencia y Naturaleza. Así, con el objetivo de formar divirtiendo, se reúnen en sus 350.000 m² el Palau de les Arts, el Museu de les Ciències, el Oceanogràfic, el Hemisfèric, el Umbracle y el Àgora.

La fotografía aérea siguiente muestra una panorámica general de la Ciutat de les Arts i de les Ciències. En primer término, el Palau de les Arts, a continuación el Hemisfèric, el Umbracle y el Museu de les Ciències y, al fondo, el Oceanogràfic.



La primera consideración que cualquier planificador o autor de un plan maestro debe hacerse ante cualquier problema de entidad es determinar la incidencia de la inversión.

La ciudad de Valencia tiene una población de 810.000 habitantes. El cociente coste/habitante da una cifra de 1.605 euros. Además, aun siendo el valor de la inversión inicial muy elevado, el mayor problema se centra en el mantenimiento del complejo. Con el planteamiento inicial y las tarifas aplicadas, el parque temático es incapaz de generar, si no beneficios, ni siquiera una balanza equilibrada entre ingresos y gastos. Por tanto, sin la aportación constante de dinero público, es totalmente insostenible.

Si bien pudo costearse su mantenimiento en épocas florecientes, resulta palmario que en la actualidad la Ciutat de les Arts i les Ciències se ha transformado en un problema añadido a los muchos que debe atender el erario público de la Comunidad Valenciana. Una vez superada la crisis económica, se deberán seguir aplicando medidas de austeridad con objeto de tratar de equilibrar ingresos y gastos.

A continuación, se analizan, desde el punto de vista técnico y económico, cada uno de sus edificios y áreas constituyentes.

Palau de les Arts. Fue inaugurado en 2005 como teatro de ópera, después de que el presupuesto inicial de 84 millones de euros acabara ascendiendo a 384 millones. Ha sufrido diversos contratiempos, como la avería de la plataforma principal del escenario en 2006 y un par de inundaciones en 2007, que volvieron a paralizar dicha plataforma y dañaron los sistemas eléctricos.

Las dos fotografías siguientes ofrecen, desde distintos ángulos, una visión general del edificio.

Sus principales dependencias son las siguientes:

- **Sala principal:** tiene una capacidad para 1.481 plazas, distribuidas entre el patio de butacas y cuatro niveles de palcos, y fue concebida fundamentalmente para albergar representaciones de ópera.
- **Aula magistral:** tiene un aforo de 400 personas. Es una sala destinada a conferencias o a conciertos de cámara.
- **Auditorio:** tiene una capacidad para 1.500 espectadores. Desde su inauguración, ha sufrido graves problemas de aislamiento acústico, que final-





mente se han resuelto. El ruido exterior era audible desde el interior del edificio, lo cual entorpecía el desarrollo normal de las actividades.

- **Teatro Martín y Soler:** edificio adyacente al Palau, con una capacidad para 400 personas. Se destina a teatro, danza y música. Sufrió considerables daños en las inundaciones de 2007, lo cual retrasó su inauguración.

El edificio tiene una superficie construida de 37.000 m². El presupuesto anual de la ópera se cifró en 50 millones de euros, de los cuales 25 los aportaba la Generalitat Valenciana y 1 el Ayuntamiento. Sobre la base de estos datos, para generar los 24 millones de euros restantes, suponiendo un importe de 100 euros como precio medio de una entrada, sería preciso llenar al 100 % el teatro 160 días al año.

Según informaciones publicadas por el periódico digital *Levante. El Mercantil Valenciano* <Levante-emv.com> el 17 de julio de 2012, el edificio fue sometido a un cierre técnico durante el verano para ahorrar 200.000 euros. En dicha noticia, podía leerse: “Los gastos de mantenimiento son uno de los lastres del proyecto de les Arts. Se calcula que en total alcanzan los cuatro millones de euros, que el cierre técnico intenta reducir.”

Definitivamente, la desmesura de los técnicos y de los políticos tiene un precio muy elevado que acaban pagando los ciudadanos.

Museu de les Ciències. Fue inaugurado a finales del año 2000. En la página web oficial de la Ciutat de les Arts i de les Ciències, se destaca que es el mayor de España y presenta los datos siguientes:

- 220 m de largo, 80 de ancho y 55 de altura
- 42.000 m² de superficie construida, en planta baja y tres plantas piso, 26.000 de los cuales están dedicados a exposición
- 20.000 m² de superficie acristalada, con más de 4.000 placas de vidrio
- Se precisaron 58.000 m³ de hormigón y 14.000 toneladas de acero para su construcción.

La fotografía inferior izquierda muestra un plano general del museo. La fotografía de la derecha, un aspecto del interior del edificio, en que dominan los espacios diáfanos, de concepción más escultórica que funcional.





Sin necesidad de efectuar grandes cálculos sobre el coste de la inversión inicial, simplemente considerando el coste de mantenimiento y conservación del material en exposición, resulta muy difícil pensar que son suficientes los 8 euros que costaba la entrada de adulto en 2012.

Oceanogràfic. Fue abierto al público en 2003. En la página web oficial de la Ciutat de les Arts i les Ciències, se indica que se trata del complejo marino mayor de Europa. Su uso fundamental es de carácter científico, lúdico y educativo.

Sus datos técnicos más significativos son los siguientes:

- 110.000 m² de superficie. (La ciudad de Valencia tiene, aproximadamente, 810.000 habitantes.)
- 42 millones de m³ de agua salada
- Un delfinario, de los mayores del mundo; 26 millones de m³ de agua y una profundidad de 10,50 m
- 6.761 m² de placas de metacrilato de hasta 33 cm de espesor
- 150.000 m³ de hormigón y 15.000 toneladas de acero
- Más de 25 km de conductos de agua

Lo que no se detalla en la página web es el coste real de mantenimiento de la instalación y que precisa estar subvencionado con dinero público, a pesar de que el coste de una entrada de adulto cuesta 27,90 euros (período 2012-2013).

Hemisfèric. Cronológicamente, fue el primer edificio de la Ciutat de les Arts i les Ciències en abrir sus puertas al público, en 1998. Dispone de una superficie construida de 14.000 m² y una cubierta ovoide de más de 100 m de longitud y 36 m de altura (fotografía inferior izquierda), cuya función principal es albergar una semiesfera de 24 metros de diámetro en cuyo interior se encuentra una sala con capacidad para 300 personas. En ella se proyectan, fundamentalmente, documentales de divulgación científica. Alrededor de la misma, como puede apreciarse en la fotografía inferior derecha, se ha habilitado un amplio espacio vacío para "exposiciones i eventos". Los datos anteriores evidencian la desproporción del proyecto teniendo en cuenta su utilización potencial.





El reflejo del edificio sobre el lago artificial de 24.000 m² reproduce, según las crónicas oficiales, “el ojo de la sabiduría”, aspecto que, a la vista de los resultados, sería cuestionable en los responsables técnicos y políticos del proyecto. Un formalismo, por simbólico y bello que resulte, no puede ni debe prevalecer sobre factores fundamentales del diseño como la funcionalidad, la racionalidad y la economía.

Las dos fotos siguientes ilustran la diferencia conceptual existente entre el proyecto del Hemisfèric de Valencia, con 24 m de diámetro, y la Géode de la Villette de París, de 36 metros de diámetro, inaugurada en 1985, es decir, 14 años antes.

El futuro de este tipo de proyecciones no parece muy halagüeño, toda vez que las imágenes en 3D en alta definición pueden visionarse, en la actualidad, desde cualquier televisor instalado en un domicilio particular.



Umbracle. Fue concebido como pórtico de acceso a la Ciutat de les Arts i les Ciències. Es también un espacio de paseo ornamentado con plantas y esculturas, de 320 m de largo y 60 de anchura. Está formado por una sucesión de 55 arcos fijos y 54 flotantes, de 18 m de altura. Bajo el mismo se encuentra un aparcamiento para 665 turismos y 25 autobuses.

Los aspectos estéticos se imponen, de nuevo, a los funcionales por la sobrecarga de tierras y plantas sobre los forjados y los problemas técnicos derivados de la presencia constante de agua para mantener vivas las plantas.

La fotografía inferior izquierda muestra una imagen general del Umbracle. La de la derecha permite apreciar la estructura tubular de los arcos parabólicos y su elevada permeabilidad a los rayos solares.

Sorprende, en un umbráculo, la presencia de una gran cantidad de palmeras, plantas adaptadas a climas calurosos extremos donde subsisten sin necesidad de ningún tipo de protección solar. Ello pone de manifiesto, una vez más, el triunfo de la forma sobre la función en la Ciutat de les Arts i de les Ciències.



Ágora. Se trata de un espacio multifuncional inaugurado en 2009, pero inacabado. Ha costado hasta el momento un importe próximo a los 90 millones de euros. Ocupa una planta de forma pseudoelíptica de 88 m de largo por 66 de ancho, cuya superficie es de 4.811 m². Es utilizado habitualmente como plaza pública cubierta, y eventualmente como pista para torneos de tenis.

La estructura de la cubierta (fotos inferiores) está formada por 49 pórticos metálicos de perfil curvo, arriostrados longitudinalmente mediante parejas de arcos laterales y centrales.

El remate superior es móvil. Está pensado para controlar la luz natural en el interior del recinto. No está terminado –ni posiblemente lo estará– porque, por lo visto, algunas de sus piezas no encajan en los soportes. Se duda incluso que funcione, vista la experiencia negativa del Palacio de Congresos de Oviedo.

La zona móvil de la cubierta tiene un coste de 7,75 millones de euros. La situación económica actual no hace aconsejable ni permisible realizar dicha inversión. Para más información, puede consultarse, entre otros, el artículo de J. L. García publicado en el periódico digital *Levante. El Mercantil Valenciano* <levante-emv.com> el 24 de septiembre de 2012.

A modo de epílogo y exposición del resultado final del proyecto de la Ciutat de les Arts i de les Ciències de Valencia, basta con la transcripción de un artículo aparecido en el diario *Público* <Público.es> el 12 de julio de 2012, en que se lee lo siguiente:





“A finales de la década de los noventa, la Generalitat Valenciana, en plena fiebre del ladrillo, impulsada por los constructores y por un Partido Popular afín a sus intereses, puso en marcha el mastodóntico proyecto de la Ciudad de las Artes y las Ciencias (CACSA), el complejo arquitectónico diseñado por *Santiago Calatrava* que pretendía ser una de las joyas de la tierra prometida de los conservadores. Acumuló un sobrecoste de 625 millones, más de cuatro veces lo presupuestado en un primer momento. El ejecutivo que entonces presidía *Francisco Camps* se gastó un total de 1.282 millones de euros. Ahora, la dirección del complejo, dependiente de la Generalitat, ha anunciado al comité de empresa el inicio del despido del 50 % de la plantilla, formada actualmente por 325 trabajadores, bajo el pretexto de «adecuar su estructura a la situación de crisis»... Alegan, además, que este despido masivo obedece a causas económicas, procedentes del recorte de la asignación presupuestaria y el descenso generalizado del volumen de ingresos de la empresa.”

La situación expuesta en los apartados anteriores lleva a concluir que será preciso efectuar un análisis profundo de la realidad física resultante del proyecto, así como de sus costes de explotación y de mantenimiento, al igual que de los rendimientos esperables de los mismos.

De dicho análisis, probablemente acabará surgiendo la propuesta de racionalización de alguna de las instalaciones actuales o la reconversión de los edificios para otros usos. En otros casos, acaso se opte por su “hibernación”; a la espera de tiempos mejores. Cabe, incluso, la posibilidad de derribar alguno de ellos.

Se tratará, sin duda, de realizar un interesante ejercicio de imaginación, de conocimiento técnico y de economía al menos tan colosal como el que supuso, en su momento, la construcción del complejo.

Para garantizar su éxito, deberán cambiarse algunos de los ingredientes básicos de la línea de pensamiento: la audacia y la inconsciencia deberán ser sustituidas por la racionalidad y la prudencia; la arrogancia y el afán de notoriedad dejarán paso a los principios éticos y de sostenibilidad. Por el momento, no queda más remedio que esperar acontecimientos para aprender incluso de las situaciones de no éxito como la expuesta.

2.4.3. Observaciones y conclusiones finales del capítulo

Los apartados precedentes, relativos al análisis de casos reales poco afortunados de desarrollo y gestión de proyectos arquitectónicos públicos realizados al amparo de la bandera de la cultura, ponen de manifiesto la necesidad de garantizar y preservar los principios de profesionalidad e independencia en el proceso de definición de las necesidades y de los objetivos que se pretenden alcanzar en un proyecto determinado.

El propósito fundamental de la aplicación de tales principios es garantizar que los resultados esperados se corresponden con los recursos que se pueden destinar razonablemente al mismo, tanto en la fase de construcción como en la de mantenimiento y explotación del edificio o del complejo de referencia.



La evidencia que se deduce de los casos comentados muestra que el riesgo de error se incrementa en función de la singularidad de cada proyecto, por la falta de referencias técnicas sobre experiencias similares, la confianza desmedida de políticos poco informados, el ego bien cultivado de algunos profesionales de la arquitectura y la capacidad que tiene una parte de los empresarios de la construcción de navegar en aguas revueltas.

La realización de un centro docente o de atención primaria, de una biblioteca o de una residencia de ancianos, por ejemplo, responde a parámetros muy precisos: población atendida, número de plazas previstas, superficie por plaza y coste unitario por metro cuadrado, por citar los más significativos.

Cuando se ponen en juego, en manos de determinados políticos, aspectos intangibles como la cultura y la proyección de la imagen de una región o de un país, unidos a aspectos tangibles como el erario público, entendido por algunos como una fuente inagotable de recursos, puede producirse una mezcla peligrosa cuyos patéticos resultados acabamos pagando entre todos.

En consecuencia, es preciso realizar, mediante la redacción de planes maestros *independientes*, una definición previa muy precisa de las necesidades a satisfacer y de la financiación necesaria para ello. Paralelamente, si procede, debe auditarse la documentación del proyecto.

En el rigor conceptual y técnico y en el contraste de pareceres entre los distintos equipos se encuentra el germen para obtener complejos y edificios más racionales y más funcionales, fáciles de mantener y respetuosos con el medio ambiente, todo ello sin necesidad de renunciar ni a la vanguardia ni a los valores estéticos.

Como se ha evidenciado, la rápida evolución de los sistemas informáticos, de las redes sociales y de la circulación telemática de todo tipo de informaciones acaba incidiendo, de forma sustantiva, en el trazado de los planes maestros, especialmente en aquellos que tienen la cultura como eje vertebrador.

Sin desmerecer las potencialidades de la realidad, de la presencia física y del contacto humano directo, su necesidad puede reducirse sobremanera de forma igualmente eficiente utilizando videoconferencias, instrumentos de realidad virtual, las redes telemáticas y simuladores de todo tipo.

A título de ejemplo, recientemente se han desarrollado televisores que permiten observar, en el propio domicilio, imágenes en 3D sin necesidad de disponer de equipos fijos costosos y muy especializados.

Los actuales procesos evolutivos son muy dinámicos y pueden dejar obsoletos, en poco tiempo, equipamientos de elevado coste y que, en su día, eran de última generación. Si se actúa sobre ellos de forma consecuyente, podrá determinar, en un futuro no muy lejano, si es posible reconvertirlos de forma rentable a otros usos, o bien hay que derribarlos para que no constituyan una carga social innecesaria.

En consecuencia, la información sobre el presente y, en especial, sobre el futuro resultan determinantes en la redacción de los planes maestros, sobre todo



cuando estos están relacionados con el desarrollo de grandes proyectos. En ellos, el proceso completo de diseño y de construcción puede durar entre cinco y diez años, por lo que los planes maestros han de ser suficientemente flexibles para permitir su adaptación a los cambios sustantivos que se puedan producir durante su período de vigencia.

A través de las consideraciones precedentes, quedan probadas, desde la perspectiva económica, de sostenibilidad y de racionalidad técnica, la utilidad y la necesidad de emplear las herramientas propias del análisis constructivo: los planes maestros y las auditorías de proyecto.

Por último, cabe concluir que la respuesta adecuada al diseño y a la construcción tecnológica del futuro hay que buscarla en la acumulación de informaciones procedentes de sistematizar y analizar, en laboratorios de edificación, las experiencias reales mediante equipos pluridisciplinarios plenamente estructurados y técnicamente dotados, que son muy escasos en la actualidad.

En la medida que la intuición y los procesos de ensayo y error den paso a decisiones avaladas por el análisis en profundidad de experiencias previas, se estará en el buen camino.

→ 3



Los retos de la construcción de grandes luces y las técnicas para su resolución

3.1. Introducción

Este capítulo analiza, de forma general, cómo las técnicas constructivas utilizadas para materializar grandes luces han evolucionado a lo largo de la historia para dar respuesta a las necesidades sociales de carácter colectivo.

La exposición es necesariamente parcial y fragmentaria. Se pretende, exclusivamente, ofrecer una visión de conjunto sobre los aspectos que han constituido hitos conceptuales y/o técnicos en la historia de la construcción.

Se exponen y analizan las técnicas de construcción de grandes luces a partir de los materiales de base empleados. Siguiendo el orden cronológico, el estudio comprende:

- Materiales pétreos
- Hierro y acero
- Hormigón armado
- Madera laminada-encolada

3.2. El concepto de gran luz

Posiblemente, la primera cuestión que hay que plantear en el momento de abordar la construcción de grandes luces es: ¿Cuándo se entiende que una determinada construcción es de gran luz? Dar una respuesta adecuada a esta pregunta no es una cuestión sencilla ni de dígitos. Requiere una serie de análisis y de comentarios, que se exponen en las páginas siguientes.

Como elementos de análisis para abordar el estudio de las construcciones de gran luz, han de considerarse los aspectos siguientes:



- Las características mecánicas de los materiales
- Los modelos constructivos sobre los cuales se desarrollan las grandes luces
- Las formas de los modelos constructivos
- La técnica constructiva empleada, y los procesos y procedimientos para su ejecución
- La época de construcción

3.2.1. Las características mecánicas de los materiales

En la actualidad, las características mecánicas de los materiales están definidas por parámetros objetivos, como su módulo de deformación y su resistencia a los esfuerzos de compresión, tracción, flexión, torsión y cortante. En conjunto, estos parámetros permiten establecer los límites precisos de sus capacidades y aplicar sobre ellos los coeficientes de seguridad apropiados.

Antes de la aparición de los primeros modelos matemáticos de cálculo estructural, a mediados del siglo XVIII, la estimación de dichos límites se realizaba mediante el procedimiento de ensayo y error. Se ampliaban progresivamente las luces de un modelo constructivo determinado hasta que se producía un colapso. Este marcaba el límite empírico del material en función del modelo constructivo.

Galileo Galilei (1564-1642) demostró que los modelos constructivos no podían incrementarse proporcionalmente de modo indefinido, puesto que, mientras las secciones crecían al cuadrado (función exponencial de segundo grado), los pesos lo hacían al cubo (función exponencial de tercer grado).

Por tanto, es preciso considerar las luces alcanzadas en un edificio determinado en función de los materiales estructurales que lo componen. A título de ejemplo, salvar más de 20 m de luz mediante el empleo exclusivo de materiales pétreos se considera excepcional, mientras que, si se trata de hormigón armado o madera laminada encolada, la excepcionalidad se sitúa por encima de los 60 m y, en el caso de las estructuras modernas de acero, superados los 100 m de luz.

En cuanto a la excepcionalidad de las luces salvadas con acero y hormigón armado, cabe distinguir según si se trata de edificios o de puentes, en cuyo caso los límites de la excepcionalidad se sitúan por encima de los 300 m en el caso del hormigón y de los 1.000 en los puentes colgantes de cables de acero.

3.2.2. Los modelos constructivos

Los modelos constructivos establecen, a su vez, un límite de luz; así, un arco cuyos esfuerzos principales son de compresión o una viga sometida a flexión agotan antes su capacidad resistente que una estructura suspendida en que impera la tracción y en que las limitaciones impuestas por el pandeo son inexistentes.



Como ejemplo de lo expuesto, la fotografía inferior izquierda muestra el arco de hormigón de un puente en fase de construcción. Al estar sometido a esfuerzos de compresión, está sujeto a pandeo, razón por la cual agota antes sus posibilidades resistentes que el concepto estructural expuesto en la fotografía de la derecha, en que los cables de soporte, al estar exclusivamente traccionados, pueden agotar toda su carga resistente sin experimentar deformaciones que la limiten.

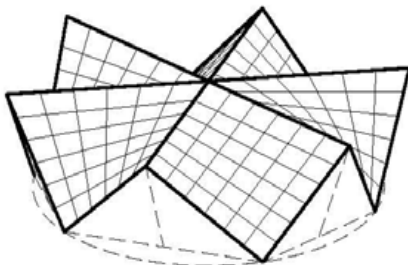


3.2.3. Las formas de los modelos constructivos

A igualdad de espesor, una superficie plana es menos rígida y, por tanto, más deformable que la misma superficie con uno o más pliegues, ya formen una arista, una curva continua o, mejor aún desde el punto de vista de la mejora potencial de su resistencia estructural, una doble curvatura.

Los cascarones realizados con hormigón armado son una buena muestra de la incidencia de la forma en la capacidad de los modelos constructivos para salvar grandes luces.

Las dos fotos inferiores responden al esquema enunciado. En la de la izquierda, la rigidez de la cubierta, formada por la intersección de paraboloides, se consigue mediante aristas. En la fotografía de la derecha, correspondiente al Pabellón de Rayos Cósmicos del Campus Sur de la Universidad Nacional Autónoma de México, realizado por Félix Candela (1910-1997) en 1951, la rigidez se obtiene con la doble curvatura de la superficie de directriz parabólica.





3.2.4. La técnica constructiva empleada, los procesos y los procedimientos para su ejecución

Para salvar con garantías de éxito un determinado rango de luz, es posible emplear distintos modelos constructivos como vigas, arcos, bóvedas o cúpulas. Una vez elegido el modelo estructural, es posible escoger, en determinados casos, el material. Así, una viga puede construirse con acero, con hormigón armado o con madera laminada encolada. Arcos, bóvedas y cúpulas permiten su construcción preferentemente con fábricas, hormigón armado y acero.

En estas situaciones, la disposición espacial de los materiales integrados en el elemento a construir es determinante, con vistas a lograr ligereza, rigidez y seguridad, tanto durante la construcción como en la fase de servicio.

Tal es el caso, entre otros que se comentan en las páginas siguientes, de las vigas en celosía (v. fotografía inferior izquierda) o de las mallas espaciales (v. fotografía inferior derecha). Su composición espacial, formada por adición de triángulos, garantiza rigidez y ligereza, frente a otros conceptos de construcción, en que prevalece la masividad. La razón de ello se debe a que los triángulos son figuras indeformables, siempre que no se superen las capacidades resistentes de las barras. Dicho de otra forma: para alterar dimensionalmente un triángulo con vértices indeformables, habría que doblar las barras que lo conforman.

La masividad agota antes, debido a su mayor peso frente a la rigidez, la capacidad del modelo para afrontar grandes luces que las soluciones aligeradas.



Para garantizar la seguridad durante la ejecución de los trabajos, son igualmente determinantes el procedimiento y el orden de colocación de los distintos elementos que han de conformar la construcción.

La consecución del equilibrio de masas durante la construcción, del que se desprenden aspectos tan determinantes como la generación de arcos espontáneos de descarga o la reducción de excentricidades en los soportes, es un argumento recurrente de los constructores de todas las épocas que se han enfrentado a la realización de grandes luces.

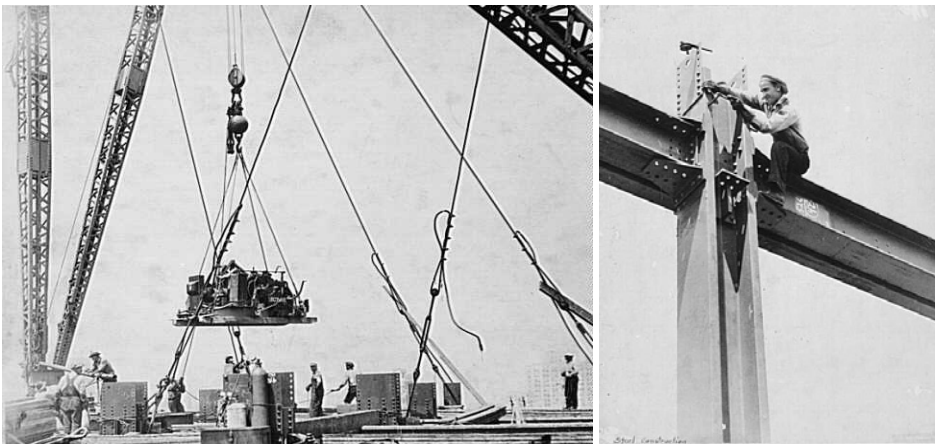


Así puede observarse en las fotos inferiores: la de la izquierda muestra, a pequeña escala, cómo se procede a cerrar una bóveda tabicada mediante la generación de arcos continuos; la de la derecha corresponde a una fase de la construcción, en 1907, del Queensboro Bridge en Nueva York. Dimensionalmente, son ejemplos muy distantes pero, conceptualmente, sus planteamientos constructivos son semejantes: equilibrar las masas durante la construcción mientras el elemento constructivo no está completo y, por tanto, no puede asumir plenamente su función estructural.



El hecho de disponer de procedimientos y medios auxiliares propios de cada época ha sido un factor determinante no tanto en los resultados finales, sino más bien en el tiempo empleado para alcanzarlos y en los riesgos asumidos para lograrlos. Es evidente que el rendimiento para izar hasta su posición definitiva un elemento pesado es muy distinto si se cuenta con simples poleas accionadas manualmente, con un polispasto mecánico o con una grúa que permita ubicar la carga en cualquier punto de su radio de acción.

Del mismo modo, y afortunadamente, los sistemas actuales de seguridad y de protección frente a situaciones de riesgo laboral son bien distintos de los que rigieron durante siglos. Ambos aspectos quedan bien ilustrados en las fotos siguientes.





En función del estado del arte de cada época, salvar luces superiores a una determinada longitud constituía un logro excepcional y los avances se producían con lentitud. La construcción científica conllevó la depuración de formas y materiales, con lo cual, aun conservando en algunos casos la técnica constructiva, la luz límite logró verse ampliamente superada.

A título ilustrativo, entre finales del siglo XIX y principios del XX, en pocos años, el acero no solo mejoró sus prestaciones mecánicas, sino que también evolucionó en cuanto al tamaño de los perfiles y las técnicas de unión entre ellos.

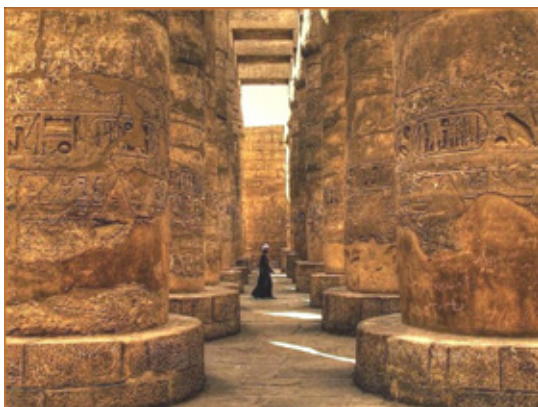
Un paso determinante en la consecución de grandes luces, mediante una estructura metálica, consistió en dejar a un lado los roblones para sustituirlos por soldaduras, con lo cual se resolvieron las uniones entre perfiles de forma más eficiente y ligera.

Alcanzar grandes luces en la construcción puede compararse con el sueño de volar. Solventar los retos que plantea la construcción de ámbitos de gran luz ha ocupado, durante siglos, a algunos de los mejores cerebros de la humanidad. La intuición y el ingenio son las claves del éxito en todas las épocas. Los modelos matemáticos y, posteriormente, los ordenadores son simples herramientas de los logros alcanzados.

Las colosales construcciones adinteladas egipcias, griegas y romanas no disponían de grandes espacios libres de columnas debido a la escasa resistencia a flexión de los materiales pétreos y a las limitaciones estructurales de las techumbres de madera propias de la época.

Las cuatro fotografías de la página siguiente, correspondientes al templo egipcio de Luxor (las dos primeras) y al templo de Karnak (la tercera y la cuarta) ponen de manifiesto el grosor de las columnas y la escasa luz disponible entre ellas, a consecuencia de las limitaciones propias de los sistemas adintelados de piedra.

La posibilidad de crear grandes espacios diáfanos cubiertos, aptos para la reunión de personas con fines sociales, religiosos o lúdicos, pasa a depender, a



partir de la época romana (por lo que a la civilización occidental se refiere), del desarrollo de cerchas de madera, en el caso de las basílicas, y especialmente de arcos, bóvedas y cúpulas, realizados con materiales pétreos aparejados en seco o con mortero, en el caso de las termas y de los templos.

La preferencia de los romanos por las soluciones pétreas para cubrir espacios se explica por su resistencia al fuego, aspecto que, en la época, justificaba su mayor coste de construcción.

El cambio tecnológico que se introdujo a partir de mediados del siglo XIX, al aplicar a la construcción las altas prestaciones mecánicas del hierro y, posteriormente, del acero ha permitido alcanzar logros impensables en otras circunstancias. También ha facilitado el desarrollo de nuevos conceptos estructurales aptos para salvar grandes luces.

La génesis de las soluciones constructivas aplicadas desde la segunda mitad del siglo XIX para salvar grandes luces se encuentra en los retos planteados por las exposiciones universales, los puentes y las estaciones de ferrocarril.

La invención, en 1824, del cemento de Pórtland por parte de Joseph Aspdin (1778-1855) permitió recuperar un aglomerante hidráulico para la construcción,



desaparecido desde la caída del Imperio romano. Los romanos lograron disponer de morteros hidráulicos por métodos absolutamente empíricos, incorporando arenas de puzolana a los morteros de cal, de los cuales supieron obtener, sin duda, un gran rendimiento.

La conjunción del cemento de Pórtland con áridos y acero, el hormigón armado, es el material de construcción por excelencia desde los años treinta del siglo xx. Si bien sus prestaciones para grandes luces no admiten comparación con el acero, presenta características interesantes en cuanto a la capacidad de moldeado, la textura, el coste o la durabilidad, que lo convierten en un material competitivo en edificación, para luces inferiores a 100 m.

La incidencia del hormigón armado en la historia de la arquitectura y de la edificación ha sido tan decisiva que su presencia marca un antes y un después con respecto a las posibilidades técnicas y de expresión comparativamente limitadas de las fábricas.

La madera laminada-encolada es un producto más de la colaboración de la industria química en el desarrollo de colas eficientes para la construcción. Las cualidades estructurales de la madera, uniformadas por el laminado, así como la posibilidad de construir grandes piezas, la ligereza, la estética, la diversidad de herrajes para resolver nudos y su bajo impacto ambiental son algunas de las características de este material que lo convierten en idóneo para resolver varios de los problemas planteados por las grandes luces.

3.2.5. La época de construcción

La época de construcción determina tanto el estado de la tecnología o de las tecnologías disponibles capaces de resolver una construcción de gran luz, como el posible abandono de alguna o algunas de las tecnologías, por obsoletas.

A título ilustrativo, en la actualidad, pese a que las posibilidades técnicas para cortar, modelar, colocar en obra y unir piedras son muy superiores a las de los constructores medievales, no se plantea volver a construir edificios con bóvedas pétreas. Lo mismo podría decirse de la arquitectura realizada con hierro colado o de las construcciones resueltas con piezas modeladas de hormigón en masa imitando sillares.

La situación en el tiempo de una construcción incide en la capacidad y la disponibilidad de los medios auxiliares necesarios para desarrollarla. Disponer de andamios tubulares modulares, en lugar de los realizados con postes de madera y cuerdas, o contar con sistemas de elevación mecánicos, en lugar de manuales, no tan solo repercute en la velocidad de ejecución, sino que permite plantear obras más ambiciosas, incluso conservando el mismo modelo constructivo.



3.3. Construcciones de grandes luces, elaboradas con materiales pétreos

3.3.1. Introducción a la construcción elaborada con materiales pétreos

La construcción elaborada con materiales pétreos se asocia a la masividad de sus soluciones. Ello es debido a las bajas prestaciones estructurales de las fábricas, cuya eficiencia, aunque relativa, mejora con los aparejos, entendidos como un conjunto estructurado de leyes espaciales que permiten trabar entre sí las distintas piezas que conforman las fábricas, con el propósito de mejorar la solidez del conjunto.

El planteamiento general de la construcción con materiales pétreos consiste en realizar, mediante la adición de elementos de pequeño formato, conjuntos arquitectónicos de gran tamaño.

La construcción de arcos, bóvedas y/o cúpulas para salvar grandes luces comporta la aparición de empujes, tanto mayores cuanto mayor sea la luz a salvar y cuanto más pesados sean los elementos constructivos que los componen. Recuérdese que los modelos se agotan al crecer las secciones mediante una función cuadrática y los pesos, mediante una función cúbica.

Históricamente, la compensación de empujes se realizó generando modelos constructivos y ensayándolos progresivamente, a lo largo del tiempo, mediante el procedimiento de ensayo y error.

La exposición de cómo se han salvado grandes luces con materiales pétreos es necesariamente fragmentaria, por razones obvias de amplitud de contenido. Con todo, se pretende ofrecer una visión de conjunto de cómo se ha abordado, a lo largo de la historia, la resolución de grandes luces en las construcciones arquitectónicas realizadas con piedra como materia prima.

En primer lugar, se incide en los elementos más simples: los arcos de diafragma, las bóvedas de cañón y las bóvedas de crucería. Posteriormente, se exponen, en orden cronológico, los aspectos constructivos de las cúpulas pétreas que han marcado historia: el Panteón de Agripa, Santa Sofía de Constantinopla, Santa Maria dei Fiore de Florencia, San Pedro del Vaticano en Roma, San Pablo en Londres y el Panteón de Hombres Ilustres de París, puesto que representan los mayores logros alcanzados por la construcción en sus respectivas épocas.

Por último, dentro del mismo apartado, se plantea un análisis de los paralelismos y las divergencias entre la construcción de la nave de la catedral de Girona, la de mayor luz entre las catedrales góticas, y La Sagrada Família de Barcelona.



3.3.2. Arcos de diafragma

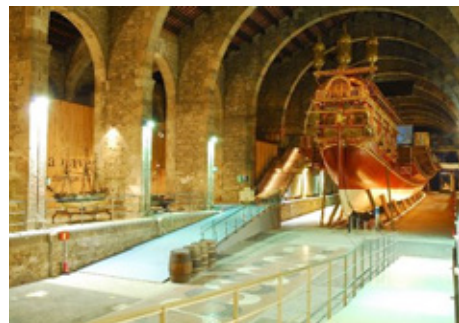
Los arcos de diafragma constituyen una solución ingeniosa y simple para salvar grandes luces que, como se verá, ha tenido un largo recorrido histórico hasta nuestros días. Consisten en la disposición transversal, con respecto al eje de la nave, de arcos de piedra o de fábrica de ladrillo sobre los cuales se asientan sendos muros. Los muros siguen habitualmente la pendiente a dos aguas de la cubierta, si bien también se dan casos en que su terminación horizontal permite la formación de una planta superior.

En ambos casos, el espacio entre arcos es cubierto, habitualmente, mediante un forjado de vigas de madera. Se trata, por tanto, de una estructura mixta en la cual los arcos salvan, mediante el trabajo a compresión de sus dovelas, la luz transversal de la nave. Al mismo tiempo, compartimentan en tramos regulares la luz longitudinal de la nave que se pretende cubrir para que esta pueda ser asumida por la capacidad a flexión de las vigas de madera y, en casos excepcionales, por bóvedas.

Los arcos de diafragma fueron empleados en la época romana y reaparecieron a finales del siglo XII en los monasterios cistercienses del occidente mediterráneo. Tal es el caso, entre otros, de los monasterios de Fossanova en Lacio; Lagrasse y Fontfroide en Languedoc, y Poblet y Santes Creus en Cataluña. Es posible encontrarlos, también, en otros monasterios, como en el de las clarisas de Pedralbes en Barcelona o el monasterio femenino de Sigena, en Aragón, de la Orden de San Juan de Jerusalén.

Por su economía de medios en relación con las soluciones abovedadas, el modelo tuvo una gran fortuna a lo largo de la Edad Media y se utilizó indistintamente en edificios de uso religioso, civil e industrial, como es el caso de las Drassanes Reials de Barcelona, que actualmente albergan el Museo Marítimo (v. fotos inferiores).

La nave mayor salva una luz de 12 m mediante arcos de medio punto. La distancia entre arcos consecutivos es de 5,40 m. La anchura de los arcos es de 70 cm. La longitud total del edificio alcanza los 125,00 m.





El mayor inconveniente de las estructuras realizadas mediante arcos de diafragma, además del bajo aislamiento térmico que proporcionaban las cubiertas de estructura de madera y teja de la época, era el riesgo de incendio de la estructura leñosa.

Las dos fotografías precedentes muestran, respectivamente, los dormitorios de los monasterios de Poblet y de Santes Creus. El dormitorio de Poblet, del siglo XII, es una nave de 87 m de largo por 10 m de ancho, dividida por diecinueve arcos de diafragma.

El dormitorio de Santes Creus, del último tercio del siglo XII, es más corto pero ligeramente más ancho: mide 46 m de longitud, divididos por diez arcos de diafragma; su anchura es de 11 m, y alcanza una altura de 6 m.

En ellos, destaca la simplicidad estructural de los arcos apuntados que emergen desde el muro, apoyados en simples ménsulas. En ambos casos, los muros que descansan sobre los arcos de diafragma tienen doble pendiente, puesto que soportan directamente la cubierta de la nave.

Las dos fotografías de la página siguiente corresponden a dos grandes salones góticos de Barcelona. La de la izquierda corresponde al Saló del Tinell del Palau Reial Major y la de la derecha, al Saló de Cent del Ayuntamiento de Barcelona. Sus dimensiones nos fueron amablemente facilitadas por el Laboratori de Política de Sòl i Valoracions de la ETSAB.

El Saló del Tinell del Palau Reial Major fue construido a mediados del siglo XIV. Las dimensiones generales de la sala son 17,52 × 33,38 m. Dispone de seis arcos de diafragma de medio punto de 16,13 m de luz y 78 cm de espesor. Descomponen la luz total del eje longitudinal en siete tramos de 4,76 m entre ejes.

Las claves de los arcos se sitúan a 10,18 m de la cota del pavimento. La máxima altura libre de la sala, en la zona central, es de 11,77 m. Los arcos diafragmáticos



arrancan a 2,11 m del suelo y confieren a la sala una sección apaisada. Los arcos laterales, que ejercen funciones de contrafuertes, tienen la clave a 10,30 m de altura.

El Saló de Cent del Ayuntamiento de Barcelona fue construido inicialmente, en 1369, con tres tramos y dos arcos de medio punto, por el maestro de obras Pere Llobet. Desde la reforma y ampliación que llevó a cabo el arquitecto Daniel Molina i Casamajó (1812-1867) entre 1848 y 1860, la techumbre, de cinco tramos, está soportada por cuatro arcos de diafragma.

Sus dimensiones son 27 m de largo por 12,61 m de anchura, por lo que cada uno de los tramos mide 5,40 m entre ejes. Los arcos de medio punto tienen una luz de 12,30 m. Su clave alcanza la cota de 11,40 m sobre el pavimento de la sala y su imposta se sitúa a 5,25 m de altura. La altura máxima de la nave es de 12,98 m.

Si bien las dimensiones de esta sala son inferiores a las del Tinell, la mayor altura de las impostas de los arcos diafragmáticos ofrece una sección más esbelta.



Con respecto a los modelos monásticos precedentes, en estas dos salas civiles pueden apreciarse las variaciones siguientes:

- Utilización de arcos de medio punto en lugar de arcos apuntados.
- Empleo de molduras en los arcos para enriquecer el aspecto formal, buscando el contraste entre luz y sombra, en vez de secciones prismáticas.
- Mayor complejidad en las molduras de los arcos cuanto más avanzada es la fecha de ejecución.
- Apoyo de los arcos sobre pilastras, no en ménsulas emergentes del muro.
- Presencia de canecillos en el coronamiento de los muros para facilitar el apoyo de las vigas y reducir la luz. De los modelos monásticos expuestos,



solo el de Santes Creus, cuya construcción es algo posterior a Poblet, dispone de canecillos.

- Pendientes muy reducidas en el remate de los muros de coronación del arco en el caso del Saló del Tinell, puesto que la cubierta es una azotea a la catalana, y totalmente horizontales en el Saló de Cent, toda vez que sobre el mismo existe otra planta. Ello contribuye a mejorar las condiciones térmicas de la sala. Los modelos monásticos, en cambio, están planteados para sustentar una cubierta de teja árabe a dos aguas cuyas pendientes quedan definidas mejor por la presencia de los arcos apuntados.

Mención aparte merece la solución constructiva desarrollada por Pere Arvei para la Llotja de Mar de Barcelona (v. fotos inferiores). Las obras se llevaron a cabo entre 1384 y 1397. La gran sala mide 21 m de ancho por 33 m de largo. Se configura mediante dos baterías paralelas, formadas cada una de ellas por tres arcos de diafragma de medio punto, que se apoyan en dos de los esbeltos pilares centrales. El espacio resultante queda estructurado mediante tres naves sostenidas por cuatro pilares y cerradas por los muros perimetrales. En el conjunto estructural, formado por arcos y muros, descansa un techo de vigas de madera apoyadas sobre canecillos. En la planta primera, se repite la misma disposición espacial, aunque con menor altura. La fotografía inferior izquierda corresponde al salón de contrataciones. La de la derecha, a la sala situada sobre el mismo, acondicionada actualmente como auditorio.



Las lonjas de Palma de Mallorca y de Valencia (v. fotos siguientes izquierda y derecha, respectivamente), construidas con posterioridad, si bien conservaban la disposición de tres naves apoyadas sobre pilares, fueron cubiertas con bóvedas, puesto que en su construcción se pretendieron obtener mejoras con respecto al modelo barcelonés. Ambas constituyen ejemplos claros de la evolución constructiva a partir de un modelo eficiente, basado en la construcción de una sala lo más amplia y diáfana posible para la época.

La Llotja de Palma de Mallorca, construida por Guillem Sagrera (1380-1456) entre 1420 y 1448, está cubierta con doce bóvedas cuadripartitas de crucería, apoyadas sobre seis columnas salomónicas sin capitel.



La Llotja de la Seda, Llotja de València o Llotja de Mercaders, realizada por Pere Compte (¿-1506), fue edificada entre 1482 y 1548. La planta dispone de ocho columnas salomónicas sin capitel, al igual que la Llotja de Palma. La cubierta está formada por quince bóvedas con ocho nervios cada una, que confluyen en las claves.

En pleno siglo xx, además del propio Antoni Gaudí (1852-1926) en obras como el Colegio de las Teresianas (1888-1989) o la cubierta de la Casa Milà (1906-1910) (v. fotografías inferiores izquierda y derecha, respectivamente) el arquitecto César Martinell i Brunet (1888-1973), discípulo y estudioso de su obra, desarrolló, especialmente entre 1918 y 1922, una actividad intensa en el ámbito de la arquitectura agraria para dar respuesta al desarrollo del cooperativismo que había impulsado, para este sector productivo, la Mancomunitat de Catalunya.

En los *cellers cooperatius* o bodegas cooperativas, de las que llegó a construir más de cuarenta, utilizó arcos de diafragma parabólicos de fábrica de ladrillo. Dichos *cellers* son conocidos popularmente como "*catedrals del vi*". La forma prácticamente ideal de los mismos con respecto a la directriz de los esfuerzos de compresión hacía prácticamente innecesarios los elementos de contrarresto.



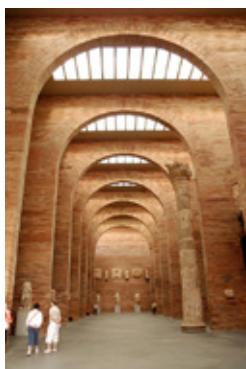


Si bien en algunos casos los espacios entre los arcos de diafragma se cubren mediante vigas, en la mayoría de las ocasiones el material por excelencia para resolver la práctica totalidad de la construcción es el ladrillo. Con él se forman tanto los arcos sustentantes como las bóvedas tabicadas que salvan las luces entre ellos.

Con este proceder, se pretendía obtener un máximo de simplicidad y de economía constructiva para dar respuesta a una situación de carestía de la madera, causada por los estragos de la Primera Guerra Mundial. Paralelamente, en el ramo de la albañilería, se disponía de una mano de obra excepcionalmente diestra y barata. En otro ámbito temporal, dicho planteamiento habría sido inviable, pero resolvió con eficiencia aquella situación circunstancial.

Siete de sus bodegas cooperativas fueron declaradas en 2002 bienes culturales de interés nacional. Son las de [Cornudella de Montsant y Falset](#) en la comarca de El Priorat, [Nulles](#) en la comarca de L'Alt Camp; [Barberà de la Conca y Rocafort de Queralt](#) en la comarca de La Conca de Barberà; [Gandesa](#) y [El Pinell de Brai](#) en La Terra Alta, y [Sant Guim de Freixenet](#) y [Cervera](#) en la comarca de La Segarra.

La fotografía inferior izquierda corresponde a los arcos diafragmáticos de la nave principal de la bodega cooperativa de El Pinell del Brai (1918). En la misma, es posible apreciar el envigado de madera que cubre el espacio entre los arcos. La de la derecha corresponde a la bodega de Gandesa (1919-1920), en que la luz entre los arcos de diafragma se salva mediante bóvedas tabicadas.





Incluso a finales del siglo xx, es posible encontrar argumentos para el empleo de arcos de diafragma. Tal es el caso del arquitecto Rafael Moneo, que, en el museo romano de Mérida, inaugurado el 19 de septiembre de 1986 (v. fotos anteriores), genera con los mismos la atmósfera y el ambiente adecuados para la custodia y la contemplación de las piezas arqueológicas.

3.3.3. Bóvedas de cañón. Mejoras introducidas en su construcción

Las bóvedas de cañón están generadas por la prolongación de un arco a lo largo de su eje longitudinal. Dicho arco suele ser de medio punto, pero puede adoptar también perfiles apuntados, rebajados o de carpanel.

Las bóvedas de cañón eran conocidas por las culturas mesopotámica y egipcia, que empleaban adobe para su construcción. Los romanos sistematizaron su ejecución mediante el empleo de piedra y/o ladrillo, unidos con mortero de cal. Tales materiales se aplicaron sistemáticamente en la construcción de todo tipo de bóvedas hasta la aparición del cemento de Pórtland.

Al igual que los arcos, las bóvedas trabajan a compresión y generan empujes que han de ser absorbidos, generalmente, por la propia construcción. Es preciso considerar, a tal fin, la escasa capacidad –por no decir nula, a efectos prácticos– de resistencia a la tracción y a la flexotracción de las fábricas confeccionadas con piedra y/o ladrillo. Ello se traduce en la necesidad de disponer grandes masas con objeto de no sobrepasar las escasas prestaciones de los materiales empleados. Para conseguirlas, es preciso construir muros muy gruesos, que otorgan a este tipo de construcciones su aire de masividad, así como una gran capacidad para perdurar en el tiempo.

Conscientes de ello, a lo largo de siglos de perfeccionamiento, los profesionales encargados de su construcción trataron de aligerar, dentro de lo posible, las soluciones constructivas de las bóvedas de cañón y, al mismo tiempo, garantizar la estabilidad del conjunto. Para ello, se valieron del método de ensayo y error, y actuaron fundamentalmente en cuatro direcciones:

- Mediante la construcción de una bóveda central flanqueada por dos o más bóvedas laterales, de igual altura o menor.
- Apuntando el perfil del arco generador.
- Reforzando a trechos regulares el espesor de los muros y el de las bóvedas.
- Cambiando, por último, de modelo constructivo. Las bóvedas de cañón, emblema del románico, acabaron siendo sustituidas por las de crucería, propias del estilo gótico.

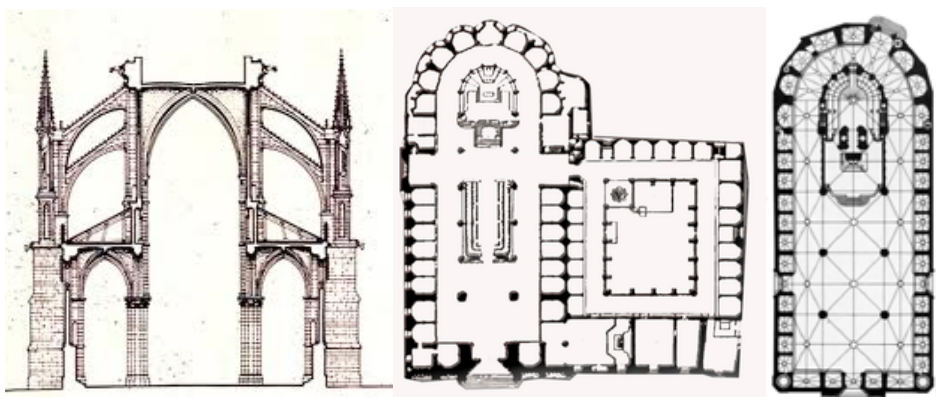
A continuación, se explican en detalle los aspectos reseñados.



Mediante la construcción de una bóveda central flanqueada por dos o más bóvedas laterales, de igual altura o menor

Con esta disposición espacial, las bóvedas laterales sirven de contrarresto a la bóveda central. Si, además, las bóvedas laterales se encuentran a menor altura que la central, se produce una aproximación hacia el nivel del suelo de los empujes. El brazo mecánico a soportar es, pues, menor. Esta articulación de los elementos constructivos es habitual en la gran mayoría de las construcciones de tres naves, que no por ello quedan exentas de contrafuertes, si bien estos quedan ocultos por la presencia de capillas laterales.

La fotografía inferior izquierda muestra una sección transversal de la catedral de Reims sin la cubierta de madera. En la misma, puede apreciarse el sistema de contrarresto de la nave central mediante dos niveles de arbotantes, las naves laterales y el auxilio del paso de los pináculos coronados por sendos gabletes. Las dos fotografías siguientes muestran, en planta, la inclusión de los contrafuertes en las capillas laterales; la central corresponde a la catedral de Barcelona y la de la derecha, a la basílica de Santa María del Mar.



Apuntando el perfil del arco generador

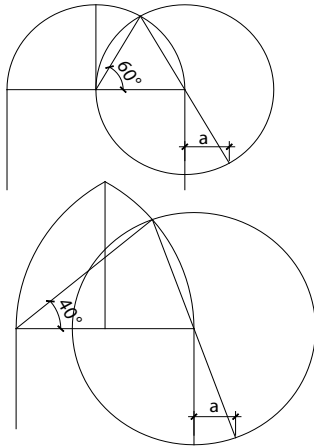
Apuntando el perfil del arco generador, es posible reducir los empujes y, como consecuencia, aligerar, aunque no eliminar, el sistema de contrafuertes. Este conocimiento fue empleado a partir del siglo XI, con la incorporación en la construcción de bóvedas de cañón de perfil ojival durante la transición del románico al gótico.

La regla más empleada para determinar la dimensión de los estribos es la de François Blondel (1618-1686), conocida como regla de Blondel. Se encuentra publicada en su *Cours d'architecture*, escrito entre 1675 y 1683, y reeditado en 1698, después de su muerte.



Blondel, en realidad, transcribe una regla geométrica de diseño-cálculo muy anterior, contenida en los tratados de estereotomía del siglo *xvi* de Baccojani y Ginés Martínez de Aranda, e incluso del propio siglo *xvii* pero anteriores a su trabajo, como el del jesuita y arquitecto François Derand (1591-1644), impreso en 1643.

La construcción geométrica es la que se muestra en el gráfico inferior y es aplicable tanto a arcos de medio punto, como a rebajados o apuntados.



Consiste en:

- Dividir el intradós del arco en tres partes iguales.
- Unir, mediante una línea recta, el punto correspondiente al tercio de arco con la imposta, prolongando la alineación.
- Mediante un arco de círculo con centro en la imposta, la longitud existente entre ella y el punto correspondiente al tercio de arco, se transporta sobre la alineación que se ha prolongado desde la imposta.
- El punto resultante, con respecto a la jamba del arco, marca la anchura (*a*) del estribo.

La aplicación de esta regla da como resultado estribos más reducidos para los arcos apuntados que para los de medio punto, lo cual es lógico debido al menor empuje que generan los arcos apuntados frente a los de medio punto.

La dimensión de los estribos que se obtiene con la aplicación de la regla de Blondel da resultados inferiores a los empleados habitualmente en las bóvedas de cañón, por lo que cabe concluir que dicha regla es aplicable, exclusivamente, a los arcos perpiaños o transversales de las bóvedas de crucería góticas y no a las bóvedas de cañón.



Reforzando a trechos regulares el espesor de los muros y el de las bóvedas

En el caso de los muros, interiormente, se construye una pilastra encargada de recibir el arco toral o fajón correspondiente; por el exterior, se realiza el contrafuerte. El conjunto aparejado, formado por muro, contrafuerte, arco toral y pilastra, dispone de la rigidez suficiente para contener, entre tramos, los empujes generados por la bóveda de cañón.

El efecto del refuerzo puede equipararse a disponer de un muro virtual de espesor constante ligeramente mayor que el real. La fotografía inferior izquierda muestra diversos arcos fajones que actúan como refuerzo de la bóveda de cañón de la [iglesia abacial de Sainte-Foy](#) de Conques, construida entre los siglos XI-XII. La fotografía interior derecha corresponde a la iglesia de Sainte-Marie-Madeleine de Vézelay (siglos XI y XII).



Cambiando las bóvedas de cañón por las de crucería propias del estilo gótico

Es evidente que, en las primeras épocas del gótico, fue preciso hacer más de “un salto en el vacío” para experimentar y establecer nuevas reglas de construcción adaptadas a las nuevas exigencias. Los tratados de arquitectura gótica que han llegado hasta nosotros –menos de diez– corresponden al período comprendido entre los siglos XV y XVI, es decir, se escribieron durante el gótico tardío, cuando las experiencias derivadas de la construcción de todo tipo de bóvedas ojivales estaban plenamente consolidadas.

En estos tratados, se exponen diversas reglas, basadas en las proporciones, para dimensionar los muros, los pilares y los contrafuertes de las iglesias góticas. Se concede especial atención al diseño-cálculo de los estribos de las bóvedas. Es la luz de la nave la que proporciona la dimensión del estribo.

La más simple de dichas reglas es la que permite obtener, para las bóvedas de cañón, la dimensión del contrafuerte o estribo, tomando como base la tercera parte de la luz de la nave. En dicho espesor total queda incluido el grueso del



muro, que usualmente se dimensionaba adoptando la décima parte de la luz de la nave.

En las bóvedas góticas de crucería, los estribos se reducen hasta alcanzar valores próximos a la cuarta parte de la luz de la nave.

Las fotos inferiores muestran el extraordinario parecido interior de las naves románicas de la catedral de Santiago de Compostela (siglos XI y XII) y de la basílica de Saint-Sernin de Toulouse (siglo XI), respectivamente; sin embargo, la planta compostelana se resuelve con tres naves y la tolosana, con cinco. Las luces de ambas bóvedas son muy semejantes y relativamente modestas, de 8,10 y 9,00 m, con alturas de nave de 22 y 21 m, respectivamente. Las dimensiones indicadas ponen de manifiesto las limitaciones constructivas del sistema. En ambos casos, las naves laterales miden la mitad que la nave central.



Durante los siglos XIII y XIV, el estilo gótico impuso el abandono de las bóvedas de cañón por las de crucería cambiando por completo el sistema de contrarrestos, con la incorporación de arbotantes y pináculos. Durante los dos siglos siguientes, el gótico evolucionó en la complejidad ornamental de sus bóvedas, sin aportar aspectos significativos en cuanto a la mejora de su comportamiento mecánico.

Con el cambio de modelo estructural, manteniendo prácticamente inalterados los materiales y los aparejos, se llegan a duplicar las luces de las construcciones románicas. Son relativamente abundantes las naves góticas con luces superiores a los 15 m.

Como ejemplos comparativos con las dimensiones expuestas para las naves principales de la catedral de Santiago de Compostela y de Saint-Sernin de Toulouse, se exponen las dimensiones de las naves principales y las alturas de las bóvedas de las catedrales de Narbona y de Palma de Mallorca.



La nave principal de la catedral de Narbona, dedicada a los santos Justo y Pastor, construida entre 1272 y 1355, mide 16,20 m, y la altura de sus bóvedas es de 41 m (v. foto inferior izquierda).

La fotografía central corresponde a una sección transversal de la catedral de Santa María de Palma de Mallorca; la de la derecha muestra una imagen de su interior, tomada desde la nave central. Construida entre los siglos XIV y XV, con el gótico plenamente desarrollado como estilo y como técnica constructiva, la catedral de Palma de Mallorca tiene unas dimensiones impresionantes. La luz de la nave principal es de 20 m y las claves de las sus bóvedas se sitúan a 44 m por encima del nivel del pavimento.



En el apartado denominado “La catedral de Girona y La Sagrada Familia” se expone que, a principios del siglo XV, se decidió construir la que acabó siendo la mayor nave gótica, con una luz de 22,98 m. En aquella época, la capacidad de los constructores góticos había alcanzado su cénit, después de tres siglos de experiencia.

De los datos anteriores, cabe concluir que existe un gran salto cualitativo entre los modelos constructivos románicos y los góticos, debido a:

- La reducción de los empujes de las bóvedas por la presencia de arcos apuntados.
- La utilización de bóvedas de crucería, que concentran los esfuerzos y los empujes en zonas puntuales, en vez de hacerlo a lo largo del muro, como sucede con las bóvedas de cañón seguido.
- Las técnicas constructivas empleadas para absorber los empujes mediante los conjuntos constructivos formados por arbotantes, pináculos y contrafuertes.



- La liberación de los muros perimetrales de su función portante. Ello permite ampliar las ventanas y lograr una mayor luminosidad en el interior de las naves.

Todo ello, al doblar anchuras y alturas, se traduce en la posibilidad de construir edificios volumétricamente cuatro veces más grandes que las mayores realizaciones del románico, sin tener que cambiar los materiales de base ni modificar sustantivamente las resistencias de las fábricas.

El **Renacimiento** italiano y el **Barroco**, al adoptar modelos de la Antigüedad griega y romana, recuperan la bóveda de cañón a mayor escala dimensional. Tal es el caso de la basílica de Sant'Andrea de Mantua (1462-1790), de Leon Battista Alberti (1404-1472), cuya nave central mide 18,20 m (v. fotografía inferior izquierda), y de la iglesia del Gesú, dirigida entre 1568 y 1573 por Jacopo Barozzi da Vignola (1507-1573) y terminada por Giacomo della Porta (c.1533-1602) entre 1573 y 1584, cuya nave tiene una anchura de 17,60 m (v. foto inferior derecha).

La mayor luz en una bóveda de cañón realizada con materiales pétreos corresponde a la basílica de San Pedro del Vaticano, que salva un vano de 28 m.

Posteriormente, a principios del siglo xx, con la tecnología de las construcciones en piedra prácticamente agotada, el genio de Antoni Gaudí planteó estructuras complejas para ser realizadas con materiales pétreos, basadas en maquetas espaciales, utilizando arcos de perfil de catenaria.

Logró así, en función de la idoneidad de las formas para absorber compresiones, eliminar la necesidad de contrafuertes. Discípulos suyos, como Josep M. Jujol i Gibert (1879-1949) y César Martinell i Brunet (1888-1973), aplicaron dichos principios en algunas de sus construcciones.





Cabe concluir que, cuando el dominio de una técnica constructiva es máximo, esta acaba relegada por nuevas aportaciones y nuevos materiales, que ofrecen mejores prestaciones con menores inversiones.

3.3.4. El Panteón de Agripa

El Panteón de Agripa es uno de los edificios de la antigua Roma mejor conservados. Solo por ello ya sería objeto de admiración, pero, además, lo que lo hace único son sus dimensiones interiores y las depuradas técnicas constructivas empleadas en su construcción.

Creatividad e ingenio

La construcción del Panteón de Agripa es un ejemplo claro en que la creatividad y el ingenio suplen las limitaciones mecánicas de los materiales: la resolución de los problemas logísticos de su construcción fue posible más gracias al tesón que a las posibilidades que ofrecían los medios técnicos de la época para solventarlos.

Los constructores romanos utilizaron nichos contrapuestos para reducir la masividad de sus fábricas sin renunciar a la rigidez. Estructurando el espacio, alternando hueco con lleno, consiguieron absorber de forma eficiente los empujes de las bóvedas y las cúpulas. Lo mismo puede apreciarse también en otras construcciones de la época, como en las Termas de Agripa y de Caracalla, o en la Villa Adriana en Tívoli; sin embargo, ninguno de estos ejemplos se encuentra intacto.

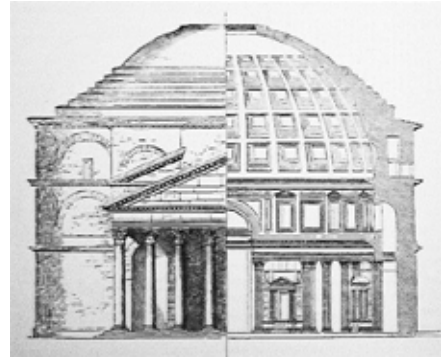
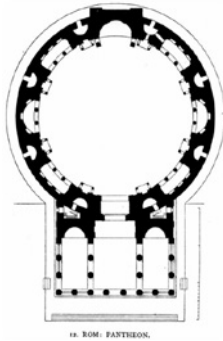
Las dos fotografías inferiores corresponden a las Termas de Caracalla: la de la izquierda muestra una maqueta con la reconstrucción ideal de las mismas; la de la derecha permite apreciar su estado actual.



La planta del Panteón de Agripa (123-125 dC) responde a los principios enunciados, que consisten en conseguir ligereza y rigidez en las fábricas mediante combinaciones de hueco y lleno, como puede apreciarse en la fotografía inferior



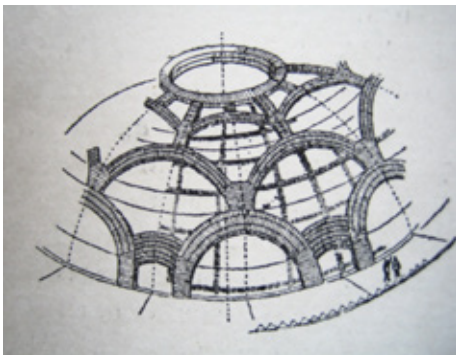
izquierda. Por su parte, el peso de la cúpula está aligerado interiormente por medio de cinco filas de casetones y con el empleo, en el colado de la plementería, de hormigón confeccionado con piedra pómez, según se muestra en la fotografía inferior derecha.



Dimensiones

El Panteón tiene unas dimensiones excepcionales para la época. Su diámetro y su altura de coronación coinciden: ambos miden 43,44 m. Por tanto, en su interior se inscribe una esfera, lo que confiere al edificio una significación simbólica, al estar representados, en un mismo espacio, el globo terráqueo y la esfera celeste. La abertura superior mide 8,90 m de diámetro.

En la construcción de la cúpula, se emplearon arcos de descarga de fábrica de ladrillo que definían sectores de trabajo. Los espacios resultantes entre los arcos se ejecutaron mediante rellenos de hormigón. Dicha técnica constructiva permite trabajar con cimbras parciales puesto que, al cerrar un nivel, este es autoestable y se puede pasar al siguiente, como se refleja en el esquema inferior.



Los empujes generados por la cúpula se absorben, en el primer tercio de su altura, mediante una galería perimetral que aligera la masividad. Sobre la galería,



y hasta la mitad de la altura de la cúpula, se disponen siete anillos escalonados. Desde el último anillo hasta la coronación se manifiesta la forma esférica. La presencia de los anillos no permite apreciar el volumen de la cúpula desde el exterior (v. fotografía de la página anterior derecha).

El espesor de la cúpula del Panteón decrece desde los 5,90 m en el arranque hasta los 1,50 m en la zona del óculo central. La técnica constructiva descrita, asociada a la masividad y a unos materiales que soportan muy bien el paso del tiempo, ha permitido que la estructura del edificio haya llegado prácticamente intacta hasta nuestros días, después de diecinueve siglos.

Trece siglos más tarde, Filippo Brunelleschi (1377-1446) estudió el Panteón y aplicó algunas de sus soluciones constructivas a la cúpula de Santa Maria dei Fiore de Florencia, utilizando cimbras parciales y el ladrillo como material de base, así como la formación de nervios y arcos de ladrillo para fragmentar y ordenar los espacios de la construcción.

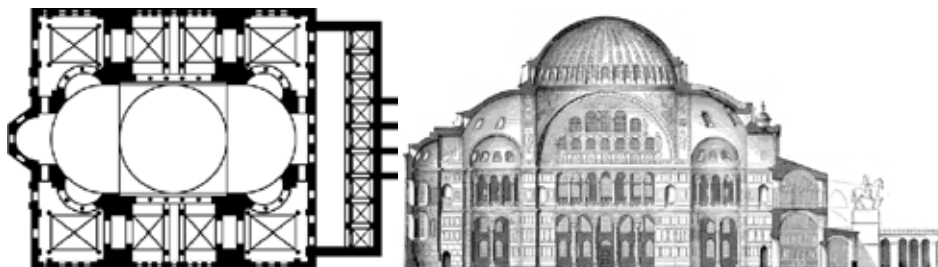
Dicha forma de proceder supuso recuperar una técnica constructiva perdida desde la caída del Imperio romano.

3.3.5. La cúpula de Santa Sofía de Constantinopla

La basílica de Santa Sofía de Constantinopla fue construida, por mandato del emperador Justiniano, en solo cinco años, once meses y diez días, tiempo récord para la época (532-537). Sus autores, Antemio de Tralles e Isidoro de Mileto, hicieron gala de ingenio y de conocimiento empírico del comportamiento estructural de los materiales de construcción. Por su concepción y su técnica constructiva, fue la última gran construcción de tradición romana.

Su planta (v. fotografía inferior izquierda), prescindiendo del pórtico, es prácticamente cuadrada, de 77×72 m. Está concebida como la estructura precisa para soportar el empuje de la cúpula, de 31 m de diámetro.

El eje longitudinal, representado en la fotografía inferior derecha, se resuelve, por debajo de la cúpula, mediante dos cuartos de esfera. El transversal, con la presencia de contrafuertes perforados que contribuyen a conformar las naves laterales. Esta disposición genera un amplio espacio diáfano en la zona central.





La cúpula se asienta sobre cuatro grandes arcos. La transición de la planta cuadrada a la circular se efectúa mediante pechinas. Además de los aspectos reseñados, relativos a sus dimensiones, y la concepción general de la planta del edificio, diseñada para absorber sobre dos ejes ortogonales entre sí el empuje de la cúpula, diversos son las características que contribuyen a que sea una construcción singular:

- La altura del arranque de la cúpula
- La disposición de cuarenta ventanas en la zona estructuralmente más solicitada
- La utilización de materiales aligerantes
- El ingenio y el pragmatismo

A continuación, se explican en detalle cada uno de ellos.

La altura del arranque de la cúpula

El arranque de la cúpula de Santa Sofía se sitúa a más de 45 m de altura, aproximadamente la altura de coronación del Panteón de Agripa. La cúpula se apoya en muros que, contrariamente a toda lógica, se hacen más permeables a medida que se aproximan al suelo.

El predominio de los valores estéticos sobre los mecánicos provocó serios problemas de deformación durante su construcción. Al construir el arco principal oriental, los pilares comenzaron a inclinarse hacia el exterior. Su inclinación actual es de 0,60 m. Las causas de estas deformaciones cabe atribuir las, también, a la celeridad con que se llevó a cabo la obra y a la lentitud de fraguado de los morteros de cal aérea. Algo parecido sucedió al construir la cúpula del Vaticano y también, siglos después, durante la construcción del templo de La Sagrada Familia en época de Gaudí, aspecto que será comentado al tratar de dicha cúpula.

La disposición de cuarenta ventanas en la zona estructuralmente más solicitada

Ello supuso conferir al edificio y, en particular, a la cúpula como su elemento más representativo, un marcado carácter simbólico, a cambio de debilitar su sección resistente. Por segunda vez, el espíritu se impone a la materia.

Para solventar el problema planteado, los constructores ampliaron el canto de la cúpula en la zona de arranque, como puede apreciarse en la sección anterior y en la fotografía izquierda de la página siguiente. Vista desde el interior, la cúpula parece flotar sobre un halo de luz, como se observa en la fotografía siguiente derecha.



La utilización de materiales aligerantes

La cúpula está formada por cuarenta nervios, que enmarcan las ventanas, y cuarenta sectores de plementería. En la construcción tanto de los nervios como de las plementerías, se utilizaron exclusivamente ladrillos ligeros de Rodas.

No se adoptó la técnica de origen romano, frecuente en la época, consistente en incorporar, como material aligerante, tubos cerámicos encajados entre sí. Tal es el caso, entre otros, de la cúpula de San Vitale de Rávena. Esta iglesia, que ha sido estudiada por numerosos autores –Rondelet, Durm, Choisy, Lugli, etc.–, fue iniciada en 526 y terminada en 547. Tiene una cúpula de 16,90 m de diámetro y, hasta los riñones, $\frac{2}{5}$ de su altura, tiene rellenos los senos con ánforas incorporadas al hormigón. Por encima de ellos, la cúpula propiamente dicha está formada por tubos cerámicos enlazados entre sí.

Los tubos cerámicos empleados en su construcción miden 6 cm de diámetro por 14 de largo. Estos, tomados con mortero de cal, conforman la estructura de la cúpula mediante tres hiladas superpuestas en la zona de los riñones y dos hasta la clave. Las hiladas se cierran en planos horizontales sin describir una forma helicoidal decreciente para adaptarse a la de la cúpula.

La amplia difusión de esta técnica constructiva ha confundido a algunos autores sobre su aplicación en Santa Sofía

El ingenio y el pragmatismo

En aquella época, Antemio de Tralles e Isidoro de Mileto desconocían las teorías sobre resistencia de materiales que más tarde desarrollarían Robert Hooke (1635-1703), Claude-Louis Navier (1786-1836) o Jacob Steiner (1796-1863), y tampoco disponían de materiales de elevadas prestaciones estructurales. Sin embargo, entre ambos, y gracias a su percepción, ingenio y capacidad, supieron dar respuesta a los retos estructurales y tecnológicos planteados por las dimensiones de la cúpula de la basílica de Santa Sofía de Constantinopla, y crearon un edificio bello, durable y capaz de absorber sus empujes. En su construcción,



supieron aplicar, de la mejor manera posible, los materiales más ligeros y resistentes que se conocían en la época.

3.3.6. La cúpula de Santa Maria dei Fiore

Cronológicamente, es la tercera de las grandes cúpulas de referencia construidas con materiales pétreos. Supuso la recuperación de técnicas constructivas olvidadas, mediante el análisis de la construcción romana, y su superación como reflejo de una sociedad que, a partir de aquellos tiempos, iba a avanzar inexorablemente hacia la modernidad.

En 1418, concluidas las naves de la catedral de Florencia, se convocó un concurso para la construcción de la cúpula, cuyos competidores más significados fueron Lorenzo Ghiberti (1378-1455) y Filippo Brunelleschi (1377-1446).

Ganó el concurso Brunelleschi, gran conocedor de la construcción romana, bizantina y medieval. De la primera, utilizó los arcos de fábrica de ladrillo; de la segunda, las nervaduras y la reinterpretación de la técnica de doble capa.

De la arquitectura medieval, se inspiró en las cúpulas apuntadas cistercienses. La forma apuntada presenta, como se ha comentado al analizar las bóvedas, la ventaja de reducir sensiblemente los empujes (esfuerzos horizontales) que generaría una cúpula semiesférica.

La construcción de la cúpula propiamente dicha se inició en 1420 y terminó en 1436. Ese mismo año, se convocó un nuevo concurso para la realización de la linterna, que volvió a ganar Filippo Brunelleschi.

Las características técnicas más destacables de su diseño, que la convierten en un hito de la historia de la construcción, son:

- Se trata de una cúpula gallonada.
- La cúpula se apoya exenta sobre un tambor.
- Tiene un ingenioso sistema de contención de los empujes.
- Sigue un procedimiento edificatorio que no requiere cimbras completas.
- Dispone una linterna de grandes dimensiones.
- Utiliza un sistema de doble hoja de fábrica de ladrillo.
- Emplea los materiales de forma eficiente.

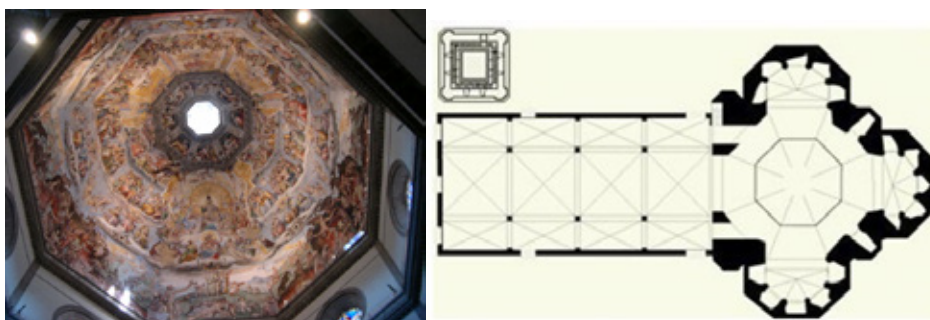
A continuación, se comentan en detalle cada uno de ellas.

La cúpula gallonada

Al tratarse de una cúpula gallonada, no está constituida ni por media esfera ni por un casquete esférico. La cúpula de Santa Maria dei Fiore está formada por ocho sectores de cilindro, cuyo radio es $\frac{6}{7}$ el diámetro del octógono de la base.



La forma gallonada simplifica la construcción, puesto que las directrices que enlazan los ocho arcos que conforman la silueta de la cúpula son líneas rectas, como puede apreciarse en la fotografía inferior izquierda, y no arcos de círculo, como sucedería si se tratase de una cúpula esférica. Su perfil apuntado es, además, clave en la reducción de los empujes que genera sobre el tambor.



La luz entre caras es de 41,70 m y su dimensión exterior, de 45,50 m. Interiormente, la cúpula alcanza una altura de 100 m. La altura total, incluida la linterna, es de 114,50 m.

El esquema de planta (v. fotografía superior derecha) permite apreciar que la planta de Santa Maria dei Fiore presenta una gran centralidad, solamente alterada en uno de sus ejes por la necesidad de disponer de una nave de gran capacidad para albergar a los fieles.

Dicha centralidad es consecuencia, tanto del enorme espacio diáfano generado por el tamaño de la cúpula, capaz de absorber, por sí solo, una importante congregación de personas, como de la necesidad de ampliar y rigidizar las secciones resistentes de los muros para absorber las cargas procedentes de ella. Obsérvese, en el mismo esquema, el empleo de alternancias hueco-lleño, siguiendo la tradición constructiva romana.

El apoyo exento de la cúpula sobre un tambor

A diferencia de Santa Sofía de Constantinopla, cuya cúpula se asienta a la altura de coronación de los arcos que salvan la luz de la nave, la cúpula de Santa Maria dei Fiore se apoya sobre un tambor octogonal de 12,00 m de altura.

A su vez, dicho tambor descansa sobre los arcos de la nave cuya clave se encuentra a 38,50 m sobre el nivel del suelo de la nave. El tambor dispone de ocho ventanas circulares, resueltas con fábrica de sillería de perfil simétrico y, por tanto, doblemente abocinadas. Su luz libre es de 5 m y el diámetro exterior mide 8,25 m. La culminación del tambor y, por tanto, el inicio de la cúpula se producen a 58 m del suelo.



La fotografía inferior izquierda muestra, en primer término, la cubierta de la nave principal, que actúa como contrarresto de los empujes de la cúpula y, al fondo, el tambor, los óculos y el perfil de la cúpula, coronada por la linterna. La fotografía de la derecha permite apreciar que, en la zona de cabecera, la construcción se organiza para ampliar la base de la cúpula y conducir sus empujes hasta el suelo.

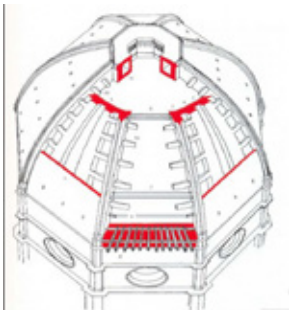


Debido a la presencia del tambor, el arranque de la cúpula de Santa Maria dei Fiore se encuentra 37 m por encima del nivel de inicio de la cúpula del Panteón de Agripa y 13 m más alto que la imposta de la cúpula de Santa Sofía.

Ello muestra una progresión técnica notable con respecto a la construcción romana. El hecho negativo es que, para lograrlo, tuvieron que transcurrir novecientos años desde la construcción de Santa Sofía de Constantinopla. Las razones de este atraso secular son bien conocidas: las guerras de religión y sus efectos colaterales, como las pestes que asolaron Europa durante la Edad Media.

El ingenioso sistema de contención de los empujes de la cúpula

Además de la aportación de su perfil apuntado, la contención de los empujes de la cúpula interior se realiza mediante anillos de refuerzo, resueltos con grandes escuadrías de madera de roble. El procedimiento de unión entre las piezas de madera, mediante barras de acero, las capacita para absorber esfuerzos de tracción. El esquema inferior permite apreciar tanto el aro inferior de tracción como el soporte hueco de la linterna, conjugando factores que combinan la rigidez con la ligereza.



Con base en ello, Brunelleschi anticipa, en una obra de fábrica, soluciones constructivas propias del hormigón y del acero.

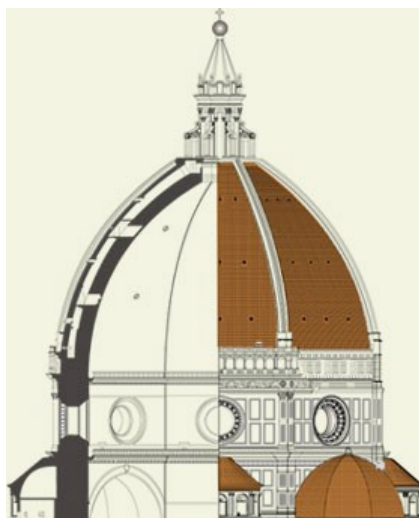


El brillante planteamiento técnico de la cúpula no debe dejar de lado la consideración del edificio en su conjunto. Sin la adecuada disposición espacial de sus trazas, como ya se ha indicado, la cúpula no dispondría, en plenitud, de estabilidad estructural.

El procedimiento edificatorio, sin necesidad de cimbras completas

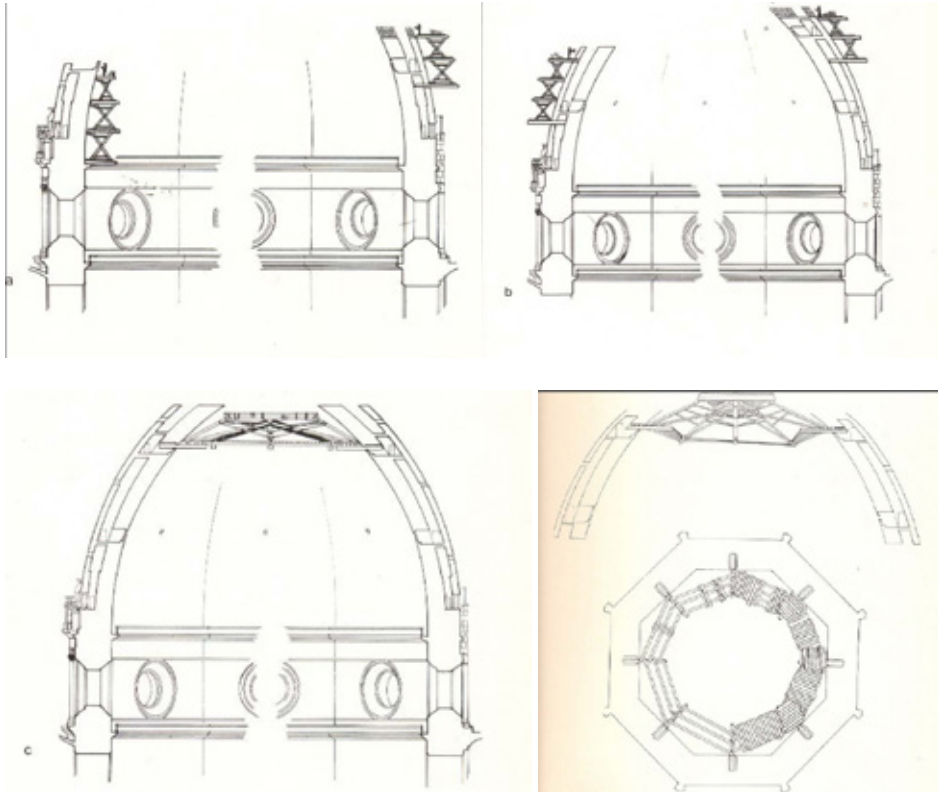
La estructura de la cúpula, detallada en el gráfico inferior izquierdo, está formada por ocho nervios principales, que coinciden con las aristas de los sectores del cilindro, más dos nervios en cada una de las caras. Ello supone un total de 24 nervios de refuerzo. Están contruidos con fábrica de ladrillo, colocado a espina-peze. Dichos nervios parten de la base de la cúpula y se apoyan sobre un zócalo de piedra y ladrillo.

En el gráfico de la derecha, pueden apreciarse, en la sección, los dos niveles de huecos en que se fijaron los apoyos principales de los andamios necesarios para realizar la cúpula, de acuerdo con los gráficos que se acompañan a continuación.



Horizontalmente, se disponen un total de once anillos, formados por arcos de ladrillo cuya función es enlazar, rigidizar y estabilizar los nervios. Se crean así porciones espaciales que se completan con las dos capas de plementería, la interior y la exterior, y así se forma, durante la construcción, un conjunto autoestable, puesto que el avance de la obra se realiza cerrando anillos horizontales.

Los trabajos se desarrollaron sin necesidad de cimbras completas, desde andamios volados, apoyados en la obra construida, diseñados por el propio Brunelleschi, como se muestra en los gráficos siguientes.

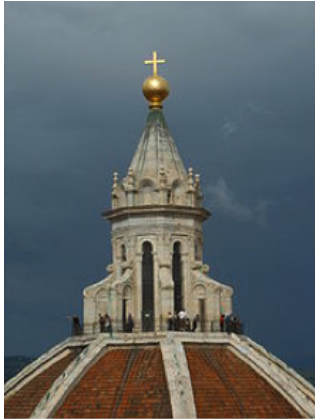


La disposición de una linterna de grandes dimensiones

La linterna, iniciada en 1446, después de que el propio Brunelleschi ganara el concurso correspondiente, estuvo largo tiempo parada. No fue concluida hasta 1461 por Michelozzo di Bartolomeo (1396-1472), muerto ya su autor.

Se calcula que la cúpula pesa entre 25.000 i 27.000 t, de las cuales un 10,50 % (unas 2.700 t) corresponde a la linterna situada a 100 m del suelo. Su altura total es de 16 m, equivalente a un edificio de cinco plantas. Al igual que la cúpula, su planta es octogonal, y la orientación de cada una de sus caras coincide con la de los gallones de la cúpula.

La fotografía siguiente de la izquierda permite comparar el tamaño de la linterna con la escala humana. En las dos restantes, destacan los contrafuertes perforados que permiten circular en todo el perímetro de la linterna y contribuyen a rigidizar y a repartir la carga de la misma, de forma homogénea, sobre la cúpula.



La utilización de un sistema de doble hoja de fábrica de ladrillo

Las dos hojas de fábrica de ladrillo enlazadas entre sí por los veinticuatro nervios y los once anillos dan rigidez y aligeran la construcción, en un 45 %, con respecto a los procedimientos "a la romana". El resultado final, a efectos del comportamiento estructural de las tres capas de fábrica de ladrillo, en que la intermedia es aire en su mayoría, es prácticamente equivalente al de una estructura maciza. Con todo, en la construcción tuvieron que emplearse más de cuatro millones de ladrillos de excelente calidad, fabricados bajo la supervisión del propio Brunelleschi.

Las fotografías inferiores muestran el espacio resultante entre la hoja exterior y la interior por el cual es posible, no sin dificultad, ascender hasta la linterna.



El empleo eficiente de los materiales

En la construcción de la cúpula de Santa Maria dei Fiore, Brunelleschi empleó piedra en la base de ambas hojas; fábrica de ladrillo, colocado a espinapez, en la erección de los nervios y de las dos hojas que conforman el grueso la cúpula;



escuadrías de madera enlazadas con barras de hierro, para absorber los esfuerzos de tracción generados por el peso de la fábrica, y mármol blanco para definir exteriormente las aristas.

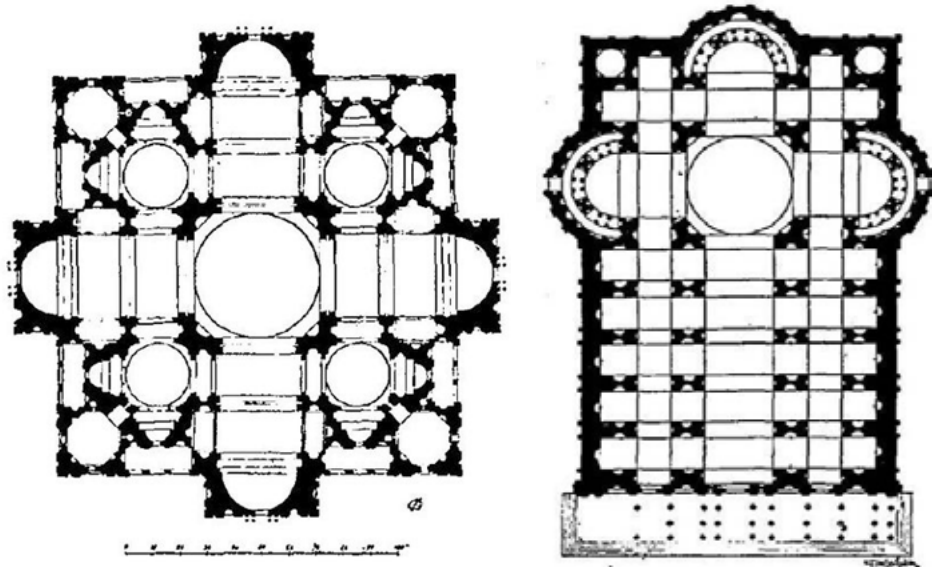
El acabado de la superficie exterior de los gallones mediante tejas confiere al conjunto una gran nitidez formal, apoyada en un notable equilibrio cromático. La cúpula florentina es uno de los pocos monumentos considerados unánimemente perfectos, como fiel reflejo e interpretación, por parte del artista, del sentimiento colectivo.

3.3.7. La cúpula de San Pedro del Vaticano

La cúpula de San Pedro del Vaticano constituye la manifestación de nuevos avances en la técnica constructiva, con respecto a la obra de Brunelleschi, tanto por la rapidez de su construcción como por los mecanismos científicos de análisis empleados en su reparación.

La basílica actual se inició en 1506 bajo el papado de Julio II, siguiendo el proyecto de Donato Bramante (1444-1514) (v. gráfico inferior izquierdo). Este proyectó un edificio con planta de cruz griega y cinco cúpulas, cuatro en el perímetro y la central, de mayores dimensiones.

A la muerte de Bramante, solo se habían construido los cuatro pilares que habían de sustentar la gran cúpula central. Fue sustituido al frente de las obras por Rafael Sanzio (1483-1520), que proyectó, para el templo, la planta de cruz latina representada en el gráfico inferior derecho.





Después un período de incertidumbre, en que las obras apenas avanzaron, debido a la muerte prematura de Rafael, Miguel Ángel (1475-1564) fue nombrado por el papa Pablo III director de la obra de San Pedro en 1546, cuando tenía ya setenta y un años de edad, y se ocuparía de ella hasta su muerte acaecida en 1564.

Miguel Ángel dio a la obra un carácter más colosal y recio. Los pilares proyectados por Bramante resultaron de sección insuficiente, por lo que tuvieron que ser ampliados para soportar la gran cúpula que tenía que descansar sobre ellos, situada sobre el altar mayor.

Los trabajos de construcción de la cúpula fueron terminados 24 años después de la muerte de Miguel Ángel, según el diseño definitivo de Giacomo della Porta (1533-1602), encargado de terminar la cúpula propiamente, y Domenico Fontana (1543-1697), autor de la linterna.

En 1606, el papa Pablo V ordenó la continuación de las obras mediante una planta de cruz latina para ampliar la capacidad del templo. Este fue consagrado el 18 de noviembre de 1626 durante el pontificado de Urbano VIII.

Los aspectos más significativos de la construcción de la cúpula de San Pedro del Vaticano son los siguientes:

- Los avances técnicos con incidencia formal
- El apoyo sobre pechinas y el sistema de contrarresto
- Las medidas, los pesos y el tiempo de ejecución
- Los problemas posteriores y su solución

A continuación, se comenta cada uno de ellos.

Los avances técnicos con incidencia formal

La cúpula del San Pedro del Vaticano, por su concepción constructiva orientada a minimizar y a contrarrestar sus empujes, constituye un avance técnico con respecto a las soluciones de Brunelleschi.

Si bien se mantiene el concepto de las dos hojas enlazadas de la cúpula florentina, la vaticana presenta en la hoja exterior mayor peralte, cuyo perfil definitivo se debe a Giacomo della Porta, según se muestra en el gráfico inferior izquierdo y en la fotografía central de la página siguiente

Desde el punto de vista formal, la cúpula visible desde el interior es una media esfera, en lugar de los ocho sectores de cilindro que conforman la cúpula florentina (v. fotografía izquierda de la página siguiente). Ello supone también una mayor complejidad de construcción, por la doble curvatura de las superficies resultantes.



Al igual que Brunelleschi, Miguel Ángel construye la cúpula sobre un tambor para darle un mayor realce (v. fotografía central). La diferencia técnica entre ambas cúpulas está en la concepción de la planta: octogonal la florentina y circular la romana.



El apoyo sobre pechinas y el sistema de contrarresto

La cúpula florentina descansa directamente sobre los ocho arcos que conforman el crucero; en cambio, la cúpula vaticana se apoya sobre pechinas, es decir, sobre bóvedas formadas por triángulos esféricos que transmiten sus esfuerzos a los arcos torales y a los pilares. Las pechinas facilitan la transición de la planta cuadrada a la circular y conducen el peso de la cúpula a los soportes. La fotografía superior derecha muestra parcialmente dos de las pechinas y la nave central de la basílica.

El sistema de contrarresto de los empujes de la cúpula está formado por 16 muros radiales, cada uno de ellos rematado por dos columnas. Su dimensión longitudinal coincide con la de los arcos torales sobre los cuales que se asientan. La función de los muros radiales es ofrecer rigidez al tambor para absorber los empujes de la cúpula.

Con la disposición constructiva indicada, el tambor es, a la vez, rígido y ligero, puesto que en los espacios intermedios se disponen dieciséis grandes ventanas (2,80 × 5,60 m) que alternan frontones curvos y triangulares.

La disposición de los muros radiales coincide con las nervaduras situadas en la cara exterior de la cúpula. El peralte de la hoja exterior contribuye a verticalizar los empujes de la hoja interior. La resultante de ambos esfuerzos es conducida y absorbida por los arcos torales.



Las medidas, los pesos y el tiempo de ejecución

Las dimensiones de la cúpula son extraordinarias, considerando la técnica constructiva empleada y la época de construcción. Tiene un diámetro interior de 41,50 m y una altura de 132 m, 136,57 hasta el extremo superior de la cruz.

El diámetro exterior es de 58,90 m. La linterna mide 17 m de altura. El arranque de la cúpula se produce a 77 m de la cota del pavimento, 19 m por encima del de la cúpula florentina. En cambio, su peso, gracias a los avances técnicos y a la experiencia, es más ligero que el de la cúpula de Santa Maria dei Fiore. Se estima en unas 14.000 t, es decir, es un 40 % más ligera.

Más extraordinario aún es breve tiempo de ejecución de la obra, bajo la dirección de Giacomo della Porta: veintidós meses, contados desde su inicio el 15 de julio de 1588. Cabe recordar que la construcción de la cúpula de la catedral de Florencia duró dieciséis años. Sin embargo, una vez concluida la cúpula romana, la terminación de su linterna precisó siete años (1590-1597).

Los problemas posteriores y su solución

La celeridad en la construcción de la cúpula ocasionó problemas ulteriores. El mortero de cal aérea empleado en las fábricas no tuvo tiempo de fraguar, al tener que conjugar la gran masa de la obra con el reducido tiempo de ejecución. El resultado del cúmulo de circunstancias descritas se tradujo en graves asentamientos, que llegaron a comprometer la estabilidad de la cúpula.

En 1743, el papa Benedicto XIV convocó al físico y matemático Giovanni Poleni (1683-1761) a Roma para que dictaminara sobre las posibles soluciones a los problemas de la cúpula vaticana. Como resultado de sus trabajos y observaciones, junto con el arquitecto Luigi Vanvitelli (1700-1773), propuso zunchar la cúpula mediante anillos de hierro.

Las operaciones de zunchado se llevaron a cabo en 1748. Aquel mismo año, Poleni publicó su trabajo *Memorie storiche della gran cupola del Tempio Vaticano*, en que expone el proceso de refuerzo llevado a cabo, cuyo éxito es atestiguado por el tiempo transcurrido desde la intervención.

3.3.8. La cúpula de la catedral de San Pablo de Londres

La catedral de San Pablo de Londres constituye un hito extraordinario en la historia de la arquitectura, por las razones siguientes:

- El escaso tiempo transcurrido entre el proyecto y el inicio de las obras.
- La rapidez de su construcción, que le confiere una unidad estilística y formal que no poseen la mayoría de los edificios semejantes.



- Las soluciones técnicas empleadas.
- La época en que fue llevada a cabo, que coincidió con la transición de la construcción empírica a la científica.

Al igual que la cúpula de San Pedro del Vaticano está asociada a Miguel Ángel, la cúpula y toda la catedral de San Pablo de Londres está indisolublemente unida a la figura de su arquitecto, Sir Christopher Wren (1632-1723).

En el diseño de la nueva catedral, Wren se inspiró en la basílica vaticana de San Pedro. Abordó un proyecto conciliador entre la idea tradicional de “una catedral” con la modernidad de un templo con cúpula. Mediante este proceso, buscó su integración orgánica en la ciudad y, al mismo tiempo, dominarla con un símbolo de autoridad y de poder. A la vista de los resultados, puede afirmarse que lo consiguió plenamente.

Su construcción duró solamente 35 años. Se inició en 1675 y concluyó en 1710, período de tiempo suficientemente breve para garantizar la unidad formal del edificio y convertirlo en un raro ejemplar, si se compara con los períodos de ejecución de las catedrales góticas, en especial de la catedral de Florencia.

Su referencia más directa, la basílica de San Pedro del Vaticano, fue construida a lo largo de 91 años, entre 1506 y 1597. La comparación de los tiempos invertidos en edificarlas permite concluir que la catedral de San Pablo de Londres se construyó a un ritmo 2,6 veces superior que la basílica vaticana.

El emplazamiento del edificio coincide con el de las ruinas de la catedral medieval, de menor envergadura, destruida durante el gran incendio de Londres de 1666.

La cúpula de San Pablo de Londres mide “únicamente” 30,80 m de diámetro interior, pero presenta una serie de características constructivas que la hacen única:

- El concepto estructural
- La iluminación natural
- El doble tambor
- El peso y la altura de la masa suspendida

A continuación, se explican en detalle cada uno de ellos.

El concepto estructural

La estructura de la cúpula está formada por tres hojas: la primera, una cúpula hemisférica, de fábrica de ladrillo, abierta por la parte superior para recibir la luz de la linterna (v. gráficos inferiores).



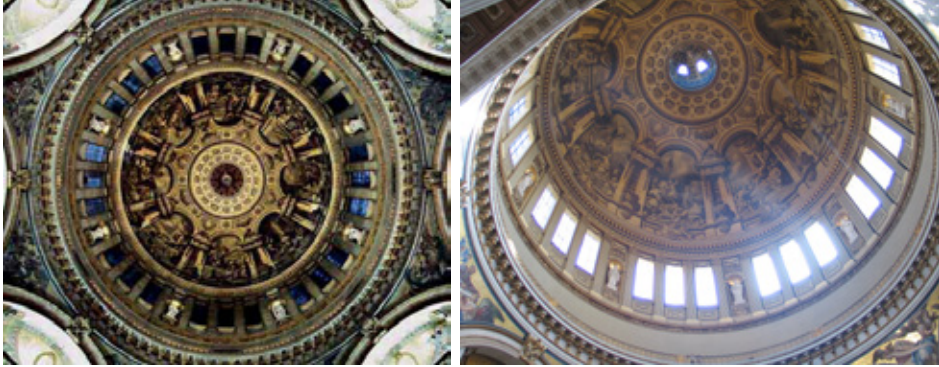
La cúpula hemisférica está soportada por una columnata inclinada, con la doble función de crear una perspectiva acelerada y conducir las cargas y los empujes del conjunto hacia los arcos de soporte. El diámetro de la zona inferior de la columnata es de 34,15 m de diámetro. En la zona de los riñones, para absorber los empujes, se colocan 32 cuñas radiales de fábrica de sillería, dotadas de óculos para reducir su peso.



La segunda hoja es una estructura troncocónica de mampostería, reforzada mediante cuatro zunchos de hierro. Su función principal es recibir el peso de la linterna y transmitirlo a los soportes, si bien también sirve de apoyo a las cerchas de madera y al entramado que conforma la tercera hoja. Esta define el perfil hemisférico exterior.

La iluminación natural

La parte superior del tronco del cono que soporta la linterna se remata mediante una bóveda. Como puede apreciarse en el gráfico superior derecho, esta dispone de ocho aberturas abocinadas, que coinciden con la base de la linterna, mediante las cuales se amplía la luz que recoge ésta. Debido a su posición elevada, pasan desapercibidas desde el nivel de la calle, aunque su presencia favorece, de forma significativa, la iluminación de la zona superior de la cúpula, como muestran las fotografías siguientes. Obsérvese, en la fotografía derecha, la continuidad y la conjunción perfecta de la perspectiva acelerada, generada por la inclinación de las columnas de soporte, con la pintura arquitectónica que decora la cúpula.



El doble tambor

El primer tambor, de 19 m de altura, se inicia a 34 m de la cota del pavimento interior. Culmina en la llamada Stone Gallery, a 53 m del nivel del suelo de la nave.

La falsa cúpula exterior se inicia en el segundo tambor, de 11 m de altura, a 64 m del suelo. Esta culmina en la Golden Gallery, situada en la base de la linterna, a 85 m de altura.

Ello confiere esbeltez al perfil aparente de la cúpula, al quedar exento de la masividad de las naves, como puede apreciarse en las fotografías siguientes.



Las dos fotos siguientes correspondientes a la basílica de San Pedro del Vaticano (la de la izquierda y la central) permiten concluir que solo desde una visión lejana y elevada se puede apreciar por completo su cúpula, puesto que desde la plaza queda eclipsada por la fachada. En la fotografía de la derecha, de San Pablo de Londres, tomada desde el nivel de calle, la cúpula destaca majestuosa por encima del conjunto de la construcción, merced a su doble tambor.



El peso y la altura de la masa suspendida

Se calcula que el conjunto de la cúpula, incluido el doble tambor, pesa 66.000 t. Se descarga sobre los ocho arcos del crucero, que culminan a 33 m de altura. Ello supone un peso 2,5 veces superior al de la cúpula de Santa Maria del Fiore.

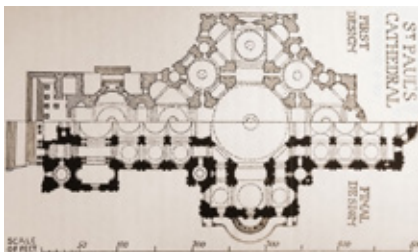
La linterna, con una altura total de 23 m, 6 más que la de San Pedro del Vaticano, tiene un peso de 850 t. La altura total del conjunto formado por la cúpula y la linterna es de 111 m hasta la parte superior de la cruz.

La construcción de la catedral de San Pablo de Londres, en tan solo 35 años, permite ofrecer una unidad estilística y soluciones constructivas muy estimables. La fotografía inferior izquierda muestra, superpuestos, los dos proyectos planteados Christopher Wren para la misma, en los cuales la cúpula del crucero constituye un elemento inmutable.

El proyecto que se llevó a cabo finalmente fue el inferior. A través del mismo, supo hacer frente, de forma inteligente y eficaz, a los problemas estructurales y de escala planteados por la masividad de la obra, y obtuvo grandes resultados, estéticos y funcionales, con materiales de escasas prestaciones mecánicas.

Téngase en cuenta que los materiales empleados seguían siendo similares a los de las épocas romana y medieval. En las circunstancias de la época, la evolución constructiva solo podía basarse en las mejoras derivadas de la disposición espacial de los materiales, para obtener de ellos las mayores prestaciones.

La fotografía inferior derecha es una buena muestra de ello: obsérvese el tamaño de los balaustres, comparado con el de una persona, para conseguir la adecuada proporción de la balaustrada dentro del conjunto del edificio.





3.3.9. La cúpula del Panteón de Hombres Ilustres de París

La cúpula del Panteón de Hombres Ilustres no se incluye en este apartado por su tamaño, pues los ejemplos anteriores, pese a ser más antiguos, presentan luces mayores.

Su interés se centra en la confluencia, durante el proyecto y su construcción, de una serie de factores temporales, estilísticos y técnicos. Ellos marcan el final de un ciclo en la técnica constructiva, asociado a los cambios sociales derivados de la Revolución Francesa, y la aparición de nuevos materiales.

Como se verá a lo largo de la exposición, puede decirse que el Panteón y su cúpula son, a la vez, los últimos representantes de la vieja escuela y los primeros de la nueva. Construcción empírica y científica se funden y generan un modelo digno de ser analizado.

La cúpula del Panteón de Hombres Ilustres de París forma parte destacada de la iglesia de Sainte-Geneviève, patrona de París, obra de Jacques-Germain Soufflot (1713-1780). Su construcción se desarrolló entre 1764 y 1790 por lo que, a la muerte de Soufflot, fue terminada por sus socios Jean-Baptiste Rondelet (1743-1829) y Maximilien Brébion (1716-d.1792).

Por decreto de la Asamblea Nacional Francesa, el 4 de abril de 1791 la iglesia de Sainte-Geneviève se transformó en Panteón, a fin de que “el templo de la religión sea el templo de la patria, que la tumba de un gran hombre sea el altar de la libertad”.

Los aspectos más significativos de su construcción son los siguientes:

- La singularidad
- La integración y la tradición
- Las razones constructivas, que se imponen al diseño
- El tratamiento de la luz, las lesiones y la frontera

Se detallan a continuación.

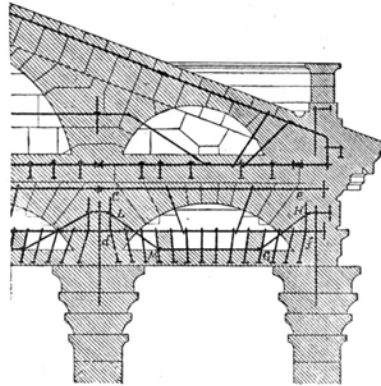
La singularidad

Si bien las dimensiones de la cúpula son relativamente modestas, comparadas con los ejemplos precedentes: 21,20 m de diámetro, 75,15 m hasta la base exterior de la linterna y 85 m en la cúspide de la linterna. Son su concepción espacial y las técnicas empleadas en su construcción las que convierten la cúpula del Panteón en el último gran modelo, realizado con materiales pétreos, que puede ser utilizado como referente. La fotografía inferior izquierda muestra, en primer término, una imagen general del pórtico neoclásico, con el doble tambor coronado por la cúpula al fondo.

Es preciso considerar, además, que el Panteón es uno de los primeros edificios en que se incorporan barras de hierro en las fábricas pétreas con objeto de me-



jorar su respuesta estructural frente a los esfuerzos de flexión y de cortante. Si bien el experimento no llegó a cuajar por los problemas derivados de la oxidación del hierro, las formas en que este es dispuesto anticipan las propias de las armaduras introducidas en el hormigón, con similares propósitos mecánicos, como puede apreciarse en la fotografía inferior derecha.



Por las razones expuestas, puede afirmarse que, sin ser un edificio de dimensiones fuera de lo común, presenta un alto contenido técnico, conceptual y simbólico y, como tal, es reconocido en los tratados de arquitectura y de construcción.

La integración y la tradición

Desde el punto de vista estilístico, el Panteón es un trabajo de síntesis, que es resultado del análisis y del conocimiento de la historia de la arquitectura, tanto romana, como gótica y renacentista, por parte de Soufflot.

El pórtico de columnas sobre el cual descansa un frontón clásico está inspirado en el [Panteón de Agripa](#), en [Roma](#), mientras que la cúpula tiene como referente la de la [catedral de San Pablo](#) en [Londres](#), y ambas son herencia, al igual que la cúpula de San Pedro del Vaticano, del [Tempietto de San Pietro in Montorio](#) (1502-



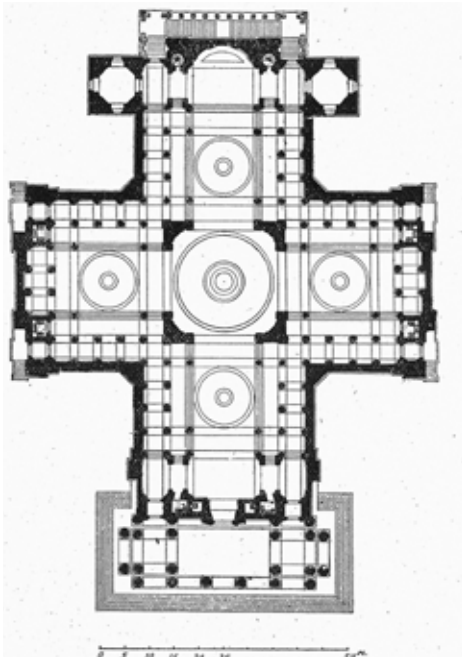
1510) en [Roma](#), obra de Donato Bramante (1444-1514), expresión perfecta del ideal renacentista. Como prueba de todo ello, se observa que el Tempietto (v. fotografía inferior izquierda de la página anterior) guarda una coincidencia formal con la cúpula del Panteón (v. fotografía anterior central) y esta, a su vez, con la cúpula de la catedral de Londres (v. fotografía anterior derecha).

El proyecto de Soufflot, en líneas generales, se mantuvo comprometido con el ideal grecogótico que inspiró buena parte de la cultura arquitectónica del siglo XVIII.

Su planta de cruz griega, aunque con recrecidos en su eje longitudinal, es conceptualmente ideal, desde el punto de vista purista de la composición arquitectónica (v. fotografía inferior izquierda). Tal organización espacial es poco frecuente en la tradición litúrgica, por cuestiones prácticas. Baste recordar que tanto la basílica de San Pedro del Vaticano como la catedral de San Pablo de Londres fueron concebidas inicialmente mediante sendas plantas de cruz griega y, finalmente, construidas siguiendo trazas de cruz latina.

La diferencia del Panteón con respecto a estos modelos reside, entre otros aspectos, en que, en el interior de los cuatro brazos de las naves, el espacio se organiza mediante columnas aisladas, que soportan un entablamento recto, como ya habían preconizado los historiadores de la arquitectura gótica Jean-Louis de Cordemoy (1660-1713) y Marc-Antoine Laugier (1713-1769) (v. fotografía inferior derecha).

La presencia del pórtico en la zona de acceso y la adición de una crujía en la fachada opuesta acaban configurando una notable planta alargada de 110 × 84 m.



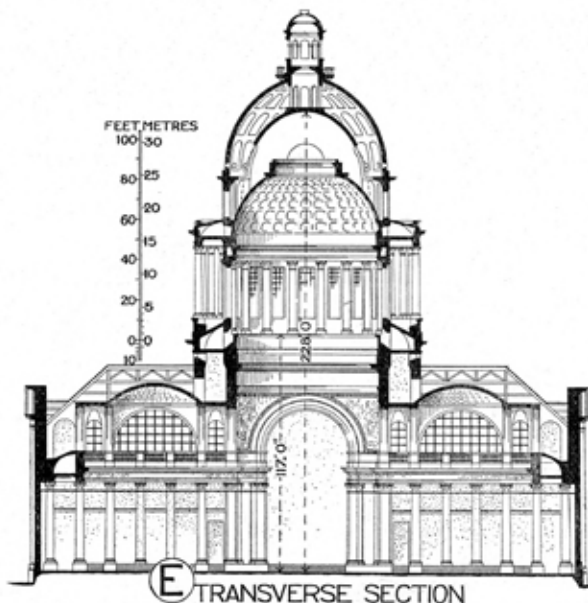


Las razones constructivas se imponen al diseño

El efecto de transparencia espacial, esencialmente gótico, otorgado por el uso de columnas exentas y la renuncia de las pilastras llevó a Soufflot al extremo de disminuir peligrosamente el volumen y el espesor de los cuatro pilares que habían de soportar la cúpula central, lo que provocó no pocas críticas sobre su fragilidad y, además, bastantes indecisiones sobre las dimensiones y la forma de aquella. Es un ejemplo claro de cómo el cálculo adquiere ya en esta época un papel determinante en la adopción de las soluciones constructivas.

Se tenía en consideración el notable peso suspendido impuesto por la solución formal y constructiva, compuesta por un triple cascarón y un doble tambor, unas 16.000 t, que descansaban sobre soportes muy esbeltos. A diferencia del tronco de cono que conforma la segunda cáscara de la cúpula de la catedral de San Pablo de Londres, la segunda cúpula del Panteón presenta un perfil parabólico y la tercera cúpula, apuntada, es de obra de fábrica en lugar del entramado de madera que remata la catedral de Londres. La doble cúpula superior se apoya directamente, a través del segundo tambor, en la galería formada por 20 columnas interiores, mientras que las 32 columnas exteriores que definen el ámbito del primer tambor actúan, fundamentalmente, a modo de pináculos como contrarresto de los empujes.

Todas las columnas indicadas miden 11 m de altura. Su arranque, que marca el inicio del primer tambor, se encuentra a 35,65 m sobre el suelo de la nave. La primera cúpula tiene su imposta a 49,70 m. El detalle de estas dimensiones y la disposición espacial de los elementos descritos pueden apreciarse en la sección transversal siguiente.





Los cuatro pilares principales de soporte del conjunto de la cúpula fueron convertidos finalmente en pilastras. El equipo formado por Jean-Baptiste Rondelet y Maximilien Brébion alteró, en beneficio de la seguridad y con penalización de la estética, la versión purista que Soufflot había proyectado.

Con el propósito de mitigar los problemas constructivos derivados de la construcción de una cúpula multicapa sobre un doble tambor, Soufflot empleó a fondo los recursos técnicos de la construcción. Diseñó arbotantes camuflados, que situó en la base del primer tambor, y descargó parcialmente los empujes de la cúpula sobre las columnas del tramo siguiente, según puede apreciarse en la planta y en la sección adjuntas. También modificó, con objeto de reducir sus empujes, el diseño constructivo de la cúpula exterior y lo hizo parabólico casi apuntado.

El tratamiento de la luz, las lesiones y la frontera

La preocupación de Soufflot por tamizar la luz en el interior del templo se manifiesta en el segundo tambor de la cúpula exterior con la presencia de 16 ventanas. La luz que penetra por ellas acaba incidiendo en el interior de la nave reflejada, a través del óculo de la primera de las hojas que conforman el conjunto de la cúpula. La luz indirecta confiere una mejor visión de la segunda cúpula, a través del óculo de la primera.

La utilización de armaduras metálicas para reforzar la respuesta mecánica de las piedras produjo, a causa de su oxidación, graves deterioros de los sillares, que obligaron a un largo proceso de restauración que se inició en 1985 y terminó en 2010.

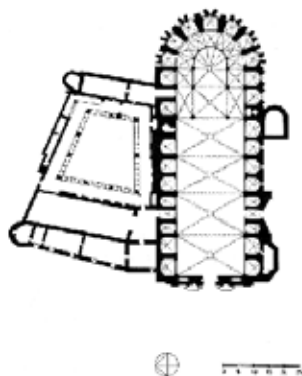
A pesar de haberse mantenido durante dos siglos, la técnica de la piedra armada muestra su falta de competencia, en cuanto a durabilidad, frente a soluciones constructivas basadas exclusivamente en la utilización de materiales pétreos.

El experimento constructivo de reforzar las fábricas de piedra con hierro es un ejemplo más de la excepcionalidad temporal de la construcción del Panteón. Una época de ensayos e innovaciones en que los éxitos y los fracasos ayudaron a hacer de la construcción una ciencia.

El Panteón de París constituye un ejemplo de análisis constructivo y de síntesis estilística. Marca, asimismo, una frontera en la historia de la construcción, en que los materiales pétreos dejan paso a nuevos materiales y a renovados conceptos espaciales, funcionales y técnicos para resolver grandes luces.

3.3.10. La catedral de Girona y La Sagrada Familia

La catedral de Girona (v. fotos siguientes) desarrolló parte de su construcción de mayor interés técnico, en un espacio temporal coetáneo a la cúpula de Santa Maria dei Fiore. Constituye un ejemplo extraordinario de adaptación a los tiempos.



La catedral gótica de Girona se asienta sobre el espacio que había ocupado anteriormente la catedral románica. Se inició en 1312 y el altar mayor se consagró en 1347. La planta del proyecto original era de tres naves. Con base en el mismo, se construyó el ábside y el primer tramo de las naves.

En 1386, se planteó la posibilidad de cambiar la disposición de la planta a una sola nave. Ello fue objeto de controversia entre los maestros de Barcelona Bernat Roca y Pere Arvei, y Pere Sacoma (¿-1393) que a la sazón estaba al frente de las obras de la catedral de Girona. Mientras los dos primeros defendían la planta de tres naves, Sacoma abogaba por una nave única.

En 1416, se llevó a cabo una nueva consulta entre los doce maestros más importantes de Catalunya, que provocó nuevas opiniones encontradas. Finalmente, el obispo Dalmau de Mur (¿-1456), junto con el capítulo de la catedral, zanjó la cuestión en 1417 y decidió la construcción de una nave única. Dicha nave mide 22,98 m de anchura por 34 m de altura. Los trabajos quedaron interrumpidos, a causa de la Guerra Civil catalana, entre 1460 y 1462. La conclusión de la gran nave gótica se prolongó hasta 1604.

Sorprende que la visión de futuro del obispo Dalmau de Mur no haya sido aplicada en el Templo de la Sagrada Familia de Barcelona. La estructura proyectada por Antoni Gaudí (1852-1926) mediante un sistema grafoestático en tres dimensiones constituyó, en su momento, una sublimación del estilo gótico (v. foto siguiente izquierda). Se extraía el máximo rendimiento del trabajo a compresión de las fábricas de sillería realizando columnas arbóreas de fustes inclinados (v. foto siguiente derecha).

La nave central de La Sagrada Familia mide 15 m de luz, dimensión aceptable para una construcción sujeta a las limitaciones de las fábricas de piedra pero fuera de contexto cuando, para su construcción, se viene utilizando desde hace décadas y de forma masiva, como material estructural, el hormigón armado, como se muestra en las dos fotografías inferiores.



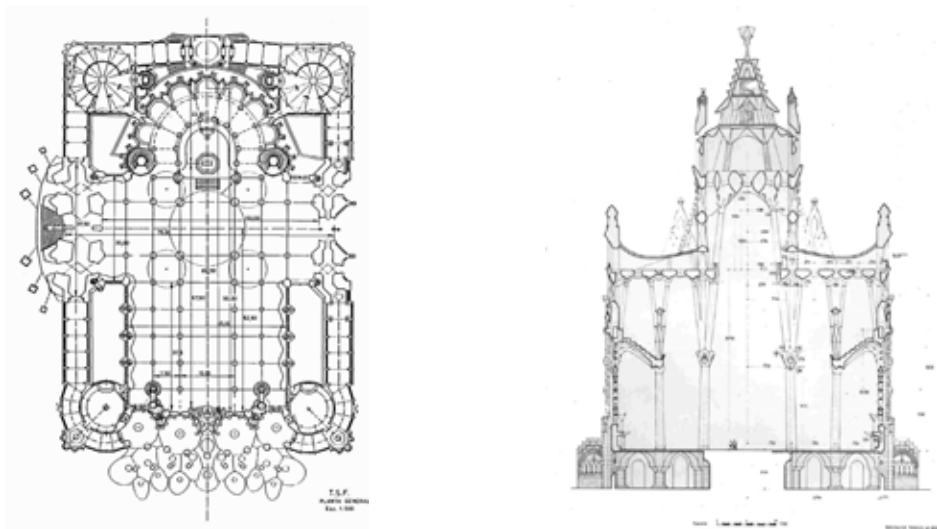
Como referencia, Nôtre Dame de París mide 14 m; la catedral de Amiens, 14,70 m, y 15,00 la de Chartres.

A continuación, se detallan, en metros, las luces de algunas catedrales e iglesias góticas cuya nave principal mide más de 15 m de luz.

- Beauvais 16,00
- Narbona 16,20
- Saint-Jean, Perpiñán 18,50
- Albi 19,00
- Toulouse 19,50
- Saint-Vincent, Carcasona 20,00
- Palma de Mallorca 20,00



Los gráficos inferiores corresponden, respectivamente, a la planta y a la sección de La Sagrada Familia. Con el empleo de hormigón armado, se habrían podido eliminar la mayoría de los pilares de la nave.



Posiblemente, si Gaudí levantara la cabeza, introduciría modificaciones sustanciales en su proyecto para adaptarlo a los tiempos. Fue, en definitiva, lo que hizo a lo largo de toda su vida, ofreciendo en cada obra un nuevo impulso creativo (lo cual no puede decirse de sus sucesores).

3.4. La construcción de grandes luces con hierro y con acero

3.4.1. Introducción

La aplicación en las construcciones arquitectónicas del hierro, en primer lugar, y posteriormente del acero, supuso una revolución técnica y conceptual sin precedentes. Sus elevadas prestaciones mecánicas frente a las de las fábricas tradicionales, permitieron romper barreras y alcanzar metas impensables hasta el momento. Para ello, fue preciso que el hierro pasase de ser un material producido de forma artesanal, apto para la fabricación de aperos de labranza y herramientas manuales, a ser elaborado de forma masiva y con calidades constantes y contrastadas.

Es preciso considerar que, durante la Edad Media y hasta finales del siglo XIX, se empleó como método siderúrgico la denominada *farga catalana*. Con ella se podían alcanzar, mediante un fuelle, temperaturas de hasta 1.500 °C. Las piezas eran calentadas en un lecho de carbón vegetal, martilleadas y, por último, sumergidas en agua o aceite. Se obtenía hierro de forja y superficies duras, puesto que se trataba de acero. El procedimiento, marcadamente artesanal, no era apto para las aplicaciones masivas, propias de la construcción.



La obtención masiva de hierro

Se inicia con la construcción de un alto horno por parte de Abraham Darby (1678-1717). El hecho aconteció en 1709 en Coalbrookdale. Como novedad, en la combustión empleó carbón de coque. La razón del cambio de combustible se debió a la crisis provocada por la carestía del carbón vegetal, a causa de la deforestación a que estaban sometidos los bosques en los albores de la Revolución Industrial.

El primer alto horno producía entre cinco y siete toneladas de hierro por semana, cantidad modesta pero sustantivamente superior a la producida por los procedimientos empleados hasta la época.

Con el advenimiento masivo, en primer lugar, del hierro colado o fundición del hierro y, posteriormente, del acero, la construcción se adapta a los tiempos y genera nuevos modelos de edificios.

El hierro presenta unos niveles de respuesta mecánica impensables en las obras de fábrica, pues, a igualdad de sección, multiplica prácticamente por veinte la resistencia a compresión o por mil la resistencia a flexotracción. Con respecto a la madera, la resistencia a la compresión y a flexotracción es diez veces superior, del orden de 100 N/mm^2 para el hierro, frente a los 10 N/mm^2 , de media, de la madera. Además, el hierro, como producto fabricado, ofrece una fiabilidad muy alta con respecto a su comportamiento estructural. Ello permite rebajar los coeficientes de seguridad con respecto a los materiales que se aplican sin elaboración previa, como la piedra y la madera.

La fundición

La fundición procede del mineral de hierro tratado en los altos hornos y se caracteriza por la presencia de alto contenido de carbono (más del 2 %).

Si bien la fundición presenta algunas ventajas con respecto al acero, entre las cuales destacan la facilidad de moldeo y su mayor pasividad frente a la corrosión, sus inconvenientes son mayores y pesan más en la balanza.

La fundición es un material frágil, frente a la ductilidad del hierro y del acero, por lo que no puede ser laminado. Estas propiedades propiciaron que la fundición en construcción se utilizara, fundamentalmente, para moldear columnas aprovechando su resistencia a compresión.

Abraham Darby III (1750-1791) y John Wilkinson (1728-1808) construyeron en Coalbrookdale, entre 1776 y 1779, el primer puente de fundición, considerado una de las primeras aplicaciones constructivas del hierro. Sus dimensiones modestas, de 60 m de longitud y 18 de altura, y un consumo de 379 t de hierro abrieron el camino a realizaciones mucho más ambiciosas.



La foto inferior izquierda ofrece una visión de conjunto del puente. De la misma, se desprende que el avance técnico lo produce, exclusivamente, el cambio de material. Desde el punto de vista formal, no hay cambios; para salvar la luz, se recurre a un arco del mismo perfil que el que podría adoptar uno de fábrica.

La fotografía de la derecha muestra el detalle de los arcos de fundición, todos iguales, y su arriostramiento. Constituye un avance de los procesos seriados propios de la construcción en hierro y en acero. Incorpora, al concepto de construcción tradicional, el de montaje en obra de elementos prefabricados en taller. En buena medida, la construcción metálica es prefabricada o semiprefabricada.



El hierro forjable

Mediante el pudelado o la pudelación, operación consistente en eliminar el carbono y el azufre mediante el batido del hierro fundido en un horno de reverbero, se obtiene hierro forjable o hierro dulce, comúnmente conocido como *hierro*.

Evidentemente, el hierro tenía un coste más elevado que la fundición; por dicha razón, su utilización se restringía, en construcción, a usos muy específicos.

Durante la operación de batido, se añadían a la fundición, para facilitar la operación de refinado, escorias o chatarra con un alto contenido de óxido de hierro.

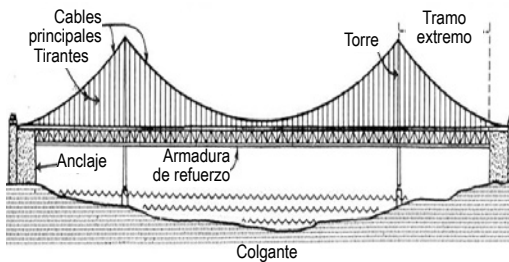
El hierro así obtenido, por su ductilidad, puede laminarse y soldarse. Reduciendo aún más el contenido de carbono, se mejoran las propiedades mecánicas del hierro y se convierte en acero. A su vez, el acero puede mejorar algunas de sus propiedades aleado con otros metales, como por ejemplo el cromo, para obtener acero inoxidable.

Con el advenimiento del hierro forjable, se produjeron dos aportaciones significativas a la historia de la construcción: los puentes colgantes y el desarrollo técnico-científico de los perfiles laminados.

3.4.2. Puentes colgantes. Introducción

Los puentes colgantes suponen, por sus prestaciones extraordinarias, un avance técnico significativo en la historia de la construcción con respecto a los tradicionales, realizados con fábricas. Hacen realidad una nueva faceta del “menos es más” enunciado por Mies van der Rohe.

Consisten en disponer unas catenarias entre dos torres, con capacidad para trabajar fundamentalmente a compresión. Las catenarias, tal como se muestra en el gráfico inferior, han de prolongarse y anclarse más allá de las torres, con un ángulo similar al del vano central para que las cargas resultantes actúen lo más centradas posible sobre las torres. De las catenarias cuelgan tirantes que soportan la estructura del tablero. Como puede apreciarse, todos los elementos estructurales del sistema, excepto las torres, trabajan a tracción, por lo que no se producen efectos de pandeo y, por tanto, el aprovechamiento de las posibilidades del material son máximas.



Las tracciones de los cables acaban siendo absorbidas por el rozamiento lateral de grandes masas de hormigón con el suelo.

Este hecho cambió totalmente el concepto histórico del trabajo mecánico de las cimentaciones como elementos compresores del suelo y lo amplió con el de la absorción de tracciones por rozamiento. Ello abrió el camino a la creación de recursos constructivos, tan comunes en la actualidad, como los anclajes inyectados al terreno.

Cronológicamente, se distinguen dos tipos de puentes colgantes: los sustentados por cadenas y los de cable. Los primeros corresponden a la construcción con hierro, mientras que los de cable responden a la tecnología del acero.

La construcción de puentes de cadenas ocupa el período comprendido entre 1815 y 1895. Los inicios de los puentes colgantes de cables se remontan hacia 1830, sobre la base de los trabajos desarrollados por Marc Seguin (1786-1875), Louis Vicat (1786-1861) y Charles Ellet (1810-1862). El modelo es tan eficiente que sigue plenamente vigente en la actualidad, cuando se trata de plantear luces a partir de 600 m.



A modo de conclusión, cabe indicar que disponer de hierro y, posteriormente, de acero en cantidades aplicables a la construcción fue un avance tecnológico de gran trascendencia. Igualmente significativo fue “entender” el material y las ventajas derivadas de su capacidad de trabajo a tracción, así como la aplicación de estos conocimientos, en primer lugar, al diseño de puentes, para extenderlo posteriormente a otros modelos edificatorios.

3.4.3. Puentes colgantes de cadenas

El elemento principal de un puente colgante es la catenaria sustentante y su capacidad para ofrecer altas prestaciones a tracción. Los primeros constructores de puentes tuvieron que utilizar el ingenio (un valor constante en construcción) para conseguir algo parecido a un cable, cuando estos simplemente no existían en el mercado.

Para ello, crearon grandes cadenas asociando pletinas o piezas de forja mediante bulones. Al fragmentar la luz total en pequeños tramos y disponer en cada uno de ellos las correspondientes rótulas, se obtenía una aproximación bastante fiel al perfil de una catenaria. A las rótulas se fijaban los tirantes, realizados con perfiles macizos de secciones diversas: redondos, cuadrados o perfiles en T. A este modelo responden los tres puentes a que se hace referencia en los apartados siguientes, por su significación en la historia de la construcción:

- Sobre los estrechos de Menai, en Gales
- Sobre el Danubio, en Budapest
- Sobre el Támesis, en la Torre de Londres

El puente sobre los estrechos de Menai, en Gales

Con cadenas, Thomas Telford (1757-1834) construyó, entre 1820 y 1826, un puente colgante en los estrechos de Menai, en Gales, cuyo tramo principal, de 175 m de longitud, se apoyaba en torres de fábrica de ladrillo que absorbían los esfuerzos de compresión generados por las cadenas (v. foto inferior). Obsérvese el planteamiento mixto con el vano central sustentado por cadenas y los viaducos de acceso de obra de fábrica.



Los datos anteriores permiten demostrar que solo cuarenta años después del primer puente de hierro, modificando el concepto estructural, se triplicó la luz y se amplió la capacidad portante, lo cual permitió el paso de ferrocarriles sobre su tablero.



El puente sobre el Danubio, en Budapest

Sin duda, el puente de cadenas más famoso es el construido sobre el Danubio, en Budapest, por el ingeniero civil escocés Adam Clark (1811-1866) entre 1839 y 1849. El vano central salva una luz de 202 m. Todavía está en servicio, aunque tuvo que ser reconstruido en 1949, después de que los alemanes lo volaran en 1945, en los días finales de la Segunda Guerra Mundial.

Las cuatro fotos siguientes permiten apreciar los detalles de su construcción. Las torres de soporte son de obra de fábrica, puesto que el hormigón armado en la época de su construcción no pasaba de ser una curiosidad tecnológica.

La rigidez del tablero se consigue mediante una doble viga en celosía roblonada, construida a modo de viga cajón, que es atravesada por las cadenas (v. fotografía inferior izquierda).

Además de la calzada para vehículos, dispone, a ambos lados, de pasos peatonales independientes (v. fotografía superior derecha). Las cadenas no son macizas, sino que están confeccionadas mediante pletinas superpuestas, atravesadas por bulones. Para cada lado, se disponen dos cadenas superpuestas con los tirantes alternados (v. fotografías inferiores). La fotografía inferior derecha permite apreciar el detalle de los tirantes confeccionados con perfiles T.





El puente sobre el Támesis, en la Torre de Londres

No menos famoso es el puente de cadenas del Tower Bridge de Londres, casi cincuenta años posterior al de Budapest. Sus aspectos más significativos están recogidos en las cuatro fotografías siguientes.

En 1884, fue aprobado el proyecto que había presentado a concurso Sir [Horace Jones](#) (1819-1887), a la sazón arquitecto de la ciudad. La construcción se desarrolló entre 1886 y 1894. Fallecido Jones, prosiguió la misma el ingeniero Sir John Wolfe-Barry (1836-1918).

El puente de la Torre de Londres tiene 244 m de longitud, con dos torres de 65 m de altura. La distancia central de 61 m entre las dos torres se divide en dos levas, que pueden elevarse hasta un ángulo de 83 grados para permitir pasar el tráfico fluvial.

La foto derecha de la página siguiente, tomada en 1892, permite apreciar la estructura metálica de las torres de soporte, posteriormente recubiertas con obra de fábrica, una de las cadenas y la viga en celosía situada por encima de las levas. Dicha viga se encarga de dar continuidad a las cadenas y, con ello, centrar las cargas sobre las torres.

Pese a los antecedentes del Crystal Palace (1851) y la Torre Eiffel (1889), entre otros, el conservadurismo británico consideraba inapropiada la presencia de una estructura totalmente metálica para atravesar el Támesis por la zona central de Londres.

Destacan su masividad y su robustez, no en vano el puente está preparado para soportar una carga total de 2.000 t. Obsérvese, en la foto izquierda de la página siguiente, el detalle de una de las rótulas de las cadenas en su encuentro con la viga de soporte del tablero. En la foto inferior derecha, puede apreciarse la gran sección de los tirantes y su unión con una de las vigas de soporte del tablero. En la misma, se observan los ajustes roscados de los dos primeros tirantes y que solo los dos últimos son iguales entre sí.





3.4.4. Puentes colgantes con cables

El desarrollo de cables de hierro y, posteriormente, de acero propició la construcción de grandes puentes colgantes, algunos de ellos de doble tablero. En este caso, por el tablero inferior circulan los ferrocarriles, por su mayor peso y concentración de cargas, mientras que el superior se destina a los automóviles.

A continuación, se detallan algunos de los hitos de la construcción de puentes colgantes mediante cables.

- El Wheeling Suspension Bridge, Virginia Occidental
- El George Washington Bridge, Nueva York.
- El Gran Puente de Akashi, Japón

El Wheeling Suspension Bridge, Virginia Occidental

El ingeniero Charles Ellet (1810-1862) construyó sobre el río Ohio, en Wheeling, entre 1846 y 1849, el primer puente colgante sustentado con cables, con una luz superior a los 300 m, concretamente de 308 m de luz entre apoyos.

Puesto que su fecha de construcción es anterior al automóvil, se diseñó con las cargas propias del paso de carruajes. Por ello, en la actualidad tiene limitado el peso de los vehículos que lo atraviesan a 1.800 kg y estos han de mantener una distancia mínima entre ellos de 15 m. Por las razones indicadas, no puede ser utilizado por vehículos pesados.

Pese a las limitaciones de la época, el puente dispone ya de todos los elementos que, con el desarrollo de las prestaciones técnicas de los materiales, serán aplicados durante décadas a realizaciones posteriores de mayor luz. Únicamente cambiarán los soportes de fábrica por los de acero u hormigón armado.



Cabe destacar la presencia de cables radiales cruzados y enlazados con los tirantes de soporte para estabilizar el puente frente al viento. La fotografía de la izquierda permite apreciar una imagen de conjunto de dichos cables. La de la derecha, el detalle de las uniones entre cables.



El George Washington Bridge, Nueva York

Otro gran hito en la consecución de grandes luces empleando cables de acero aconteció en octubre de 1931. El George Washington Bridge de Nueva York, construido por el ingeniero Othmar Ammann (1879-1965) y el arquitecto Cass Gilbert (1859-1934), de 1.069 m de longitud, superó la cifra mágica de un kilómetro de luz. Se trata de un puente de doble tablero con las torres de soporte de estructura metálica, como puede apreciarse en las dos fotografías siguientes.



El Gran Puente de Akashi, Japón

Por último, se hace una breve referencia al récord de luz de un puente colgante hasta la fecha. Desde 1998, el Gran Puente de Akashi, que atraviesa el estrecho homónimo en Japón, con una luz máxima entre apoyos de 1.991 m, ostenta el récord de mayor luz. Inicialmente, la luz era "solamente" de 1.990 m, pero un sismo acaecido el 17 de enero de 1995 separó las torres de apoyo un metro más.



Cada una de las torres se eleva a 298 m de altura sobre el nivel de mar. El diámetro de los cables principales de apoyo es de 1.122 mm. En su interior, se encuentran 36.830 alambres de acero, de 5,23 mm de diámetro.

El Gran Puente de Akashi está diseñado para soportar vientos de hasta 286 km/h y sismos de hasta 8,5 grados en la escala de Richter. Dispone de sistemas pendulares de amortiguación para evitar su entrada en resonancia.



A lo largo del día, como consecuencia de los cambios térmicos, el puente se dilata y se contrae unos 2 m. En su construcción, se emplearon 300.000 km de cables de acero.

Los puentes colgantes y, en general, los sistemas tensados, al no estar sujetas las secciones estructurales a pandeo ni a flexión, permiten obtener el aprovechamiento máximo de su capacidad resistente. Por ello, los puentes colgantes duplican la mayor luz alcanzada mediante otros tipos estructurales.

En el caso del acero de alta resistencia, su límite elástico se sitúa en los 2.000 N/mm², es decir, cuatro veces la resistencia del acero corrugado empleado en las armaduras para hormigón armado.

La mejora progresiva del acero, propiciada por la industria metalúrgica a lo largo del siglo xx, permite, en las construcciones modernas, disponer de un amplio catálogo de perfiles abiertos y cerrados, así como la posibilidad de sustentar grandes cargas con secciones y pesos estructurales relativamente reducidos.

La demanda creciente de grandes luces para cubrir auditorios de gran formato, pabellones deportivos e, incluso, estadios de atletismo y campos de fútbol, encuentra interesantes respuestas constructivas en las estructuras realizadas a partir de cables estructurales.

El desarrollo técnico-científico de los perfiles laminados

Hasta la segunda década del siglo xix, el hierro, pese a su amplia difusión, era aún un material escasamente empleado en construcción. Los primeros perfiles



laminados, en el siglo XVIII, fueron pensados como raíles para las vagonetas para extraer carbón de las minas, no para ser aplicados en construcción.

El diseño de las estructuras metálicas y los perfiles empleados en las mismas se basaba, fundamentalmente, en el empirismo. Era preciso disponer de bases científicas para obtener el máximo rendimiento de las potencialidades del material.

Desde finales de siglo XVIII, Emiland Gauthey (1732-1806) y Claude-Louis Navier (1785-1836) desarrollaron, en Francia, la sistematización, mediante algoritmos matemáticos, de conceptos como el pandeo, los momentos de inercia de las secciones, el reparto de tensiones o la rigidez, todos ellos parámetros definidores del comportamiento de los materiales estructurales aplicables a la construcción. A dicha tarea, se sumaron los brillantes matemáticos (Cauchy, Lagrange y Monge, entre otros) de la École Polytechnique de París, fundada en 1794.

En 1826, el ingeniero Eaton Hodgkinson (1789-1861) y el constructor Sir William Fairbairn (1789-1874) iniciaron en Manchester, en paralelo a los trabajos teóricos desarrollados en Francia, una investigación experimental sistemática sobre el comportamiento mecánico de las vigas de hierro.

Es muy posible que el primer resultado práctico de dichas investigaciones fuera el desarrollo de las vigas de hierro forjado de sección "doble T" obtenidas mediante laminación.

La laminación es un procedimiento metalúrgico de conformación para obtener productos metálicos alargados, de sección y perfil constantes. Consiste en someter el metal a una temperatura elevada entre rodillos rotatorios que lo presionan y lo empujan hacia adelante. Con ello, se obtiene el equivalente de un tratamiento de forja, pero de forma continua, no mediante martillado.

El primero en patentar dicho proceso fue el siderúrgico Henry Cort (1740-1800) en 1783, al cual añadió, un año más tarde, su horno de pudelado para obtener un hierro de más calidad que permitía fabricar formas estandarizadas en caliente, especialmente raíles para equipar los sistemas de extracción de las minas.

Inicialmente, mediante laminación se obtenían pletinas y planchas, pero Thomas Tredgold (1788-1829), en 1824, apreció la necesidad de dotarlas de alas para mejorar el trabajo a flexión y mejorar su rigidez.

De todos modos, sin los estudios científicos y matemáticos a que se ha hecho referencia, no habría sido posible desarrollar de forma eficiente las estructuras metálicas.

En 1841, el ingeniero Robert Stephenson (1803-1859) dio el espaldarazo definitivo a la sección "doble T" de hierro forjado en la construcción de puentes de ferrocarril. No fue hasta 1847 que Charles Ferdinand Zores empezó a laminar vigas con un canto superior a los 15 cm. A partir de esta fecha, el perfil "doble T" de hierro



forjado se impuso a otros tipos de perfiles para dar respuesta a las solicitaciones estructurales a flexión propias de los forjados de los edificios.

En la difusión de la estructura metálica en Cataluña, fue determinante el papel del arquitecto Joan Torres i Guardiola (1827-1910). Como profesor de la Escuela Provincial de Arquitectura de Barcelona, impartió, durante más de treinta años, cálculo de resistencia de materiales y estructuras metálicas, y fue maestro de arquitectos tan notables como Antoni Gaudí i Cornet (1852-1926) y August Font i Carreras (1846-1924). Además, fundó una empresa dedicada a grandes construcciones metálicas: la Casa Torras, Herrería y Construcciones.

A partir de 1850, la viga de hierro laminado fue sustituyendo progresivamente a la de madera en la construcción de forjados de edificación y las versiones de hierro colado en las estructuras metálicas. El paso siguiente sería la sustitución del hierro por el acero, por sus mejores prestaciones mecánicas. Sin embargo, dicho cambio no pudo ser inmediato, toda vez que el acero, producido en cantidades industriales, era desconocido por aquellas fechas.

El convertidor inventado por Sir Henry Bessemer (1813-1898) no se patentó hasta 1855. El acero producido inicialmente por estos convertidores era caro con respecto al hierro y presentaba diferencias excesivas de calidad en función de las coladas.

El desarrollo entre 1860 y 1865 de hornos de reverbero por Siemens-Martin permitió resolver los problemas iniciales del convertidor Bessemer y producir aceros de calidad constante. La gran demanda de acero para otros usos demoró su aplicación como material estructural en la construcción hasta finales del siglo XIX.

3.4.5. El Crystal Palace de Londres

En 1850, se decidió organizar en Londres, en los terrenos del Hyde Park, la primera Exposición Universal, y para ello se construyó el edificio de mayores dimensiones realizado hasta la fecha.

Hasta doscientas cuarenta y cinco propuestas se presentaron al concurso de ideas para construir el edificio principal. Todas fueron rechazadas porque se consideraron inviables, ya que en su diseño intervenían grandes elementos prefabricados no reutilizables; no obstante, las propuestas del arquitecto francés Hécctor Horeau (1801-1872) y del irlandés Richard Turner (1798-1881) recibieron una mención especial.

Ambos, al igual que Joseph Paxton (1803-1865), que fue quien al final realizó el proyecto y dirigió la ejecución de la obra, ya tenían experiencia en la construcción de invernaderos. Lógicamente, los dos proponían la construcción de sendos pabellones de hierro y vidrio.



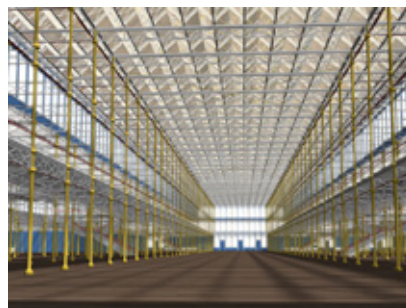
Como el resultado del concurso no fue el esperado, los organizadores, a nueve meses del inicio de la Exposición, decidieron elaborar un proyecto base a partir del cual las distintas empresas pudieran presentar sus ofertas y ofrecer modificaciones.

El proyecto realizado por los organizadores, entre romano y bizantino, recibió duras críticas por su complejidad técnica y por la imposibilidad de llevar a cabo su construcción en el plazo previsto. Entre los aspectos más complejos de su ejecución, había una cúpula de 61 m de diámetro que tenía que realizarse mediante cerchas de hierro.

La fecha de inicio de las obras era muy próxima y resultaba evidente que, en el escaso tiempo restante, no sería posible aparejar las piedras y los ladrillos necesarios para semejante construcción.

En este estado de cosas, intervino Joseph Paxton y aplicó al proyecto su experiencia como jardinero y constructor de invernaderos de hierro y vidrio, que había adquirido al servicio del duque de Devonshire en Chastworth. Cabe destacar que el mayor invernadero que había construido Paxton hasta el momento, medía solamente 84 m de largo, 38 m de ancho y 20 m de altura.

La fotografía inferior izquierda corresponde a un dibujo de la época. Permite apreciar la imagen de conjunto del edificio. La fotografía de la derecha es una recreación virtual del interior del edificio.



Trabajando febrilmente a lo largo de siete días, logró realizar el gigantesco edificio utilizando como ingredientes la prefabricación y la racionalidad.

Su éxito fue tal que introdujo cambios sustanciales en la concepción de los espacios arquitectónicos, resueltos mediante grandes luces, y sirvió de referente para los pabellones de las demás exposiciones universales, estaciones de ferrocarril, mercados de abastos y grandes centros fabriles. En definitiva, señaló el camino hacia una nueva forma de proyectar y de construir.

El Crystal Palace de Londres constituye, pues, un hito en la historia de la construcción por las razones siguientes:



- Su temprana fecha de construcción: 1851
- Su economía
- La modularidad de su diseño
- La aplicación de soluciones constructivas avanzadas
- Sus extraordinarias dimensiones
- El tiempo empleado en su construcción
- La policromía
- La posibilidad de ser desmontado y vuelto a montar en otro emplazamiento
- Sus déficits

A continuación, se analizan detalladamente los aspectos enunciados:

La fecha de construcción

En 1851, ya se había experimentado la utilización del hierro colado o de fundición como material estructural de construcción. A título de ejemplo, el primer puente de fundición fue construido en Broseley, entre 1776 y 1779, por John Wilkinson (1728-1808) y Abraham Darby III (1750-1791), al cual ya se ha hecho referencia

En la época de construcción del Crystal Palace, el hierro era tan caro que entre 1850 y 1880 solo se utilizó para la construcción de obras singulares, puentes, estaciones de ferrocarril y salas de exposiciones.

Mediante la fundición y el vidrio no se había construido, hasta la fecha, ningún edificio de la envergadura del Crystal Palace. La asociación del hierro y el vidrio se dio, por primera vez, en los pasajes cubiertos para peatones, que eran utilizados como centros comerciales; baste citar como antecedentes, a título ilustrativo, el Panoramas de Paris (1800), la Burlington Arcade de Londres (1819), la Galérie de Orleáns (1829-1831) o el Passage Pommeraye de Nantes (1843).

El precedente más parecido al Crystal Palace son los invernaderos del Jardín Botánico de París, erigidos en 1833 por Charles Rohault de Fleury (1801-1875).

La economía

La propuesta de Paxton, por la nitidez de su concepción, basada en la modularidad, la simplicidad de sus formas y la facilidad de su montaje, fue la más económica de las presentadas. Costó, en su momento, 150.000 libras, equivalentes a 13,1 millones de libras de 2010. El traslado y la ampliación en su nueva ubicación en Sydenham ascendieron a 1,3 millones de libras de la época, equivalentes a 96,5 millones de libras actuales.

Ello supuso, en su primera implantación, un coste de 185,46 euros por metro cuadrado construido, a valor actual.

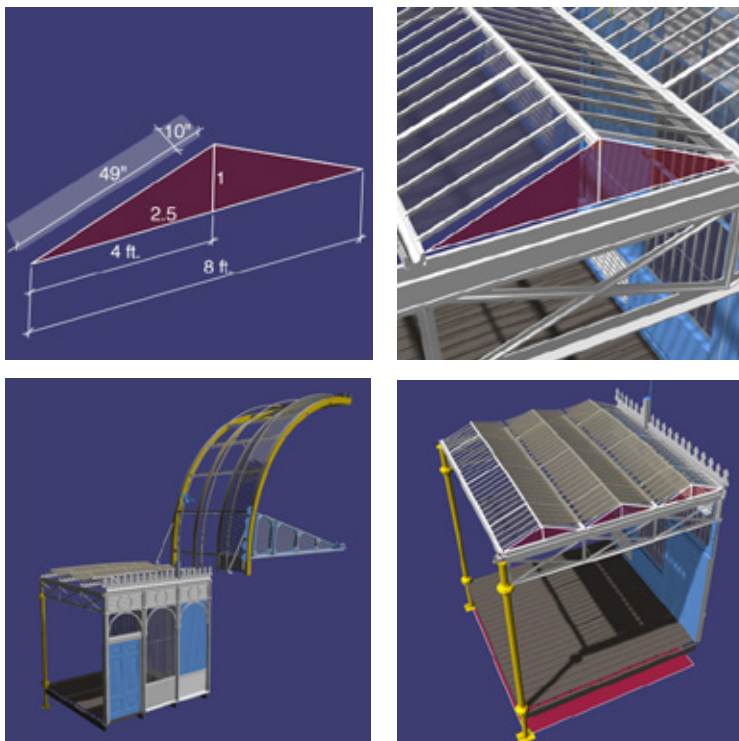


La modularidad

El Crystal Palace estaba concebido como un inmenso contenedor, generado mediante dos elementos base: pilares y viguetas.

Concretamente, se emplearon 3.300 pilares de fundición y 2.224 viguetas, todos de 24 pies de longitud (7,31 m), lo que suponía generar un cubo base. También respondían a dicha modularidad los 300.000 cristales que constituían el cerramiento y los 205.000 marcos de madera necesarios para soportarlos.

El módulo de 24 pies se descomponía, en la cubierta, en tres submódulos de 8 pies, sobre los cuales se formaban dos triángulos (uno por pendiente, de 4 pies de base por 1 de altura) de proporción 2,5:1. Los cristales de la cubierta median 49 × 10 pulgadas (v. cuatro gráficos inferiores).



Las soluciones constructivas avanzadas

En el Crystal Palace, se empleaban soluciones técnicas avanzadas. Así, la recogida de aguas de la cubierta se efectuaba directamente, sin canales interpuestas, a través de la propia estructura. Las vigas correspondientes a las limahoyas de los dientes de sierra disponían de canales incorporadas en su diseño.



Las aguas recogidas por las canales eran conducidas a las columnas de fundición. Se aprovechaba su sección hueca para evacuarlas a la red de saneamiento, integrada en las riostras de la cimentación.

Los problemas derivados de la condensación de vapor de agua en los cristales se resolvieron descomponiendo las cubiertas en superficies inclinadas. El travesaño inferior de cada bastidor de madera disponía de un canalillo que conducía el agua hasta los bajantes.

Concebido como arquitectura efímera, las láminas de madera del pavimento estaban levantadas 1,20 m sobre el suelo y ligeramente separadas para facilitar la ventilación y la limpieza. El polvo provocado por su uso diario durante la exposición era barrido y se depositaba en el terreno.

Las dimensiones

Las dimensiones del Crystal Palace son el resultado de su concepción modular, repetida 230 veces a lo largo de sus 563 m de longitud. Su anchura era de 140 m y la altura máxima, de 41 m.

El edificio disponía de 78.820 m² construidos y un volumen de 849.500 m³.

Para hacerse una idea aproximada de estas dimensiones, baste con decir que la mayor catedral de Francia, la de Amiens, ocupa una superficie cubierta de 7.700 m² y un volumen de unos 200.000 m³; así pues, la superficie del Crystal Palace era diez veces superior y su volumen interior superaba en más de cuatro veces el de la catedral de Amiens.

Estas dimensiones fueron simplemente el resultado de las necesidades de espacio de los organizadores de la Exposición. Para cubrir su superficie, se emplearon más de 80.000 m² de planchas de vidrio. Con todo, la luz salvada en la nave principal era relativamente modesta, de 21,50 m.

El tiempo empleado en su construcción

Si el Crystal Palace fue proyectado en solo siete días, no menos expeditiva fue su construcción, que se llevó a cabo en seis meses.

Retomando la comparación con la catedral de Amiens, esta se construyó durante casi dos siglos, de modo que el ritmo de construcción del Crystal Palace fue cuatrocientas veces mayor. Este ritmo aun sería superior considerando las relaciones expuestas en el apartado anterior sobre la superficie cubierta y el volumen total.

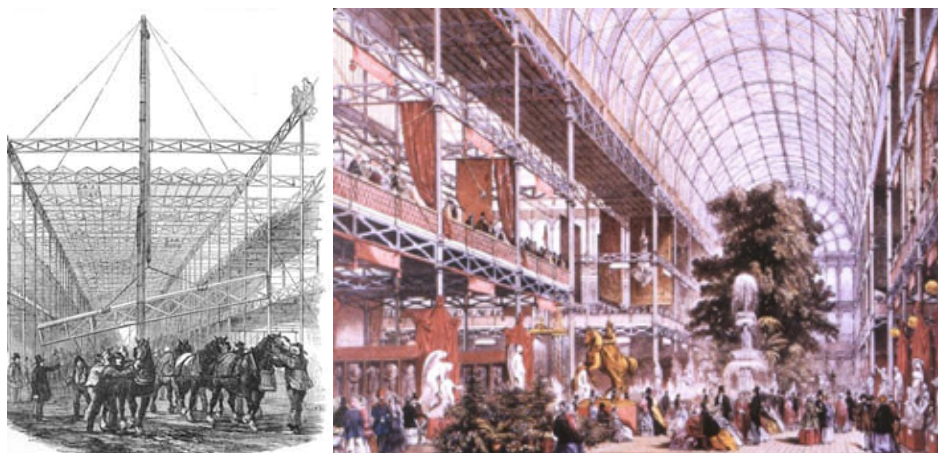
Ello puso en evidencia las limitaciones de los medios técnicos de la arquitectura y de la construcción “tradicionales” frente a las posibilidades conceptuales y técnicas de los nuevos materiales.



Obsérvese que la “modernidad” de Paxton es solo parcial. Se fundamenta exclusivamente en la sustitución de los materiales “tradicionales”, como la piedra y el ladrillo, por otros “nuevos”, como el hierro y el cristal, cuyas prestaciones extraordinarias para el fin propuesto le permiten alcanzar el éxito.

Desde el punto de vista conceptual, el cambio no existe; se trata, simplemente, de continuidad. Para lograr sus propósitos, Paxton sigue utilizando los recursos universales de la construcción, como la modularidad, o los ejes de simetría, inherentes a la construcción empírica. No puede ser de otro modo si, como en su caso, ha de conjugar la economía con la eficiencia.

La fotografía inferior izquierda muestra los procedimientos rudimentarios de elevación de las vigas de fundición, no muy diferentes de los empleados desde época romana. La fotografía inferior derecha constituye una recreación de su interior.



La policromía

Crystal Palace, al contrario de la imagen monocroma propia de los invernaderos, era policromo. Los pilares y la estructura de la cubierta semicircular estaban pintados de amarillo; la cara inferior de las vigas, de rojo, y de azul los escasos paramentos opacos y los soportes del gran arco de la fachada principal.

La policromía es un valor añadido sobre el diseño. El hecho de ser aplicada por Paxton indica su compromiso y su voluntad de singularizar y hacer más agradable el marco de la Exposición.

El montaje y el desmontaje

Por su concepción modular y su sistema de ensamblaje, el Crystal Palace pudo ser desmontado, ampliado por el propio Paxton y vuelto a montar en 1854, en Sydenham, donde permaneció hasta que en 1936 un incendio lo destruyó.



Las características descritas de modularidad y ensamblaje son plenamente actuales, lo que acentúa la modernidad conceptual del edificio. Forman parte de los criterios de sostenibilidad que rigen la redacción de los planes maestros para los edificios de nueva planta.

Las estructuras metálicas cuentan, entre sus ventajas, que tienen un valor residual superior a las de hormigón. Ello es debido a la mayor facilidad de reciclaje, e incluso de aprovechamiento directo, de determinados elementos en otros edificios.

Los déficits

El Crystal Palace distaba de ser un edificio de altas prestaciones que proporcionara confort. Por su concepción y por los materiales empleados, simplemente protegía frente a la lluvia y el viento. Su capacidad de aislamiento térmico y su inercia térmica eran prácticamente nulas.

No disponía de sistemas de control de la luz solar, pero sí, en cambio, de aberturas y un sistema de lamas para facilitar la ventilación, con objeto de mitigar el efecto invernadero, en las épocas más calurosas y soleadas.

Uno de sus puntos más débiles se puso de manifiesto el 30 de noviembre de 1936, cuando su estructura de hierro colado, sin protección alguna frente al fuego, fue rápidamente pasto de las llamas al arder los materiales inflamables contenidos en su interior.

Con anterioridad, ya se había evidenciado que se trataba de un edificio delicado y caro de mantener, y precisamente por falta de un mantenimiento adecuado se deterioró más de lo esperado. Ello ocasionó que se vendiera y tuviera diversos usos, entre ellos como centro de entrenamiento durante la Primera Guerra Mundial y sede del Imperial War Museum, antes de su trágico final. Con todo, prestó servicio a lo largo de 84 años y soportó un traslado.

Si el incendio no se hubiera producido, posiblemente en la actualidad el Crystal Palace seguiría siendo el testimonio de una forma de proyectar y de construir edificios que marcó un antes y un después en la historia de la construcción.





3.4.6. Techar más de cien metros sin apoyos intermedios. La Galérie des Machines, 1889

La experiencia adquirida en la construcción de grandes palacios de hierro y cristal en las diversas exposiciones universales culminó en la Exposición de París de 1889. La fecha tenía un significado especial. Se cumplían cien años de la toma de la Bastilla, símbolo del inicio de la Revolución Francesa.

Fue, sin duda, la muestra de mayor significación de las realizadas a lo largo del siglo XIX. Avala esta afirmación el hecho de contar con el palacio en forma de U proyectado por el arquitecto Jean-Camille Formigé (1845-1926), la Torre Eiffel y la Galérie des Machines. El conjunto de las tres construcciones representa la obra en hierro de más envergadura realizada hasta entonces.

Además de la Torre Eiffel, cabe destacar la proeza técnica que suponía, para la época, superar los 100 m de luz libre en un espacio cubierto. Las dimensiones de la Galérie des Machines eran de 115 m de anchura por 420 m de longitud y 43 m de altura libre, en el punto más alto de los arcos, es decir, cuatro hectáreas y media cubiertas, sin apoyos intermedios.

Fue proyectada por el arquitecto Charles-Louis-Ferdinand Dutert (1845-1906), auxiliado por el ingeniero Victor Contamin (1840-1893). Las cuatro fotografías siguientes permiten hacerse una idea del carácter formal y constructivo de la obra. La fotografía superior izquierda corresponde a la fachada principal. La superior derecha ofrece una visión de conjunto de la nave central durante la Exposición.

La fotografía inferior izquierda muestra el espacio interior de la Galérie completamente vacío. En ella es posible apreciar la escala humana. Igualmente, puede observarse el esquema estructural jerarquizado, que va reduciendo progresivamente las luces y las secciones hasta encajar con los cristales o las placas de la cubierta. La estructura primaria corresponde a los arcos; la secundaria, a las correas que enlazan los arcos, y cruzando las correas a tercios de la luz se asienta la estructura terciaria. Por último, la luz de la estructura terciaria es dividida en cinco tramos, que generan la estructura cuaternaria sobre la cual descansan directamente los cristales y las placas de la cubierta.

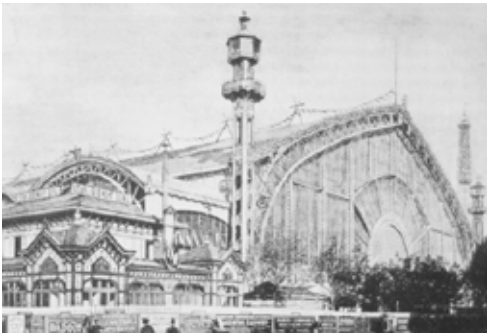
La fotografía inferior derecha muestra el detalle de una de las rótulas de los arcos triarticulados de la nave con la servidumbre de concentrar la totalidad de la carga sobre un bulón.

Como aspectos más significativos de la construcción, destacan los siguientes:

- Los antecedentes
- La estructura
- La iluminación natural
- El tiempo y el coste



A continuación, se comenta en detalle cada uno de ellos.



Los antecedentes

En el éxito de la construcción de la Galerie des Machines, fue determinante la experiencia previa en la construcción de grandes arcos de hierro para resolver los puentes para el ferrocarril.

Tal es el caso del puente de Maria Pia de la ciudad de Oporto, de 160 m de luz, proyectado por el ingeniero Théophile Seyrig (1843-1923), construido entre enero de 1876 y noviembre de 1877 por la empresa de Gustave Eiffel (1832-1923) (v. fotografía inferior izquierda), o el viaducto de Garabit, de 165 m entre apoyos, con el tablero colocado a 122,50 m por encima del río Thuyère, construido entre 1880 y 1884 por el propio Eiffel (v. fotografía inferior derecha).





La estructura

La estructura de la Galérie des Machines estaba formada por 20 arcos triarticulados de hierro y 19 tramos. Las rótulas de apoyo se asentaban sobre 40 pilastras de fábrica de ladrillo tomado con mortero de cemento de Pórtland. Cada una de ellas recibía una carga vertical de 412 t y un empuje de 112 t, esfuerzos notables para la época, en especial los empujes. En los edificios actuales de cierta envergadura, estos valores por apoyo no pasan de ser medianos.

La construcción de arcos triarticulados facilita el cálculo, puesto que en la articulación de la clave el esfuerzo es necesariamente horizontal, por razón de simetría. En las rótulas de la base, la resultante puede descomponerse en una reacción vertical y un empuje.

Los pórticos triarticulados utilizados en obras de gran envergadura, como la Galérie, al ser mecanismos, ayudan a resolver los problemas derivados de las dilataciones y contracciones del metal en función de los cambios térmicos.

Este tipo de estructura no era la que se empleaba en los puentes de ferrocarril de la época, por su menor rigidez. En los puentes, como puede observarse en las fotografías anteriores, se empleaban los arcos articulados exclusivamente en los apoyos, es decir, arcos biarticulados.

Las rótulas, al concentrar la carga en una sección reducida, conferían a los arcos una sensación de ligereza que dividió la opinión de los críticos. Mientras que para unos suponía un signo de los nuevos tiempos, para otros los esbeltos apoyos de los arcos representaban una pérdida de valores formales.

Se precisaron 7.400 t de hierro en su construcción, lo cual supone una ratio de 153,21 kg/m². Si se comparan estas cifras con las realizaciones actuales, en que se utilizan mallas espaciales como sistema estructural, para luces próximas a los 100 m la ratio es de unos 35,00 kg/m². Ello supone una reducción de peso por metro cuadrado de más de cuatro veces.

Juegan a favor de la reducción aspectos como el concepto geométrico de triangulación espacial, el sistema de uniones, la utilización de perfiles tubulares y las mejores prestaciones que ofrece el acero con respecto al hierro.

Si bien inicialmente el edificio fue proyectado en acero, en el último minuto se optó por el hierro, debido al elevado coste del acero en la época. Este cambio repentino causó no pocos errores en los historiadores, que señalaron que la construcción había sido realizada en acero.

La iluminación natural

En la zona de los arranques, la cubierta era opaca hasta un tercio de la anchura. Los dos tercios centrales eran acristalados y cubrían una superficie de 34.700



m². Con los materiales disponibles en la época, y dadas sus dimensiones, puede concluirse que las prestaciones de confort que ofrecía la Galérie des Machines no eran superiores a las que habría ofrecido la suma de un paravientos y un paraguas.

El tiempo y el coste

La construcción se realizó, al igual que el Crystal Palace, en seis meses. El coste de construcción por metro cuadrado fue cinco veces inferior al de un edificio convencional de la época realizado en piedra. Estos datos sirvieron para consolidar, para determinados usos, la arquitectura del hierro y del cristal.

También se pudieron apreciar las limitaciones del modelo constructivo, no solo en los aspectos de confort ya reseñados, sino también en los costes de mantenimiento y su fragilidad frente al fuego.

Alcanzada la cota de los 100 m de luz, las construcciones posteriores similares se orientaron hacia dimensiones menos exigentes y a mejorar la durabilidad y el confort.

El paso del tiempo ha reducido a un mero recuerdo el modelo de pórticos triarticulados para resolver luces superiores a 100 m. Han tomado su testigo no uno, sino varios modelos estructurales: las mallas espaciales, las estructuras tensadas y la madera laminada encolada.

En la actualidad, cubrir espacios de más de 100 m sin apoyos intermedios ha dejado de constituir un reto tecnológico para convertirse en una rutina impuesta para dar respuesta a múltiples necesidades.

3.4.7. Una solución de corto recorrido

Dos ménsulas soportando el tramo central. El Forth Rail Bridge en Escocia

El Forth Rail Bridge, también llamado Firth of Forth, construido entre 1883 y 1890, fue el primer puente de acero de la Gran Bretaña. Fue diseñado por los ingenieros Sir John Fowler (1817-1898) y Benjamin Baker (1840-1907). La construcción fue adjudicada a la compañía dirigida por el también ingeniero William Arrol (1839-1913).

El Forth Rail Bridge, pese a la poca fortuna de su modelo estructural, constituye un hito significativo en la resolución de los retos constructivos planteados por las grandes luces.

A continuación, se analizan las razones de su construcción, su coste elevado y el consumo excesivo de acero, comparados con otros modelos estructurales que pronto estuvieron disponibles, con el siguiente esquema de exposición:



- La longitud y la configuración
- La elección del sistema constructivo
- Las cifras
- La seguridad en la construcción
- El mantenimiento

La longitud y la configuración

El puente enlaza las dos orillas del estuario del río Forth, de una longitud aproximada de 2,50 km. Dispone de doble vía, situada a 46 m de altura sobre la marea alta, para facilitar la navegación entre sus vanos.

Cada uno de los dos vanos principales, apoyados sobre tres torres, salva una luz de 521,30 m y los dos laterales, de 207,30 m. Las vigas centrales, de 106,70 m de longitud cada una, se visualizan proporcionalmente muy pequeñas en relación con el tamaño de las ménsulas. Estas recuerdan el esqueleto de un dinosaurio (v. fotografía inferior).



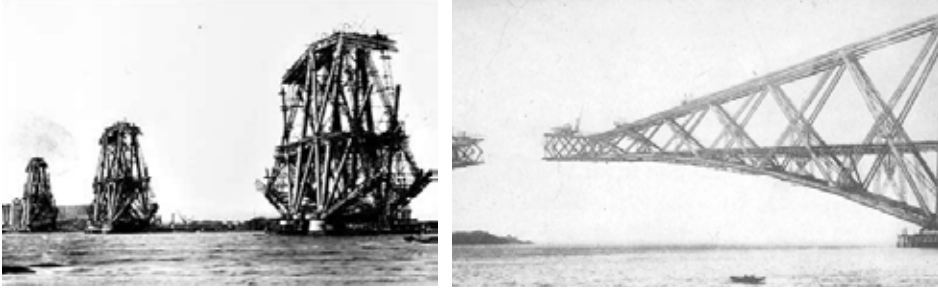
Los 1.143 m restantes corresponden a los viaductos de acceso, resueltos mediante quince tramos, apoyados sobre pilares de granito.

La elección del sistema constructivo

Cabe plantearse las razones por las cuales se utilizó un sistema constructivo tan complejo y costoso, y no la solución más simple de un tablero colgante de cables de acero, que posteriormente sería ampliamente utilizada.

Dos razones fueron determinantes en la elección del sistema constructivo: las incertidumbres que todavía planteaban en la época los puentes colgantes y el hecho de que el Tay Rail Bridge, en Escocia, de unos 3,5 km de longitud, acabado por el ingeniero Thomas Bouch (1822-1880) en 1878, colapsara el 28 de diciembre de 1879, durante el paso de un convoy, a causa del viento desencadenado por una tormenta. En el accidente, murieron 75 personas.

Las fotografías siguientes permiten apreciar el avance de la construcción de los *cantilevers*.



Con respecto a los puentes colgantes, había dos motivos de desconfianza: la falta de experiencia en su diseño y ejecución, y la escasez de materiales suficientemente fiables.

Hasta 1877, la Junta de Comercio británica limitó el uso del acero en ingeniería estructural, puesto que las propiedades mecánicas del producto, obtenido con los primeros convertidores Bessemer (1855), ofrecían valores de elevada dispersión. Con la aparición de la patente del sistema Siemens-Martin (1875), se lograron obtener aceros de calidad constante.

Thomas Bouch fue el ingeniero inicialmente designado para construir el Forth Rail Bridge, de forma similar al del puente del fiordo de Tay, es decir, mediante pilares de fundición asentados sobre basamentos de piedra apoyados en el fondo rocoso del río. Sobre los pilares de fundición descansaban vigas de hierro forjado.



A lo largo de la construcción del Tay Rail Bridge, fue preciso introducir modificaciones a causa de la mayor profundidad a que realmente se encontraba el lecho rocoso. Ello comportó la reducción de los soportes y el aumento de la luz en los tramos centrales.

El análisis posterior a la tragedia mostró un cúmulo de despropósitos que acabaron con la reputación profesional de Thomas Bouch, entre ellos:

- No haber verificado el efecto del viento en los tramos de mayor luz.
- La utilización de columnas de fundición de baja calidad.



- Los apoyos excesivamente débiles de las vigas, que se rompían bajo una carga de apenas 20 t, cuando lo esperado era una carga de rotura de 60 t.
- La falta de atención a los síntomas de debilidad que mostraba el puente en el escaso tiempo que llevaba en servicio.
- El exceso de velocidad de los ferrocarriles. Sobre el puente, en lugar de circular a 40 km/h, lo hacían a 65 km/h.
- La circulación de los trenes por la parte superior de las vigas, en lugar de apoyar los carriles en la parte inferior. Ello suponía un mayor par sobre los soportes por efecto del viento.

En el diseño del Forth Rail Bridge, fue determinante la amarga experiencia del puente sobre el Tay. Con base en ella, se decidió establecer un esquema estructural conocido y seguro, un tramo central sostenido por dos grandes ménsulas, aunque ello conllevara un mayor esfuerzo técnico y económico.

A tal fin, se realizaron exhaustivos estudios sobre los efectos del viento y las cargas dinámicas y térmicas y, en especial, se establecieron protocolos de cálculo y de verificación, que resultarían de referencia y determinantes en la realización de las grandes construcciones futuras.

Las cifras

Incluso desde la óptica actual, las cifras del Forth Rail Bridge son espectaculares; por ello, tanto por la gesta técnica y humana que supuso su construcción como por su valor testimonial, está previsto que sea declarado por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad.

En su construcción, se emplearon 64.800 t de acero, 55.000 de las cuales corresponden a los dos tramos centrales. Para unir las distintas chapas de acero, se emplearon 8 millones de roblones, de los cuales 6,5 millones corresponden al tramo central. Por tanto, se disponía un roblón cada 8,46 kg de acero en el tramo central y uno cada 6,53 kg en los tramos extremos.

Ello supone un consumo medio de acero de 25,92 t por metro lineal de puente. Si se considera el consumo medio de acero por metro lineal en los tramos centrales, se obtiene un valor de 37,74 t.

El segundo puente ferroviario sobre el Tay, construido, según el diseño del ingeniero William Henry Barlow (1812-1902), por William Arrol entre 1883 y 1887, precisó 25.000 t de acero y tres millones de remaches, además de 70.000 t de hormigón y 10 millones de ladrillo, con un peso de 37.500 t para una longitud de 3,5 km. Actualmente, este puente, al igual que el Forth, continúa en servicio. El diseño del puente ferroviario sobre el Tay, absolutamente convencional y de mayor racionalidad constructiva, estaba formado por un conjunto de pilas que



recibían vigas celosía de acero. Ello supone un consumo de acero de 7,14 t por metro lineal, es decir, menos de una quinta parte del que se necesitó para construir un metro lineal del tramo central del Forth Rail Bridge. Los datos anteriores ponen de manifiesto la falta de competitividad técnica y económica del modelo.

Es preciso considerar que, para realizar las pilas de los viaductos de acceso y cimentar el puente sobre el Forth, se emplearon, además de acero, 18.122 m³ de granito y 21.000 t de cemento. Mención especial merecen los cuatro soportes tubulares que reciben, en cada tramo, las estructuras en voladizo: miden 100,60 m de altura. Están cimentados mediante pozos de 21 m de diámetro, construidos con cajones de aire comprimido a 27 m de profundidad.

La técnica constructiva de los cajones puede emplearse para realizar pozos de cimentación tanto sobre tierra firme como sobre al agua. Consta de un cabezal, generalmente de hormigón armado, provisto de una cuchilla de acero que sigue su directriz, generalmente circular, aunque también puede ser cuadrada o rectangular.

A medida que se efectúa la excavación del fondo, el peso del cabezal y de los primeros metros del cajón lo hacen descender procurando una entibación segura de los paramentos. Alcanzada la cota de excavación, se taponan la base con hormigón para garantizar un reparto correcto de las cargas que ha de recibir la cimentación.

Cuando es preciso colocar el pozo de cimentación en el agua, se remolca mediante barcas hasta el lugar definitivo donde se produce su hundimiento. Tratándose de grandes profundidades y en presencia de agua, los obreros trabajan en una cámara cerrada bajo presión.

Por último, cabe señalar que el puente sobre el Forth admite una sobrecarga de uso de 1.422 t. La velocidad de circulación se limita a 80 km/h para trenes de viajeros y a 32 km/h para trenes de mercancías. En la actualidad, los trenes son más ligeros que en la época del vapor, por lo que el puente permite la circulación de cualquier tren del Reino Unido. Transitan por él entre 190 y 200 convoyes cada día.

La seguridad en la construcción

Hasta 4.600 obreros llegaron a trabajar simultáneamente en su construcción. Durante la obra, resultaron heridos 450 obreros y 98 perdieron la vida. Ello pone en evidencia las duras condiciones de trabajo impuestas por el sistema de construcción, extraordinariamente aéreo, y la falta de medidas de seguridad.

A título comparativo, el segundo puente ferroviario construido sobre el Tay, al que ya se ha hecho referencia, costó la vida a catorce personas, la mayoría de las cuales murieron ahogadas. En la actualidad, serían totalmente inaceptables estas cifras de muertos y heridos, mientras que en la época eran consideradas "normales" o "inevitables".



Analizando estos datos, se pone de manifiesto el duro camino que ha sido preciso recorrer para que la seguridad en la construcción haya sido tomada en cuenta como un elemento primordial de la misma, al igual que antes lo fueron los efectos térmicos y del viento, o los coeficientes de seguridad de los materiales.

El mantenimiento

El puente sobre Forth está construido en un ambiente marino. Ello supone la presencia de vapor de agua saturado de cloruro sódico que ataca de forma continua los 400.000 m² de superficie de acero que configuran el puente.

Esta circunstancia fue tomada en cuenta desde el momento de su construcción. Era evidente que el puente necesitaría, a lo largo de su vida útil, un mantenimiento continuado. A tal fin, no solo se construyó un taller de mantenimiento, sino también una colonia ferroviaria de unas cincuenta casas, situadas en Dalmeny Station.

A lo largo de más de cien años, el puente fue pintado de forma continuada, de modo que cuando los equipos llegaban a un extremo, al cabo de unos diez años reiniciaban los trabajos por el otro. La presencia de equipos de pintores era constante en el puente.

Las aportaciones de la industria química para la protección del acero llevaron a replantear, en 1996, las técnicas de mantenimiento que se habían empleado hasta la fecha en el puente. En primer lugar, se realizaron reparaciones estructurales sistemáticas.

Se estableció un plan de trabajo, que consistía en sanear y pintar 20.000 m²/año. Con base en el mismo, se chorrean con arena las superficies para eliminar las capas de pintura depositadas a lo largo de los últimos cien años; posteriormente, se aplica una capa de imprimación a base de cinc de 35 micras, una barrera intermedia de 400 micras de resina epoxi y una capa de acabado de 35 micras de color rojo brillante. Este procedimiento garantiza una protección frente a los ambientes marinos de 20 años.

3.4.8. Observaciones finales a la construcción de grandes luces con hierro y con acero

En este capítulo, que temporalmente abarca desde las primeras realizaciones de Abraham Darby III y John Wilkinson en Coalbrookdale a finales del siglo XVIII, hasta el Gran Puente del Estrecho de Akashi, inaugurado en 1998, se observa que la construcción de estas grandes luces experimenta una recesión a finales del siglo XIX que, por diversas circunstancias, no se recuperará hasta los años sesenta del siglo XX.

Ello se explica porque, una vez alcanzados determinados hitos en cuanto a salvar grandes luces, se inició un proceso de reflexión y análisis con el fin no tanto



de seguir batiendo récords, sino de salvar las grandes luces de un modo más eficiente.

Entre los hitos de la construcción de grandes luces con hierro y acero durante el siglo xx y el xxi, cabe citar los siguientes:

- Mejora de las capacidades resistentes de los aceros.
- Introducción sistemática del control de calidad en los procesos de fabricación y de montaje.
- Sustitución de los sistemas de unión roblonados por soldaduras y tornillos de alta resistencia.
- Incorporación de perfiles de mayor canto y sección, debido a la mayor capacidad de los trenes de laminación.
- Ampliación del catálogo de perfiles, gracias a la aportación, por parte de la industria siderúrgica, de una gran diversidad y gama de tubos estructurales: circulares, cuadrados y rectangulares.
- Introducción de nuevos modelos estructurales de mayor eficiencia que los arcos y los pórticos, sobre los cuales se basaron las realizaciones decimonónicas. Entre dichos nuevos modelos, cabe citar las mallas espaciales, las cúpulas geodésicas y las estructuras tensadas.
- Mayor precisión y efectividad en el cálculo, tanto por el desarrollo de nuevos algoritmos como por la disposición de ordenadores más potentes.
- Mejores medios auxiliares para el replanteo y el montaje de las piezas.

Los puntos anteriores tienen entidad suficiente para considerar que, con el cambio de siglo, evolucionan progresivamente los mecanismos y los modelos estructurales para abordar grandes luces y resolverlas con perfiles de acero.

Dicha evolución constituye, por la diversidad de sus modelos y su riqueza formal, una nueva etapa en la creatividad estructural. Como tal, es tratada en el capítulo denominado "Tubos, cables y membranas. Construcción y creatividad".

Cabe considerar, además, que desde principios del siglo xx un nuevo material, el hormigón armado, se abrió paso con firmeza y decisión, pues ofrecía nuevas vías de experimentación e interesantes alternativas para salvar grandes luces, entre otros aspectos.

Si bien los romanos ya habían desarrollado modelos constructivos resueltos con hormigón, la invención del cemento de Pórtland y su asociación con el hierro



y, posteriormente, con el acero supuso la aportación una nueva técnica cuyas posibilidades había que explorar e investigar.

Ello restó posibilidades a la realización de estructuras de grandes luces con acero, especialmente entre los años veinte y sesenta del siglo xx, época de mayor florecimiento y desarrollo de las estructuras laminares de hormigón armado.

Los aspectos más relevantes, por lo que respecta a la resolución de grandes luces con dicho material, se comentan en el apartado siguiente.

3.5. Introducción al hormigón armado

3.5.1. El contexto del hormigón armado

El hormigón armado, por su versatilidad y su resistencia, se ha convertido, desde principios del siglo xx, en el material por excelencia de la construcción. Con él se realizan tanto construcciones en que predomina la masividad como otras en que la ligereza asume el papel protagonista. Su adaptación a formas estructuralmente eficientes, junto con su capacidad de trabajo a flexocompresión, permite emplearlo para resolver grandes luces desde planteamientos muy diversos.

La realización de hormigón armado precisa, además de árido y agua, dos productos básicos: un cemento hidráulico de alta resistencia y composición alcalina, y hierro o acero. En su conjunto, se trata de elementos que abundan en la naturaleza, lo que garantiza la posibilidad de utilizarlos masivamente a un costo razonable. En el ámbito de la construcción, no existe otro material estructural que dé más por menos. Para llegar a él, fue necesario recorrer un largo camino.

A principios del siglo xix, la obtención de cementos artificiales que mejorasen las propiedades de la cal era una necesidad perentoria para una sociedad que se desarrollaba muy deprisa y exigía construcciones de mayores proporciones y mejores prestaciones, y ejecutables en el menor tiempo posible.

El hierro fue el material que ofreció una mejor respuesta a los requerimientos de los nuevos tiempos. Entre 1830 y 1880, el hierro adquirió una posición dominante como material estructural.

Sin embargo, a partir de 1840, la producción industrial del cemento de Portland dejó sentir sus efectos en el ámbito de la construcción, que descubrió en el nuevo material, inicialmente hormigón en masa y, posteriormente, armado, una gama de aplicaciones cada vez más amplia, gracias a sus propiedades: fácil adaptación al moldeo; resistencia mecánica y al fuego, y durabilidad.

Sin la aportación del hierro en su masa, cuyo uso se extendió a partir del último tercio del siglo xix, el hormigón quedaba limitado a ser un sustituto de la piedra, es decir, a trabajos de compresión. El material que vendría a transformar radical-



mente los conceptos de la construcción y las posibilidades formales de expresión de la arquitectura, el hormigón armado, surgió de la asociación eficiente del cemento de Pórtland con el hierro y, posteriormente, con el acero.

La adherencia entre el hormigón y el acero, la protección contra la corrosión que ofrece la alcalinidad del cemento y la similitud de sus coeficientes de dilatación son factores decisivos de la realidad práctica del hormigón armado y su capacidad para trabajar a esfuerzos de flexión.

Las páginas siguientes ofrecen unas referencias con el propósito de mostrar algunos de los hitos que han conducido hasta la situación actual del cemento de Pórtland y del hormigón armado

3.5.2. El cemento de Pórtland

Generalmente, se atribuye la invención del cemento de Pórtland a Joseph Aspdin (1778-1855), como si se tratase de un hecho aislado; sin embargo, disponer de un aglomerante hidráulico de altas prestaciones supuso un largo proceso, fruto tanto de la experimentación empírica como de las aportaciones de numerosos científicos.

En 1756, el ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792) descubrió que los morteros elaborados con cales producidas con un alto contenido de arcilla se endurecían bajo el agua. Fue precursor de los trabajos que permitieron desarrollar el cemento de Pórtland. Por primera vez después de 1.200 años, se disponía de aglomerantes hidráulicos de prestaciones similares a los empleados por los romanos, lo que supuso no solo recuperar una técnica perdida sino también abrir las puertas a nuevas posibilidades técnicas para la construcción.

En 1796, James Parker registró un método para la fabricación de cemento hidráulico que había descubierto por casualidad. El método consistía en la calcinación de nódulos de cal con un alto contenido de arcilla, que denominó *cemento romano*. Para ello, empleó calizas esquistasas de la isla de Sheppy. La producción de tales cementos naturales presentaba el inconveniente de la escasez de la materia prima. Ello comportaba serias restricciones para llevar a cabo una producción masiva.

Empleando mezclas cuidadosamente proporcionadas de arcilla y cal para su confección, los primeros cementos artificiales se experimentaron, de forma casi simultánea, entre 1817 y 1822, a raíz de los estudios y las propuestas de Louis Vicat (1786-1821) y James Frost (1780?-1840?).

Louis Vicat se graduó en 1806 en la École des Ponts et Chaussées; a partir de 1812 realizó trabajos sobre las propiedades de las cales hidráulicas naturales y observó la incidencia de la presencia de arcilla en la hidraulicidad. Con base en ellos, entre 1817 y 1818 elaboró una teoría científica completa sobre la hi-



draulicidad, titulada *Investigaciones experimentales con cales de construcción*. Ello puso de manifiesto que todos los países que dispusieran de arcilla y piedra calcárea podían elaborar cemento. Sin embargo, no patentó su descubrimiento.

En 1822, James Frost estableció el paso previo al cemento de Pórtland al preparar una cal artificial altamente hidráulica, que patentó bajo el nombre de *cemento británico*.

El 28 de octubre de 1824, Joseph Aspdin patentó el cemento de Pórtland, denominado así por la semejanza del producto con la piedra caliza de Pórtland. Su procedimiento de fabricación parte de una mezcla de cal, procedente de una primera cocción, y arcilla, a la cual se aplica una cocción suficientemente alta para producir una escoria vidriosa, el *clinker*, que al ser molida y amasada con agua producía un producto más resistente y fiable que sus antecesores.

En 1833, Joseph-Auguste Pavin (1806-1877) de Lafarge fundó la fábrica de Teil, en la región de Ardèche, base de la cementera Lafarge, que en 2001 se convirtió en la segunda cementera del mundo. La patente de Aspdin cruzó el canal de la Mancha y consolidó a franceses e ingleses como pioneros en la producción y la aplicación del cemento de Pórtland en edificación.

La fabricación del cemento de Pórtland acaparó la atención pública inglesa en 1848, a causa de la rivalidad entre la empresa Robins, Maude & Aspdin, fundada por el hijo de Joseph Aspdin, y la compañía JD White & Sons, adquirida y fundada por J. Bazley White en 1834.

También en 1848, E. Dupont y C. Demaille fundan en Boulogne, Francia, una industria para producir cemento de Pórtland y competir con los ingleses. A finales del siglo XIX, la mayor parte de la producción cementera en Francia se produce en 29 fábricas, ubicadas en los departamentos de Nord, Isère y Ardèche.

A partir de 1855, se establecen las primeras industrias de cemento de Pórtland en Alemania. El rigor técnico y las mejoras en la producción para obtener calidades constantes pronto convierten Alemania en el primer exportador mundial. A título ilustrativo, en 1899, solo la fábrica Dyckerhoff, situada en Amöneburg, produjo 130.000 t de cemento de Pórtland; la misma cantidad que la fabricada en Estados Unidos durante el mismo año.

En 1871, David O. Saylor (1827-1884) instaló la primera planta de producción de cemento de Pórtland de Estados Unidos en Coplay, Pennsylvania. Su primera producción se usó en la construcción de los rompeolas de Eads.

En 1887, el químico francés Henri Le Châtelier (1850-1936), en su tesis doctoral "Constitución de los morteros hidráulicos", estableció los porcentajes de óxidos y compuestos necesarios para la producción del cemento de Pórtland. Denominó sus componentes *alite* (silicato tricálcico), *belite* (silicato dicálcico) y *celite* (aluminoferrita tetracálcica).



En 1875, el químico alemán Wilhelm Michaelis (1840-1911) propuso establecer unos criterios de clasificación de los cementos estimando que el valor óptimo del módulo hidráulico (valor del cociente, en peso, entre el óxido de cal y la suma de los factores hidráulicos, óxidos de sílice, de aluminio y de hierro actuando con valencia 3) para obtener altas resistencias había de ser superior a 1,8 e inferior a 2,2.

Cuando el valor del módulo hidráulico es inferior a 1,8, se obtienen resistencias muy bajas. Valores superiores a 2,2 generan, en cuestión de días o semanas, agrietamientos por expansión del óxido de cal libre.

En 1893, Michaelis criticó algunos de los aspectos de los trabajos de Le Châtelier y desarrolló las dos teorías, la del coloide y la del cristaloides, que son la base de las teorías actuales de hidratación.

A principios del siglo xx, la fabricación del cemento de Pórtland se convirtió en un objetivo estratégico. En 1900, 24 compañías inglesas con treinta y cinco plantas, situadas en los alrededores de Londres, fundaron la empresa Associated Portland Cement Manufacturers Ltd. (APCM). El propósito era eliminar la competencia y las importaciones mediante un control total del mercado.

Numerosos pequeños fabricantes declinaron la opción, por lo que el intento de control total fracasó. La asociación aglutinó el 70 % de la capacidad de producción de Inglaterra, 1,25 millones de toneladas por año sobre un total de 1,8 millones.

En 1911, se llevó a cabo un segundo intento para unificar la industria cementera inglesa. Bajo las siglas BPCM (British Portland Cement Manufacturers), se unieron 33 compañías. Disponían de cincuenta y ocho plantas de producción, el 80 % de la capacidad total. La política de adquisiciones de la compañía a lo largo de la historia permitió que esta controlara entre el 60 y el 70 % de la producción y de la cuota del mercado británico, hasta que en 2001 fue comprada por la cementera francesa Lafarge.

A partir de 1912, se produce la expansión masiva de las plantas de producción por todo el mundo. En 1916, se funda la Portland Cement Association formada por empresas de Estados Unidos y Canadá, actualmente en activo.

Los aspectos expuestos en los apartados anteriores ponen de manifiesto el valor económico y estratégico que supone el control de la producción del cemento de Pórtland, entendido como una de las materias primas que potencian la riqueza de un país.

Desde la finalización de la Segunda Guerra Mundial hasta 2007, la producción mundial de hormigón ha experimentado un crecimiento regular, constante y espectacular: de los 300 millones de metros cúbicos del año 1945, se ha pasado a los 5.800 millones de metros cúbicos producidos en 2007. Este es otro de los efectos de las potencialidades de la construcción tecnológica.



China, el primer productor de cemento de Pórtland, del mundo, con 1.300 millones de toneladas (2007), entre 2005 y 2007 aumentó su producción un 25 %. En la actualidad, produce prácticamente el 50 % del cemento mundial.

La introducción del cemento de Pórtland y del hormigón armado en España

En España, el cemento de Pórtland llegó con retraso. Hasta 1898, no se produjo el primer cemento elaborado en nuestro país, en la fábrica de Tudela Veguín, en Asturias.

Ese mismo año, en la Escuela de Caminos de Madrid, se inauguró el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción. En Barcelona, bajo los auspicios del Ayuntamiento y la Diputación, se creó en 1907 el Laboratori d'Investigacions i Assajos, con el propósito de ofrecer un servicio a la industria y al comercio mediante ensayos y análisis, entre otros, de materiales de construcción. En 1904, después de tres años de trabajos, se inauguró, a iniciativa de Eusebi Güell i Bacigalupi (1846-1918), la primera fábrica de cemento de Pórtland de Cataluña, en el paraje denominado "Clot del Moro" en el municipio de Castellar de n'Hug, provincia de Barcelona. Estuvo en servicio hasta 1975.

La disponibilidad tardía del cemento de Pórtland en España supuso un notable retraso en la aplicación de sus técnicas constructivas; sin embargo, a partir de los años treinta, España se transformó en un país cementero, con grandes profesionales en el campo de la ingeniería civil y la arquitectura.

La técnica del hormigón armado entró en España a través de las patentes de Hennebique y de Monier. El concesionario del primero era el ingeniero de caminos José Eugenio Rivera (1864-1936), profesor de la asignatura Puentes de Fábrica y Hormigón de la Escuela de Caminos de Madrid. La patente de Monier fue explotada por el ingeniero militar Francesc Macià i Lussà (1859-1933), que posteriormente sería presidente de la Generalitat de Catalunya.

Entre 1914 y 1915, la construcción del depósito de aguas de Salamanca por parte de José Eugenio Ribera fue una de las obras pioneras realizadas con hormigón armado. Anteriormente, a partir de 1897, el mismo ya había utilizado el material de forma parcial en la construcción de los tableros de los puentes de Ciaño en Asturias, de la Exposición Regional de Gijón 1899 y de María Cristina en San Sebastián (1907).

En 1917, Demetrio Ribes Marco (1877-1921), arquitecto, y Joaquín Coloma Grau, ingeniero, crearon en Valencia la sociedad Construcciones Coloma Ribes, dedicada a las construcciones con hormigón armado.

La enseñanza reglada del hormigón armado se introdujo, en 1918, en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.



A partir de 1939, el Instituto Técnico de la Construcción y la Edificación se integró en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Actualmente, en su honor, es llamado Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. Ese mismo año aparece la primera normativa oficial para la realización de obras de hormigón armado en España, titulada *Instrucción para el proyecto de las obras de hormigón armado*. La normativa relativa al hormigón armado ha ido evolucionado para adaptarse a las necesidades de los tiempos, hasta llegar a la vigente EHE-08, integrada en el CTE.

El cemento de Pórtland en la actualidad en España

En 2007, la producción de cemento de Pórtland en España fue de 50 millones de toneladas, y la mayor parte de ellas fueron consumidas por la Asociación Nacional de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP).

A título indicativo, en 2004 las empresas pertenecientes a la ANEFHOP produjeron 59.055.000 m³ de hormigón preparado, de los cuales 11.555.000 m³ correspondieron a Cataluña. Al volumen total de hormigón preparado producido en España aquel año, hay que añadir los 23.270.000 m³ producidos por empresas no miembros de la ANEFHOP.

Ello pone de manifiesto el valor del cemento de Pórtland como materia prima generadora de riqueza y desarrollo, aunque los excesos de los últimos años han pasado una dolorosa factura.

Las primeras aplicaciones prácticas del cemento de Pórtland. Los precursores

Como todo material nuevo, el cemento de Pórtland se abrió camino lentamente, demostrando que podía resolver problemas técnicos con mayor eficiencia y a menor coste que otros materiales y técnicas constructivas empleados hasta la fecha.

En 1828, se llevó a cabo un trabajo pionero de ingeniería del cemento de Pórtland en el primer túnel construido bajo el río Támesis en Londres. Se reparó un colapso en el techo y se vertieron en el río toneladas de dicho cemento. Ello propició el sellado de la fractura y permitió extraer el agua. A partir de 1830, el empleo de hormigón en masa era corriente, en Inglaterra, en los cimientos de puentes y en las obras portuarias.

En 1832, François-Martin Lebrun (1799-1849) ensayó la utilización de hormigón en masa en la construcción de edificios y así edificó una casa en Marsac (Francia) siguiendo la influencia ejercida por los trabajos de Vicat.

A partir de 1845, Joseph-Louis Lambot (1814-1887) realizó pequeños objetos de cemento armado, depósitos de agua y botes de remo, que exhibió en la Exposición Universal de París de 1855. Aquel mismo año, (v. fotografía en la página siguiente) publicó el primer tratado de hormigón *Les bétons agglomérés appliqués à l'art de construire*. Fue quien asoció, por primera vez, hormigón y hierro.

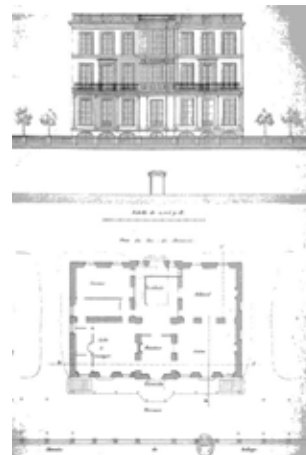


Otro destacado precursor de la construcción con hormigón, tanto en masa (en sus primeras obras) como prefabricado y, posteriormente, armado fue François Coignet (1814-1888). En 1852, empezó a experimentar con hormigón armado. Aquel mismo año, había inaugurado una planta de producción de cemento en que explotaba la patente del cemento *clinker*.

Con fines promocionales, en 1853, François Coignet construyó la primera estructura de hormigón de cemento de Pórtland reforzado con hierro, una casa sita en el número 72 de la Rue Charles-Michels de Saint-Denis (v. fotografías inferiores).

El edificio fue inspeccionado por una comisión de catorce arquitectos, encabezados por Henri Labrouste (1801-1875), que expresaron sus dudas sobre la solidez de las técnicas y los materiales en su construcción. La casa quedó abandonada y fue ocupada durante diversas épocas. Más de ciento cincuenta años después, el edificio, todavía en pie, se ha transformado en un icono de la construcción en hormigón armado.

Por su significación en la historia de la construcción, la casa fue catalogada como monumento histórico en 1998 e incorporada al patrimonio mundial. La fotografía inferior izquierda muestra una imagen del edificio; la de la derecha recoge la planta y el alzado.

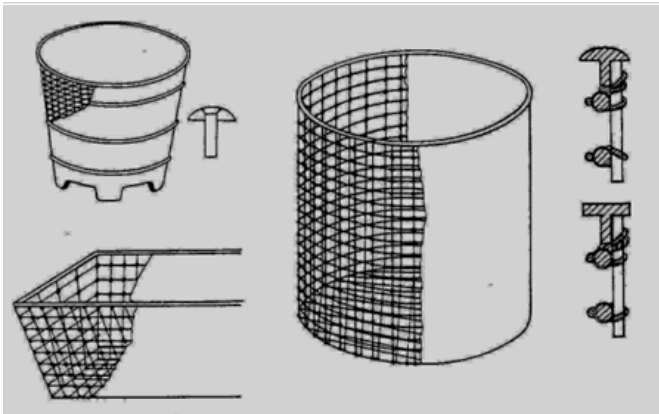




François Coignet expuso el resultado de sus trabajos, al igual que Lambot, en la Exposición Universal de París de 1855. Entre sus obras realizadas en hormigón, destacan una fábrica de productos químicos en Saint Denis (1852-1853) y la iglesia parroquial de Le Vésinet (1864).

En 1855, François Coignet obtuvo una patente para una losa formada alrededor de un doble emparrillado. Las varillas de hierro fueron colocadas para enlazar la losa con la pared. No estaban previstas para contribuir a absorber los esfuerzos de flexión.

Joseph Monier (1823-1906) aplicó las ventajas derivadas de asociar el cemento de Pórtland con el hierro a una patente de 1867 para reforzar macetas y bañeras, envolviendo con mortero telas metálicas. No hay pruebas de que Monier comprendiese el potencial del hierro a efectos de resistir esfuerzos de flexión. La fotografía inferior muestra algunos de sus diseños.



Diez años más tarde, Monier siguió proponiendo refuerzos mediante barras de hierro para los puentes de hormigón con la intención de mejorar su cohesión. En 1877, el ingeniero alemán Gustav Adolf Wayss (1851-1917) puso de manifiesto la necesidad de colocar las barras de refuerzo en la zona traccionada de la sección. Sus propuestas estaban basadas en pruebas del comportamiento resistente del hormigón. A pesar de ello, Monier mantuvo que Wayss estaba equivocado y que el hierro en el seno del hormigón solo contribuía a mejorar su cohesión.

En 1879, Wayss compró la patente de Monier y extendió la construcción con hormigón armado por Alemania, Austria y Rusia. Efectuó cálculos, que fueron publicados en un folleto titulado "El sistema Monier, armazones de hierro cubiertos de cemento".

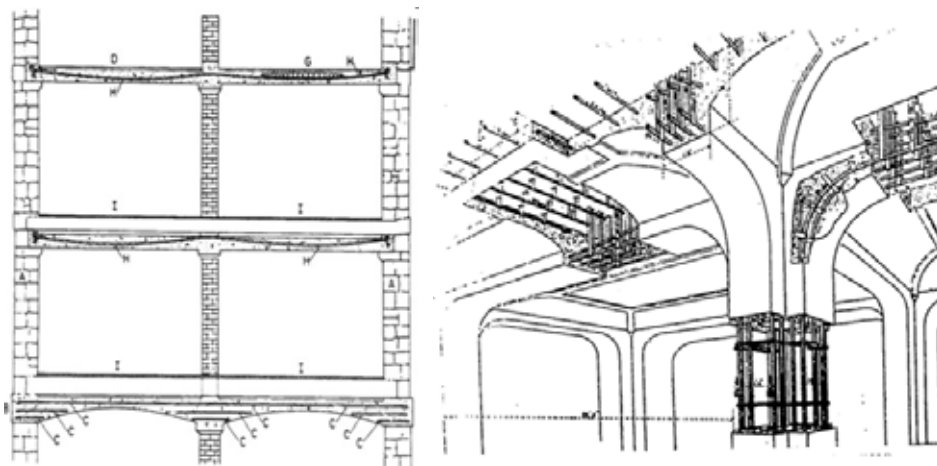
En Inglaterra y en América del Norte, la construcción arquitectónica con hormigón se desarrolló bajo parámetros muy similares a los franceses.



Inicialmente, se elaboraron, mediante moldes, piezas monolíticas de hormigón en masa, con las cuales se formaban muros y soportes que vinieron a sustituir los elementos equivalentes realizados tradicionalmente con piedra natural. Tal fue el caso del edificio de estilo griego, construido en 1835, por Obadiah Parker en Nueva York. Dicha forma de construir con hormigón, mediante bloques simulando mampostería, fue predominante en Norteamérica hasta 1870.

En Inglaterra, la construcción mediante bloques de hormigón sustitutivos de la piedra natural cedió paso, rápidamente, al concepto monolítico desarrollado en Francia, consistente en el vertido *in situ* del hormigón en encofrados de madera preparados al efecto.

En 1854, William B. Wilkinson (1819-1902) patentó un sistema de encofrado para forjados de hormigón armado mediante un emparrillado de alambre grueso, realizado con el auxilio de moldes perdidos de yeso (v. foto inferior izquierda). Su propósito era “la mejora de la construcción de viviendas, almacenes y otros edificios resistentes al fuego”.



El desarrollo pleno del hormigón armado

Con la llegada del siglo xx, el hormigón armado empieza mostrarse como material de referencia, no solo para abordar grandes obras de ingeniería, sino también para ser aplicado con eficacia en la construcción de edificios. Así, en 1903, Auguste Perret (1874-1954) construye, en el número 25 bis de la Rue Franklin de París, el primer edificio en que el hormigón visto toma carta de naturaleza. Le siguieron una serie ininterrumpida de edificios en todos los continentes.

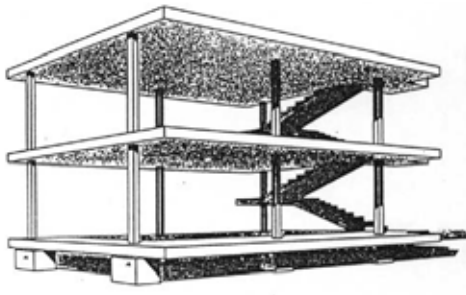
El esquema constructivo de la fotografía superior derecha, atribuido a Perret, permite apreciar que, a principios del siglo xx, el hormigón armado como técnica constructiva estaba consolidado, lo cual evidenciaba su capacidad no solo de



formar estructuras monolíticas, sino también de expresar sus cualidades plásticas. Los elementos constructivos que se aprecian en el mismo siguen siendo vigentes, en buena medida: armaduras principales con estribos, para resistir esfuerzos tanto de flexión como de compresión.

Al desarrollo de la técnica de puesta en obra del hormigón, contribuyó, de forma decisiva, el bombeo, mediante el cual el hormigón recién amasado podía ser conducido a través de una tubería hasta el punto de destino. La primera bomba de hormigón fue patentada en 1913. El transporte y, al mismo tiempo, el amasado del hormigón se produjo a partir de 1916, a través de la patente del primer camión hormigonera.

En 1920, Le Corbusier (1887-1965) creó el modelo de la Casa Dom-Ino, para realizar en serie, en pocas semanas, una estructura de hormigón (v. fotografía inferior izquierda). La idea no prosperó, porque la industria y la mano de obra no estaban en condiciones de realizar tal ejercicio. El nombre patentado unía la abreviatura de la palabra *domus*, "casa" en latín, con la uniformidad formal de un dominó.



A pesar de su aparente fracaso, las ideas aportadas por la casa Dom-ino sentaron las bases de una nueva forma de concebir y construir la arquitectura, en que la estructura y los cerramientos asumen sus funciones de forma libre e independiente.

La fotografía superior derecha corresponde a una estructura actual de hormigón armado. Comparándola con el esquema de la Casa Dom-ino, puede concluirse que los planteamientos de Le Corbusier acabaron imponiéndose y siguen manteniéndose, en buena medida, más de noventa años después.

Cabe destacar las importantes aportaciones a las técnicas de puesta en obra del hormigón realizadas por el ingeniero francés Eugène Freyssinet (1879-1962) en una época en que el hormigón parecía haber alcanzado ya carta de plena naturaleza. Algunos de sus logros, expuestos en orden cronológico, son los siguientes:



- 1917. Introduce la vibración para compactar el hormigón fresco.
- 1928. Patenta el hormigón pretensado.
- 1929. Propone el tratamiento térmico al vapor para mejorar el curado del hormigón.
- 1936. Inventa y aplica gatos planos para facilitar el descimbrado.
- 1939. Patenta el hormigón postesado y los anclajes necesarios para llevarlo a cabo.

Las primeras normativas reguladoras

En los primeros años del siglo xx, el hormigón armado dejó de ser un material experimental para convertirse en un material experimentado que ha de cumplir unas determinadas reglas en cuanto a la calidad de sus componentes, su preparación y su puesta en obra, para obtener resultados apropiados. Era preciso crear un cuerpo normativo y darlo a conocer a través de los estudios universitarios de arquitectura e ingeniería.

En 1903, se publicó en Suiza el primer código de hormigón armado, titulado *Normas provisionales para el proyecto, la construcción y el control de obras de hormigón armado*. También en 1903 se constituyó la *Chambre Syndicale des Constructeurs en Ciment Armé de France*.

En 1904, se publicó el primer código alemán para la construcción mediante cemento armado. La técnica y el cálculo del hormigón armado dispusieron, aquel mismo año, de un cuerpo teórico estructurado con la publicación, por parte de Napoléon De Tédesco (1848-1922), de un tratado de 600 páginas, titulado precisamente *Hormigón armado*.

En 1906, apareció el primer reglamento oficial francés, en el cual se inspirarían los demás países. Otorgaba cierta libertad a los proyectistas para construir estructuras sutiles, prohibidas en otros países.

Con la aparición de los aspectos normativos, los avances en la técnica del hormigón armado se producen de forma coral, de modo que cada país dispone de su propia normativa.

A partir del desarrollo normativo, se conquistan nuevos logros, pero desaparecen los grandes hitos reservados a los pioneros.

Así, a partir de los años sesenta del siglo pasado, se experimenta con la adición de fibras al hormigón, y en los años setenta, se desarrollan multitud de aditivos: aceleradores, retardadores de fraguado y fluidificantes.



Las experiencias más recientes se centran en la confección de hormigones autocompactantes, de alta resistencia, que tienen un mejor comportamiento frente al fuego, y en la utilización de materiales reciclados para reducir el impacto ambiental.

En la actualidad, el conocimiento científico de los aglomerantes basados en el cemento de Pórtland y del hormigón armado permite construir de forma versátil, eficiente y segura, conforme a los requerimientos específicos de cada obra.

Como conclusión final, el hormigón armado es insustituible porque:

- Es resistente a los agentes atmosféricos y al agua marina, en las construcciones bajo rasante.
- Es aplicable a todo tipo de cimentaciones y sistemas de contención de tierras.
- Ofrece una amplia gama de resistencias y propiedades para la realización de todo tipo de estructuras: prefabricadas, semiprefabricadas y elaboradas *in situ*.

Por todo ello, es un material básico para la edificación y la ingeniería civil, por lo que los gobiernos consideran que la fabricación del cemento de Pórtland es estratégica.

3.6. El hormigón armado, una nueva manera de salvar grandes luces. De la masividad a las láminas. La esbeltez como objetivo

3.6.1. Introducción y ejemplos tipológicos

Este apartado recoge la utilización del hormigón armado para salvar grandes luces, y los recursos formales y tecnológicos empleados para lograrlo.

Sorprende la versatilidad del hormigón armado, un material concebido en sus inicios como masivo. De la mano de maestros como Freyssinet, Bauersfeld, Torroja, Fisac, Candela, Dischinger o Nervi, es capaz de adquirir ligereza, formas bellas y estructuralmente eficientes.

Los ejemplos que se detallan a continuación, en el mismo orden de exposición, son los siguientes:

- Los hangares para dirigibles del Aeropuerto de Orly
- La cúpula del Carl-Zeiss-Planetarium
- Los mercados de Leipzig y de Basilea.
- El mercado de Algeciras
- La tribuna del hipódromo de la Zarzuela



- El Frontón Recoletos
- La cuba hiperbólica de Fedala
- El Restaurante "Los Manantiales"
- Las aportaciones de Miguel Fisac
- El Palazzetto dello Sport de Roma
- Palacio de Congresos Benjamin Franklin
- La catedral de Brasilia
- El Centre des Nouvelles Industries et Technologies (CNIT)

En su conjunto, las obras detalladas responden a muy diversos perfiles y formas geométricas. A lo largo de su exposición, aparecerán arcos parabólicos, cúpulas gallonadas, cúpulas esféricas, paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de revolución y cilindros.

Todas las formas indicadas tienen el denominador común de la belleza que otorga su integración en la función estructural. Constituyen el testimonio de la asociación de plasticidad y resistencia.

Los hangares para dirigibles en el Aeropuerto de Orly

Entre 1921 y 1923, Eugène Freyssinet (1879-1962) construyó dos hangares gemelos para dirigibles en el Aeropuerto de Orly. Se trata de una de sus obras más conocidas y significativas, tanto por sus dimensiones como por las aportaciones tecnológicas que supuso su construcción para el desarrollo de la puesta en obra del hormigón armado.

En la misma, conflúan, de modo eficiente, la modularidad, la unidad de forma, la función y la estructura, la economía de materiales, la sistematización del proceso constructivo, la utilización de encofrados deslizantes y la aplicación del vibrado.

No es frecuente poder destacar, en un proyecto y en la ejecución de una obra, un conjunto tan amplio y de aspectos significativos, concebidos de forma homogénea, para conseguir un resultado final de excelencia. Por desgracia, ambos hangares fueron destruidos por un bombardeo americano durante la Segunda Guerra Mundial.

Según las bases del concurso, las dimensiones de las naves que tenían que alojar los dirigibles imponían un espacio útil de 50 m de diámetro. Freyssinet adoptó una solución modular de arcos parabólicos, y para cada hangar conformó unas dimensiones de 86,00 m de ancho, 63 m de altura y 300 m de longitud (v. fotos inferiores).



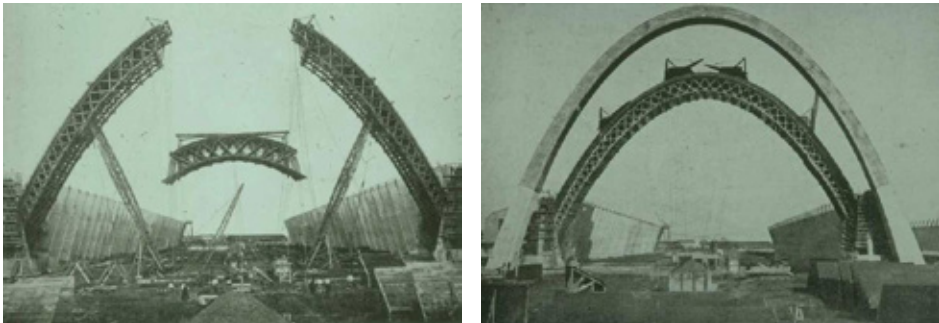


Como en el caso del Crystal Palace de Paxton, Freyssinet ganó el concurso al ofrecer la solución más económica. Utilizando la geometría de forma muy inteligente, construyó cada uno de los arcos modulares, de 7,50 m de ancho, de forma grecada, y así obtuvo un gran momento de inercia de su sección y, con ello, rigidez.

El grueso de las paredes de cada elemento arco era de solo 9 cm de espesor. La dimensión de la greca oscilaba entre 5,40 m en la base y 3 m en la clave. La esbeltez de la lámina resultante con respecto a la luz, de 1/1000, es diez veces inferior a la cáscara de un huevo.

Además de la modularidad, cabe destacar la sistematización de la construcción y, en especial, del sistema adoptado para el encofrado de los arcos. Las cerchas estaban formadas por tres piezas, dos laterales y una central, elaboradas mediante una estructura reticular de tablonos de abeto (v. foto inferior izquierda).

Las piezas laterales pivotaban sobre su base por medio de gatos hidráulicos, para permitir el encaje de la pieza central. Un sistema de rodamientos instalado sobre la superficie inclinada definida por la cercha permitía desplazar, a lo largo de la misma, de forma simétrica, sendos cajones de encofrado, hasta completar el arco (v. foto inferior derecha).



El proceso constructivo de los cuarenta arcos que conformaban cada uno de los hangares se desarrollaba en tres etapas: cimientos e impostas de 2 m de canto; bases del arco dispuestas en voladizo, con una altura de 17 m, y el arco propiamente dicho, de 75 m de luz y 144 m de desarrollo (v. fotografía izquierda de la página siguiente). La fotografía inferior derecha permite apreciar el extraordinario tamaño de la construcción, en comparación con el de los aviones.

Se empleó un hormigón muy fluido y de endurecimiento rápido para garantizar su correcta adaptación a los encofrados. Se utilizó hormigón dosificado, con 350 kg de cemento por cada 1.000 kg de arena y grava. Además, el cascarón resultante tenía que ser impermeable. Con objeto de mejorar la compacidad del hormigón, Freyssinet fue pionero en la utilización de vibradores.



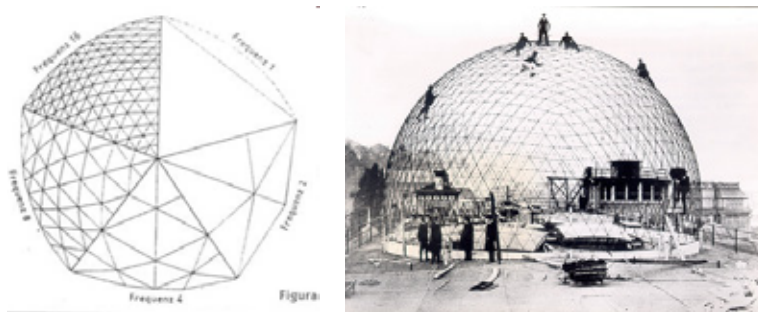
La cúpula del Carl-Zeiss-Planetarium

Por su año de construcción (1923), se considera que la cúpula de este planetario, ubicado en Jena, la primera gran cúpula construida con hormigón armado. Sus dimensiones, de 23 m de diámetro, son una pequeña muestra de las posibilidades técnicas y resistentes del hormigón armado.

Inaugurado en 1926 con un aforo de 400 personas, es el planetario en activo más antiguo del mundo, si bien su aforo actual se ha visto reducido a 297 espectadores, para mejorar la visión. Actualmente, el edificio tiene carácter de monumento histórico.

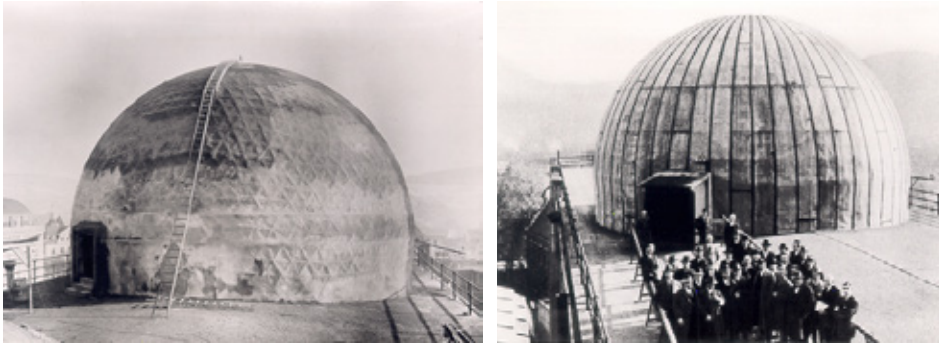
La cúpula fue construida por Walter Bauersfeld (1879-1959) y Franz Dischinger (1887-1953), con objeto de disponer de una superficie sobre la cual proyectar las trayectorias de los cuerpos celestes. Bauersfeld era un ingeniero empleado de la fábrica Zeiss. Construyó la estructura a requerimiento del astrónomo Max Wolf (1863-1932), pionero de los proyectores planetarios.

Previamente, en 1922, y a modo de ensayo de la técnica constructiva, en la azotea de la fábrica Bauersfeld construyó la primera cúpula geodésica, cuyo diámetro era de 16 m. Para ello, partió del icosaedro, que subdividió según la frecuencia 16, y proyectó sus aristas hacia la esfera imaginaria que los circunscribe, con lo cual se adelantaba en más de veinte años a Buckminster Fuller (1895-1983) en la construcción de cúpulas geodésicas, cuyos primeros trabajos datan de 1945 (v. fotografía inferior izquierda).





Bauersfeld realizó una aproximación a una semiesfera mediante una malla de 3.480 barras cuyos vértices exteriores eran tangentes a la misma. Sobre dicha malla, se aplicó un revestimiento de hormigón armado, como puede observarse en las fotografías siguientes.



La cúpula definitiva del planetario tiene solo 6 cm de espesor y salva una luz de 23 m. Ello supone una relación espesor-luz de 1/383, muy inferior a la de la cáscara de un huevo, que tiene unos valores del orden de 1/100. Las dos fotografías inferiores muestran el planetario el día de su inauguración en 1926 y en la actualidad.



Los mercados de Leipzig y de Basilea

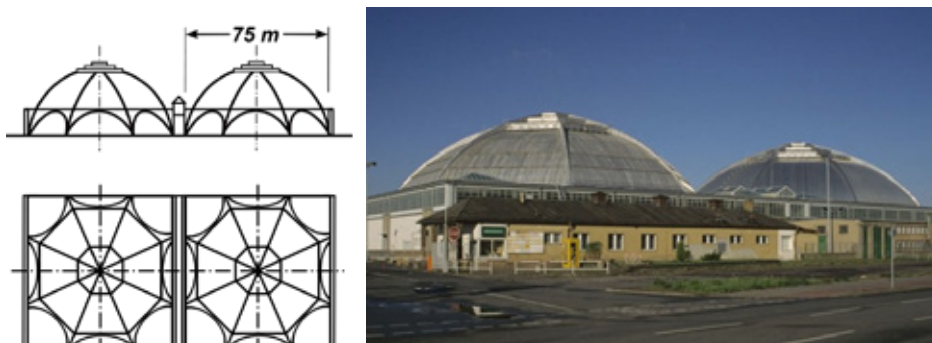
Tanto por la época de su construcción como por el empleo del hormigón armado para salvar grandes luces, los mercados de Leipzig y de Basilea son pioneros.

El mercado de Leipzig tiene unas dimensiones totales de 238×76 m. Está cubierto mediante dos cúpulas gemelas nervadas cuyo diámetro es de 65 m y que alcanzan una altura de 29,90 m.

El dibujo de la izquierda muestra, en esquema, el alzado y la planta del mercado. La fotografía de la derecha ofrece una imagen actual del edificio.



La obra se realizó entre 1927 y 1929. En su construcción, se emplearon 2.160 t de hormigón armado. Sus autores fueron el arquitecto Hubert Ritter (1886-1967) y los ingenieros Franz Dischinger (1887-1953) y Hubert Rühsh (1904-1979).



El mercado de Basilea, realizado en 1929 (V. fotografías inferiores), dispone de una sola cúpula ochavada de 60 m de luz y tan solo 8 cm de espesor, cuyo perfil es una cicloide. Sus autores fueron los ingenieros y teóricos del hormigón armado Franz Dischinger y Ulrich Finsterwalder (1897-1988). Dicha sala tiene actualmente la consideración de patrimonio arquitectónico, por lo que se ha conservado en la remodelación de su entorno, iniciada en 2006 y finalizada en 2012.



Eduardo Torroja

A continuación, se detallan, por su significación y sus aportaciones constructivas para la resolución de grandes luces, las siguientes obras de Eduardo Torroja Miret (1899-1961): el mercado de abastos de Algeciras, la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela, el Frontón Recoletos y cuba hiperbólica de Fedala.

El mercado de Algeciras. En 1933, Eduardo Torroja abordó, en el proyecto del mercado de Algeciras, la construcción de una cúpula esférica apoyada sobre ocho soportes, de 47,80 m de diámetro y un radio de curvatura de 44,10 m, todo un referente para su época. Los trabajos concluyeron a finales de 1935.



Con toda seguridad, Torroja conocía los proyectos recién terminados del mercado de Leipzig (1927-1929) y de la Markthalle de Basilea (1929), ambos todavía en servicio. Sus cubiertas estaban formadas por cúpulas nervadas de hormigón armado, con arcos de cilindro en sus sectores. Ambos tenían lucernario, modelo que Torroja adoptó también en Algeciras.

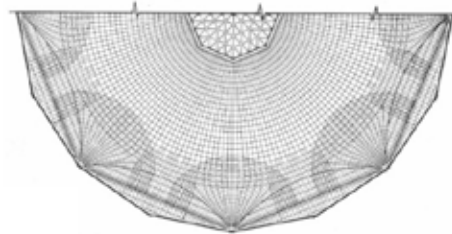
Estos antecedentes pusieron de manifiesto las posibilidades del modelo consistente en una planta central cubierta con una cúpula de hormigón armado para la realización de un mercado. A favor del mismo, destacaban la diafanidad y la economía de construcción frente a las alternativas tradicionales en acero y cristal.

En el caso del mercado de Algeciras, se trata de un casquete esférico sin nervaduras, rematado por un lucernario octogonal de 9,90 m de diámetro.

Si bien su luz es menor que la de los ejemplos precedentes, se trata de una forma conceptualmente más pura, más difícil de ejecutar, y con aportaciones conceptuales y constructivas de interés.

Para completar la planta y señalar los ocho accesos, el casquete esférico, se interseca con sectores de cilindro en el perímetro, en cada uno de ellos de ocho lados, definidos por los soportes. Los sectores de cilindro se prolongan en voladizo hacia el exterior y forman un perfil poligonal de dieciséis lados, con objeto de dar forma a las marquesinas dispuestas sobre las entradas del mercado (v. fotografía inferior izquierda).

El espesor de cálculo de la lámina es de 9 cm. El grosor se va incrementando gradualmente hacia la zona de los soportes, hasta alcanzar los 50 cm, para resistir adecuadamente la concentración de tensiones que se produce en las zonas de apoyo. A tal fin, como puede apreciarse en la semiplanta de la fotografía inferior derecha, se disponen armaduras concéntricas para absorber los esfuerzos cortantes.



Es de gran interés constructivo el sistema empleado para contrarrestar los empujes, así como el procedimiento empleado para garantizar compresiones en la lámina.

Para contrarrestar el empuje radial, se dispuso un zuncho octogonal periférico, formado por 16 redondos de 30 mm de diámetro. Estos fueron tensados me-



dian­te tensores de rosca, mien­tras la cúpula es­ta­ba to­davía cim­bra­da. La ten­sió­n pro­vo­có la se­pa­ra­ción de la lámi­na de hor­mi­gón de la cim­bra. De es­te mo­do, se evi­ta­ron even­tuales flexio­nes por es­ti­ra­mien­to del zun­cho.

Me­diante el pro­ce­di­mien­to des­cri­to, to­da la lámi­na que­da com­pri­mi­da. Al no pro­ducirse fisu­ras, su es­tan­quei­dad es­tá ga­ran­ti­za­da, sin ne­ce­si­dad de efec­tu­ar nin­gún ti­po de im­per­meabi­li­za­ción.

Pos­te­rior­men­te, el zun­cho es hor­mi­go­na­do para pro­te­ger­lo de la oxi­da­ción y, al mis­mo tiem­po, para do­tar­lo de inercia térmica, al ob­je­to de que sea me­nos sen­si­ble a los cam­bios brus­cos de tem­pe­ra­tu­ra.

Con el fin de evi­tar la cons­truc­ción de vi­gas de bor­de en los sec­to­res cilín­dri­cos, que ha­brían res­ta­do es­bel­tez a la so­lu­ción es­truc­tu­ral, des­de el cen­tro de ca­da una de las ca­ras del zun­cho se ten­die­ron un to­tal de o­cho ra­dios, si­tu­a­dos en el pla­no del cer­ra­mien­to.

De acuer­do con lo ex­pues­to en los apa­ta­dos an­te­rio­res, en re­la­ción con la cons­truc­ción de cúpulas de gran luz con hor­mi­gón ar­ma­do se ex­traen las con­clu­sio­nes si­guie­n­tes:

- Con res­pec­to a las cúpulas his­tó­ri­cas, ex­pues­tas al tra­tar de la cons­truc­ción de gran­des lu­ces con ma­te­riales pé­treos, se in­cre­men­tan has­ta ca­si do­blar­las.
- Se re­ducen los es­pe­so­res y, en con­se­cuencia, los pe­so­es y el con­sumo de ma­te­rial.
- Se re­ducen los tiem­pos de eje­cu­ción.
- No se a­go­tan las po­si­bi­li­da­des del sis­te­ma cons­truc­ti­vo. Obsér­vese que se sal­van lu­ces de 75 m con so­lo 8 cm de es­pe­sor de lámi­na. No se em­plean so­lu­cio­nes de do­ble ca­pa, con las cua­les las lu­ces a sal­var po­drían su­pe­rar, fá­cil­men­te, los 200 m.

Co­mo con­clu­sión fi­nal, los apa­ta­dos an­te­rio­res po­nen de ma­ni­fiesto, una vez más, el in­men­so sal­to cuali­ta­ti­vo que su­puso y si­gue su­ponien­do dis­poner, en el ám­bi­to de las cons­truc­cio­nes ar­qui­tec­tó­ni­cas, de un ma­te­rial lla­ma­do *hor­mi­gón ar­ma­do*.

La tribuna del Hipódromo de la Zarzuela. Los gran­des vola­di­zos res­pon­den a la ne­ce­si­dad de pro­te­ger­se de las in­clemencias at­mos­féricas en es­pa­cios abier­tos. Son in­dis­pen­sa­bles en es­ta­dios, en cam­pos de jue­go y, en ge­ne­ral, en es­pec­tá­cu­los de­sar­rol­la­dos al aire li­bre.

Tales ele­men­tos han de ser, a la vez, li­ge­ros y resis­ten­tes, en es­pe­cial fren­te a los efec­tos del vien­to, y sus apo­yos es­truc­tu­ra­les no han de in­ter­fe­rir ni en la vi­sión ni en la acce­si­bi­li­dad del es­pa­cio cu­bie­rto. Es­tas pre­misas di­fícil­men­te se



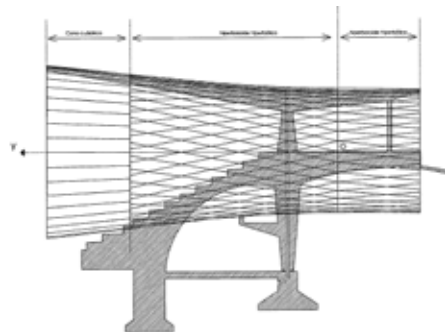
podían satisfacer en 1935, empleando materiales tradicionales, cuando Eduardo Torroja participó en el concurso para la realización de la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid.

El empleo de hormigón armado habría podido dar lugar a soluciones pesadas y escasamente estéticas; sin embargo, Torroja aunó la rigidez y la ligereza mediante la geometría. Proyectó y construyó un voladizo modular de 12,80 m, formado por sectores de hiperboloide de revolución con apoyos situados cada 4,88 m, mientras que el otro extremo salva la mitad de dicha luz.

En la zona de los soportes, la flecha de la sección transversal de cada módulo es de 1,40 m y el radio de curvatura, de 2,75 m. En el extremo libre del voladizo, la flecha es de 0,50 m y el radio de curvatura, de 6,70 m. El espesor de la lámina se reduce progresivamente, desde 14 cm en la clave del arco sobre la línea de soportes, hasta 5 cm en el borde libre.

Las cuatro fotografías inferiores ofrecen una visión de conjunto de la singularidad de la obra. La superior izquierda corresponde al lado de la pista. La de la derecha muestra el perfil del voladizo y cómo este es equilibrado por tirantes situados en la parte opuesta a la pista. La inferior izquierda corresponde a un segundo tramo del graderío. La inferior derecha detalla la geometría generadora de las láminas, y la simplicidad y la elegancia de la estructura de soporte de las graderías.

La estabilidad lateral de los pórticos de apoyo se consigue con una viga de gran rigidez, situada en el vano central que enlaza los dos soportes contiguos. La





unión entre los restantes vanos se realiza mediante vigas situadas en el mismo plano, pero de menor momento de inercia.

El voladizo principal se equilibra mediante un uno o puesto de 7 m de longitud, formado por secciones de paraboloides hiperbólicos, que cubre la galería superior, con vistas a la pista y al *padding*. Este voladizo está sujeto, en cada tramo, por un tirante.

Torroja, siempre preocupado en sus obras por los efectos higrotérmicos y de estanqueidad, hizo coincidir las juntas de hormigonado con las claves de los arcos, por ser los puntos donde se acumula menos agua.

Para hormigonar cada módulo de voladizo, incluidos los pilares, cuya superficie real es de unos 115 m², fueron precisos 12 m³ de hormigón, es decir, un valor medio de grueso de la lámina de unos 10 cm.

En uno de sus artículos, Torroja menciona que, durante la Guerra Civil, las láminas fueron alcanzadas y perforadas hasta en 26 ocasiones. También aparecieron numerosas fisuras como consecuencia de las explosiones y vibraciones.

Finalizada la contienda, se corrigieron los desperfectos y se reconstruyó con hormigón armado la continuidad de las láminas. En la actualidad, después de ser declarada Bien de Interés Cultural en 1980, la tribuna del Hipódromo de la Zarzuela sigue en servicio.

El Frontón Recoletos. También de 1935 es el desaparecido Frontón Recoletos de Madrid cuya lámina, formada por dos arcos de círculo, salvaba una luz de 32,50 m a lo largo de una longitud de 55 m.

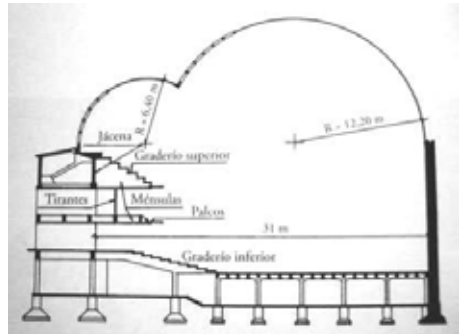
El radio del cilindro mayor era de 12,20 m y de 6,40 m el menor. La intersección de ambas superficies se producía ortogonalmente. El espesor de la lámina era de 8 cm, excepto en las proximidades de la intersección de ambos cilindros, cuyo espesor era de 16 cm.

Cada una de estas láminas estaba dotada de una franja de lucernarios, orientados al norte y situados de modo que no produjeran deslumbramientos a los jugadores. El lucernario del cilindro mayor proporcionaba iluminación a la zona de juego, mientras que el correspondiente al cilindro menor iluminaba la zona alta de las gradas.

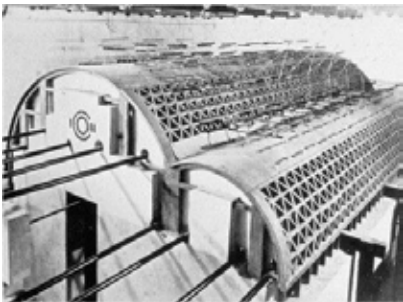
Las cuatro fotografías siguientes permiten una aproximación a sus formas. La fotografía superior izquierda muestra una imagen exterior del edificio. La superior derecha permite apreciar los lucernarios y la gradería superior, sustentada sin ningún soporte que interfiera la visión del primer nivel de gradas.

La fotografía siguiente izquierda muestra el atrevido y elegante vuelo de la gradería superior. El esquema de la derecha detalla la ingeniosa solución estructural

del soporte de la gradería superior y de los palcos. La gradería superior se sostiene mediante una viga de 4 m de canto y 22 m de luz, de la cual parten ménsulas transversales cuyo perfil escalonado se corresponde con el de la gradería. Los palcos se sustentan por medio de tirantes fijados a las ménsulas.



La fotografía inferior izquierda muestra los ensayos estructurales a pequeña escala a que fue sometido el diseño. La fotografía de la derecha muestra el encofrado de uno de los lucernarios antes de verter el hormigón.



La ruina de la cubierta del Frontón Recoletos se produjo como consecuencia de los bombardeos que sufrió Madrid durante la Guerra Civil. A causa de impactos directos, se produjeron diversos agujeros en la lámina, algunos de varios metros cuadrados. Ello, junto con las vibraciones de las explosiones, produjo un des-



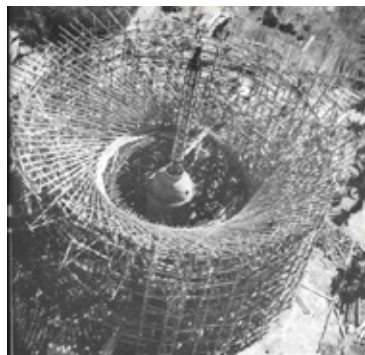
plazamiento de 60 cm de la arista correspondiente a la intersección de los dos cilindros.

Dada la situación de guerra, no se pudo intervenir apuntalando preventivamente la estructura, como fase previa a su reparación. Se produjo una situación de pandeo plástico, a causa de la fuerte compresión a que estaban sometidas las generatrices del lucernario superior, cuyo progreso acabó produciendo el colapso.

La cuba de Fedala. La cuba de Fedala (Marruecos) es un depósito de agua de 3.500 m³ de capacidad. El nivel inferior de la masa de agua se encuentra a 10,50 m del suelo.

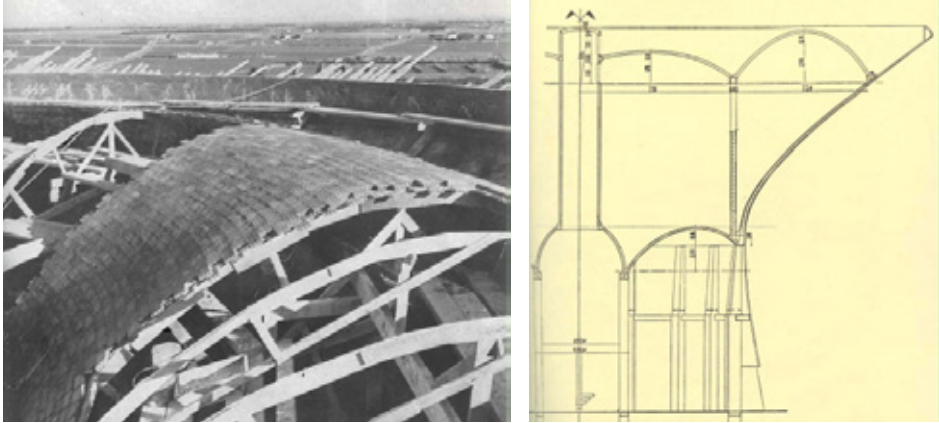
Fue construida en 1957. La cuba está conformada mediante un hiperboloide de revolución cuyo diámetro máximo es de 40 m, que se reduce a 20 m en el encuentro con el segundo hiperboloide de revolución, que le sirve de base. Los ejes de ambos hiperboloides coinciden. La altura del agua acumulada en su interior supera los 8 m (v. fotografía inferior izquierda).

La adopción del hiperboloide no es gratuita, pues ayuda a cumplir funciones estructurales. Como es sabido, se trata de una superficie reglada, lo cual permitió realizar los encofrados mediante tablas rectas, así como aplicar la técnica del hormigón postesado, colocando los tensores a lo largo de las dos familias de líneas rectas propias de un hiperboloide. De este modo, se logró la compresión simultánea de generatrices y directrices y se evitó el riesgo de corrosión de las armaduras que se produce en un hormigón traccionado a través de sus fisuras (v. foto inferior derecha).



El fondo de la cuba está formado por dos sectores de bóvedas tóricas de hormigón armado, encofradas sobre bóvedas tabicadas de tres gruesos de rasilla (bóvedas a la catalana). Dichas bóvedas actuaron como encofrado perdido (v. fotografía siguiente izquierda).

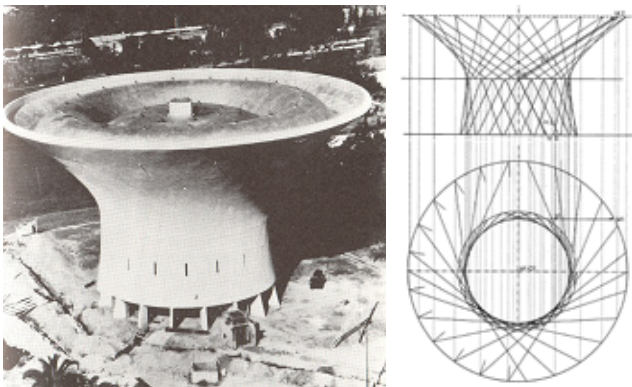
Para evitar las tracciones que se producen en su anillo exterior, se postensó este anillo mediante tensores de rosca cuya disposición geométrica conforma una poligonal estrellada.



Los gruesos de hormigón de los paramentos de la cuba oscilan entre los 28 cm de la base, que se reducen progresivamente hasta los 17 cm de la coronación. El vuelo restante tiene un espesor constante de 10 cm, como puede apreciarse en el esquema de sección de la foto superior derecha.

La cubierta está constituida por dos sectores tóricos, formados por tres gruesos de rasilla colocados a rompejunta (bóveda a la catalana), al igual que el encofrado perdido de la base. En ambos casos, fondo y cubierta, para su construcción se emplearon simples camones radiales (v. fotografía inferior izquierda).

Las bóvedas de la cubierta se apoyan en el cilindro central de servicio, de 2 m de diámetro, en un anillo intermedio que descansa sobre soportes dispuestos radialmente y sobre el hiperboloide perimetral. El gráfico inferior derecho permite apreciar la geometría reglada del depósito.



A modo de conclusión, puede indicarse que Eduardo Torroja aplicó la racionalidad geométrica reglada del hiperboloide de revolución y de los sectores tóricos, para dar respuesta a los requerimientos constructivos propios del hormigón armado con respecto a la disposición de las armaduras, de los encofrados y de los



empujes del agua. Al mismo tiempo, supo integrar una técnica constructiva con una tradición de siglos, la bóveda catalana, a su concepción vanguardista de la técnica constructiva, aunando la racionalidad y la tradición,

Félix Candela

Félix Candela Outeriño (1910-1997) estudió en la Escuela de Arquitectura de Madrid en los años de la República. Como capitán de ingenieros del bando republicano, la Guerra Civil le obligó a exiliarse a México, donde tras muchos años de esfuerzo consiguió convalidar su título y desarrolló la mayor parte de su labor.

Dotado de una sólida formación matemática y científica, su aportación principal a la técnica del hormigón armado fue la construcción de estructuras laminares, planteadas como soluciones prácticas, y a la vez económicas, para cubrir ámbitos arquitectónicos. Consiguió adaptar sus ideas, y abrió nuevos caminos para que sus diseños fueran construibles con los medios limitados del México de la época, en que predominaba la concepción artesana del trabajo.

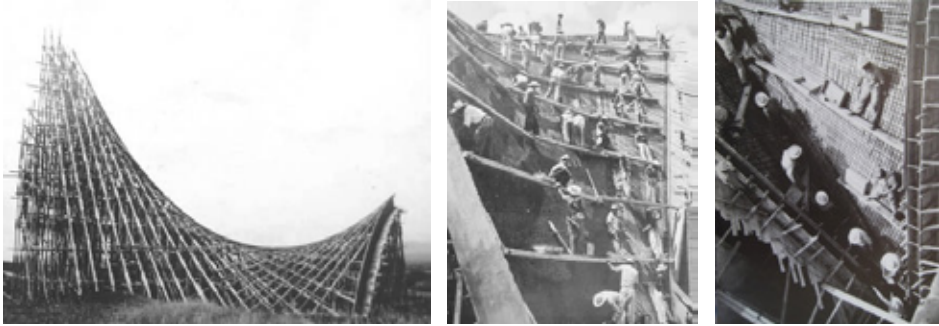
Con estas premisas, Candela no podía plantearse superar grandes luces, aunque para él resultaba evidente la necesidad de aplicar sus principios a cubiertas y cerramientos de pequeña o mediana luz. La fusión de sencillez y maestría aunó forma, función y economía de medios, sin menoscabo de la pureza geométrica de sus diseños. A tal fin, evitó reforzar sus láminas en los bordes.

Es preciso considerar que Candela actúa, en sus obras, como arquitecto, como ingeniero y como constructor, según la tradición nacida en la Edad Media y cuyos últimos ejemplos contemporáneos más notables fueron Alexandre Gustave Eiffel (1832-1923), Robert Maillard (1872-1940) y Eugène Freyssinet (1879-1962).

En 1950, junto con los hermanos arquitectos Fernando y Raúl Fernández Rangel, fundó la empresa Cubiertas Ala, que operó hasta 1976, aunque él la abandonó en 1969. Dicha empresa realizó un total de 1.439 proyectos de los cuales se materializaron 896.

Según la definición de Frei Paul Otto (1925), con quien mantuvo una estrecha amistad, los cascarones de Félix Candela "eran velas de piedra artificial, resistentes a las condiciones atmosféricas y estables a los terremotos [...] de formas complejas pero fáciles de construir".

En efecto, las láminas cilíndricas de Franz Dischinger (1887-1953), desarrolladas a partir de los años veinte, tenían formas sencillas, pero su espesor mínimo era, al menos, de 8 cm y precisaban doble armadura. En cambio, los cascarones de Candela se efectuaban con gruesos de entre 3 y 4 cm sobre una armadura de una sola capa, asentada sobre una cimbra de madera (v. foto inferior izquierda). Su construcción era artesanal, basada en una mano de obra barata. Se hormigonaba a mano, sin doble encofrado, lo que permitía abordar superficies verticales (v. fotografías central y derecha en la página siguiente).



La idea fundamental de las estructuras laminares, tal como decía Félix Candela, es “evitar, en la medida de lo posible, los esfuerzos de flexión mediante la forma adecuada”.

Los encofrados herramienta, así como los medios auxiliares actuales –andamios modulares, plataformas elevadoras, el hormigón proyectado y la existencia de aditivos, pinturas y aislamientos altamente eficientes– permiten, sin duda, realizar cascarones para salvar grandes luces tan competitivos como las soluciones al uso.

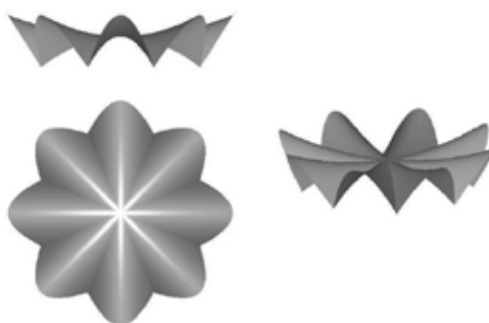
La aportación estética de la geometría reglada y la facilidad de su construcción aconsejan, para luces intermedias, el cultivo y la evolución de una técnica constructiva que ya ha pasado sus mejores momentos.

La competencia y la eficiencia de sistemas estructurales basados en mallas espaciales, elementos tesados o la propia madera laminada encolada se verían reforzadas por la presencia de un nuevo competidor.

Al igual que Torroja, Félix Candela trabajó sobre la base de superficies regladas, hiperboloides y paraboloides hiperbólicos (los *hypar*). Los *hypar*, considerados como superficies de traslación, están formados por una parábola que se desplaza, paralela a sí misma, a lo largo de otra parábola, situada en un plano perpendicular.

Los *hypar*, que se empezaron a ensayar en los años treinta, presentaban una serie de características que los hacía especialmente atractivos para resolver cubiertas ligeras: rigidez, delgadez y facilidad de construcción.

El Restaurante “Los Manantiales”. El ejemplo más puro de la obra de Félix Candela es el Restaurante “Los Manantiales” en Xochimilco, México DF (1957-1958). Tiene planta octogonal, formada por la intersección de cuatro *hypars*, a partir de un proyecto de los arquitectos Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez (v. foto inferior izquierda). La foto derecha de la página siguiente recoge su geometría en alzado, en planta y en escorzo.



El cascarón tiene un diámetro máximo de 42,70 m, con los apoyos inscritos en un cuadrado de 30 m de lado. La altura en el centro de la construcción es de 5,84 m, mientras que los vértices perimetrales se sitúan a 9,93 m. En el mismo, como en la mayoría de sus obras, Candela no utiliza vigas de borde, por lo que se mantiene un espesor constante de 4 cm en toda la lámina. La fotografía inferior izquierda permite apreciar que la geometría está proyectada para conducir las aguas de lluvia hacia los vértices.

La fotografía de la derecha muestra el interior del restaurante. De sus cerramientos acristalados y del espesor de la membrana, es posible deducir la subordinación del modelo a climas cálidos y con escasas oscilaciones de temperatura.



Desde su construcción, el cascarón ha soportado, aparentemente sin daño alguno, diversos seísmos, algunos de ellos de grado superior a 7,5 en la escala de Richter, como el de septiembre de 1985.

Del análisis de los trabajos precedentes, cabe concluir que, si bien la capacidad de las láminas para cubrir grandes luces se ha visto superada por otras técnicas constructivas, su belleza intrínseca perdura como geometría estructural asociada al arte.

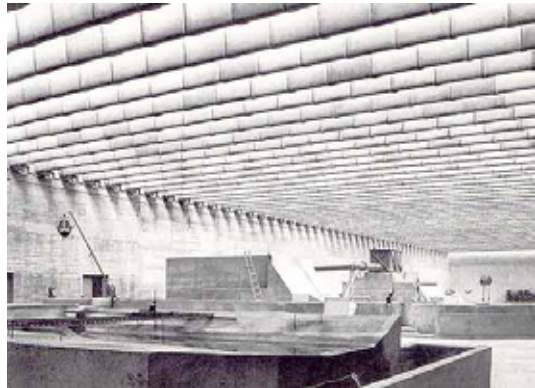
Las aportaciones de Miguel Fisac

Miguel Fisac Serna (1913-2006) obtuvo el título de arquitecto en 1942 en la Escuela de Arquitectura de Madrid. Creó estructuras de hormigón postensado, mediante un sistema de dovelas que, por su ligereza y su capacidad orgánica para desarrollar diversas funciones, denominó “vigas hueso”.

Con la repetición de un solo elemento modular, salvaba grandes luces, controlaba la luz cenital y evacuaba las aguas pluviales. El postesado se realizaba mediante el procedimiento patentado por el ingeniero civil Ricardo de Barredo.

Su trabajo más representativo en la aplicación de los “huesos” es el Centro de Estudios Hidrográficos de Madrid (1960). La fotografía inferior izquierda muestra al propio Fisac junto a los módulos con los cuales se formaron las vigas de la cubierta de dicho edificio. La fotografía de la derecha corresponde a una panorámica del interior de la nave con disposición de luz natural.

Para su funcionamiento correcto, el sistema necesitaba que las piezas, en especial las juntas entre elementos, estuviesen resueltas con una precisión que la industria de los prefabricados de hormigón de los años sesenta no podía ofrecer. Ello ocasionó la corrosión de las armaduras y filtraciones de agua.



Bajo el mismo principio de realizar piezas huecas, pero en este caso continuas, desarrolló vigas pretensadas para grandes luces, empleando los sistemas de Peiró SA. Los espesores de dichas piezas oscilan entre los 2 y los 3 cm para luces de hasta 20 m. La fotografía siguiente izquierda permite apreciar con detalle uno de estos modelos de viga; la de la derecha corresponde a su aplicación en los laboratorios Jorba de Madrid, obra realizada en 1965.

A lo largo de los once años comprendidos entre 1958 y 1969, diseñó más de una docena de piezas diferentes, nueve de las cuales fueron puestas en práctica, mientras que otras no pasaron de la fase experimental y las restantes fueron proyectadas pero no utilizadas.



En 1974, cerraron sus fábricas Barrero y Peiró al no resultar competitivos sus productos frente a otras piezas prefabricadas monolíticas, más simples y económicas, elaboradas con hormigón pretensado.

A partir de entonces, aplicó su capacidad de experimentación con nuevos materiales a la realización de encofrados flexibles, utilizando para ello materiales plásticos.

Puede concluirse que, si bien Fisac no acertó el camino, su andadura dejó huella y ayudó a otros a discurrir por nuevas sendas.

El Palazzetto dello Sport de Roma

Como parte de las infraestructuras para la Olimpiada de 1960, durante los años 1956 y 1957 Pier Luigi Nervi (1891-1979) y Annibale Vitelozzi (1906-1990) realizan el Palazzetto dello Sport de Roma (v. fotografía inferior izquierda), con capacidad para 5.000 personas. Las premisas de partida fueron la economía, la rapidez de ejecución y la eficiencia.

La planta, de forma circular, mide 78 m de diámetro y 21 m de altura. La superficie cubierta es de 4.476 m².



La cúpula está formada por un casquete esférico, de 69,20 m de diámetro y 12 cm de espesor. Está compuesta por 1.620 casetones prefabricados de hormigón armado de 2,5 cm de grueso, en forma de rombo, cuya dimensión es decreciente en cada uno de los nueve anillos que confluyen en la zona central, rematada



por una linterna. No en vano, Pier Luigi Nervi fue uno de los impulsores de la construcción prefabricada en hormigón armado.

La fotografía de la página anterior derecha muestra una fase de su construcción en la cual pueden apreciarse los elementos en detalle.

Los casetones, dispuestos sobre un encofrado continuo, permitieron el moldeado *in situ* de las nervaduras de hormigón armado de la cúpula. Estas quedan aparentes en el interior del recinto y ofrecen un interesante efecto estético a través del contraste de luces y sombras producido por sus volúmenes (v. fotografías inferiores).



El peso de la cúpula está soportado por 36 pilares inclinados en forma de Y, que descansan sobre un cimiento anular de hormigón armado de 81,50 m de diámetro y 2,50 m de anchura. El perímetro de la cúpula se alabea, de forma festoneada, con objeto de incrementar su rigidez en las zonas de apoyo.

La funcionalidad y la belleza del Palazzetto de Roma son incuestionables, así como su artesanidad y el coste elevado de las cimbras, utilizadas para una sola ocasión. Por ello, las láminas y las cúpulas de hormigón, en aras de la economía y la sostenibilidad, han cedido paso a modelos estructurales de ejecución más simple e igualmente fiables.

El Palacio de Congresos Benjamin Franklin de Berlín

Los arquitectos Hugh A. Stubbins (1912-2006), Werner Düttmann (1921-1983) y Franz Mocken y el ingeniero Fred Severud (1899-1990) realizaron, en 1957, el Palacio de Congresos Benjamin Franklin de Berlín.

Debido a su peculiar forma, el edificio es conocido popularmente con el nombre de Schwangere Auster ("La Ostra Preñada").

El palacio está formado por una planta baja en la cual se concentran las salas auxiliares y los servicios. Esta actúa a modo de basamento de la estructura del espectacular auditorio, situado en la planta superior, que singulariza el edificio.



La cubierta del auditorio, de hormigón postensado, adopta la forma de un paraboloide hiperbólico. Está suspendida de dos arcos convergentes, de 80 m de luz, apoyados en solo dos puntos, mediante ménsulas inclinadas. La altura del vértice de la cubierta se sitúa a 22,30 m con respecto al plano de acceso, mientras que los arcos de apoyo se alzan hasta los 27,60 m (v. fotografías inferiores).



La justificación de las razones que llevaron a realizar una estructura tan singular se fundamenta en que el Palacio fue construido como acto propagandístico de los Estados Unidos durante la época de la "guerra fría," con motivo de la celebración de la feria de construcción Interbau. En este caso, la funcionalidad y la racionalidad constructiva cedieron ante la exposición de las capacidades tecnológicas del país que financiaba su construcción.

Pier Luigi Nervi criticó duramente esta cubierta en un artículo publicado en la revista *Casabella*, con el argumento de que "una cubierta apoyada en dos puntos es estáticamente absurda, por lo que hacer manipulaciones constructivas se vuelve esencial".

La cubierta de la sala colapsó en 1980 (v. fotografía inferior izquierda), no por defecto de cálculo sino por una construcción deficiente que provocó la corrosión de los tendones de acero. El edificio fue reabierto en 1987 y desde 1989 es la sede de Casa de las Culturas del Mundo.

La fotografía inferior derecha muestra el interior de la gran sala, donde puede apreciarse la forma del paraboloide hiperbólico de la cubierta. En la actualidad, la Schwangere Auster es un símbolo más de Berlín.





La catedral de Brasilia

La catedral de Brasilia, cuyo nombre completo es el de Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, es obra del arquitecto Oscar Niemeyer (1907-2012).

Fue iniciada el doce de septiembre de 1958 y terminada el 31 de mayo de 1970. Es de planta circular, tiene un diámetro exterior de 70 m y una luz interior de 60 m. Puede albergar hasta 4.000 personas.

Desde el punto de vista de la tecnología del hormigón, por sus dimensiones, no se trata de un edificio "grande". Su reconocimiento mundial como edificio significativo se debe a su carácter simbólico y a su singularidad. Fue declarado Patrimonio de la Humanidad en 1987.

Su estructura principal se compone de 16 pilares de hormigón armado, de 40 m de altura, de perfil hiperbólico, con un peso de 90 t cada uno. Simboliza dos manos en oración. Es destacable la gran luminosidad interior del templo, puesto que los espacios entre los soportes se resuelven mediante vitrales.

La fotografía inferior izquierda muestra el estado de la construcción en 1959; la de la derecha, tomada en 1964, permite apreciar la estructura de hormigón terminada sin los cerramientos de cristal.



La fotografía inferior izquierda muestra el edificio en la actualidad; la de la derecha, el interior, extraordinariamente luminoso, donde la estructura aparece como un ligero soporte de los lucernarios.





El Centre des Nouvelles Industries et Technologies (CNIT) de París

El Centre des Nouvelles Industries et Technologies, más conocido por sus siglas CNIT, se construyó entre 1956 y 1958 como gran centro de exposiciones para la industria y como demostración de las posibilidades técnicas del hormigón armado. En su momento, fue uno de los primeros edificios del nuevo barrio de La Défense de París.

Su puesta en escena, salvando las distancias, siguió la línea de los hitos de la arquitectura del hierro de las exposiciones universales de finales del siglo XIX. Sin embargo, como ha sucedido tantas veces en la historia de la construcción, cuando se ha conseguido el máximo dominio de una técnica y de un modelo estructural, este se abandona por la aparición de otros, más eficientes.

A finales de los cincuenta, las láminas de hormigón armado daban sus últimas boqueadas como alternativa eficiente para salvar grandes luces.

El CNIT adopta una planta de triángulo equilátero, formado por la intersección de tres semicilindros de perfil parabólico cuyo vértice se encuentra a 46 m de altura. Ocupa una superficie de 22.500 m².

La autoría corresponde al ingeniero francés Nicolas Esquillan (1902-1989). Constituyó, en su momento, el récord de luz, con 206 m de longitud de fachada y 238 m en las aristas. Continúa teniendo el récord de superficie apoyada sobre un solo soporte, 7.500 m².

La fotografía inferior izquierda muestra el contenedor enorme que resulta de la intersección de los tres semicilindros parabólicos. La fotografía de la derecha permite apreciar la gran plaza central y la disposición perimetral de las oficinas que alberga su interior.



Para optimizar la respuesta estructural del conjunto, aunando rigidez y ligereza, Esquillan recurrió a fragmentar cada una de las tres superficies cilíndricas en 18 bandas iguales, cuyo perfil es un sector circular. El encuentro entre bandas



configura nervaduras por la cara interior y aristas, por la exterior. Las aristas de encuentro entre los distintos sectores conforman sendas nervaduras, igualmente visibles desde el interior.

En 1988, el CNIT fue remodelado y ampliado, de modo que la superficie construida inicial de 100.000 m² pasó a ser de 200.000 m². Ello indica el potencial enorme del edificio, que no había sido aprovechado inicialmente. Fue renovado de nuevo en 2009.

Puede concluirse que incluso planteamientos estructurales impecables dejan de ser competitivos por la aparición de nuevos materiales, nuevos conceptos y nuevas necesidades.

3.7. La madera laminada encolada y sus aplicaciones estructurales en grandes luces

3.7.1. Introducción

Este apartado, relativo a la madera laminada encolada aplicada a la resolución de grandes luces, trata de los aspectos siguientes:

- Los precursores de la madera laminada encolada: Leonardo Da Vinci, Philibert de l'Orme, Armand-Rose Émy y Otto Hetzer
- La descripción de sus materiales y elementos constitutivos
- Aspectos normativos
- Exposición de ejemplos constructivos

3.7.2. Los precursores de la madera laminada encolada

La consecución de la madera laminada encolada constituye un capítulo más del ingenio y de la inventiva aplicada a resolver los problemas constructivos generados por la necesidad de salvar grandes luces.

Al mismo tiempo, la madera laminada encolada, al evitar la masividad, reduce el coste y el impacto ambiental con respecto a otras soluciones de carácter más convencional. En el largo camino hacia su plena consecución, destacan los nombres de Leonardo Da Vinci, Philibert de l'Orme, Armand-Rose Émy y Otto Hetzer.

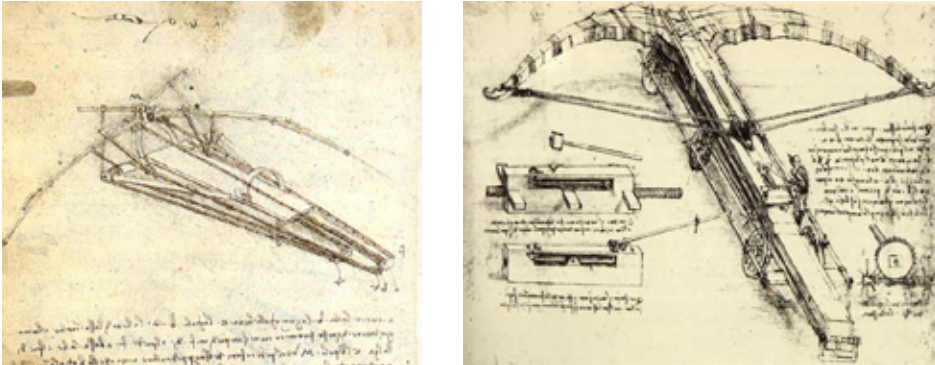
Leonardo Da Vinci

Como en tantos otros aspectos del arte y de la ciencia, Leonardo Da Vinci (1452-1519) fue precursor del concepto y de la necesidad de disponer de un nuevo material, que acabó materializándose en lo que hoy conocemos como madera laminada encolada.



Leonardo se avanzaba a su tiempo y era capaz de dibujar aquello que “debería ser”, yendo incluso más allá de las posibilidades reales de lo que “podía ser” en su época.

En sus esbozos de máquinas militares, dibujó láminas de madera unidas mediante cuerdas y herrajes metálicos. A título de ejemplo, las fotografías siguientes corresponden a los esbozos para una máquina voladora y para una ballesta gigante.



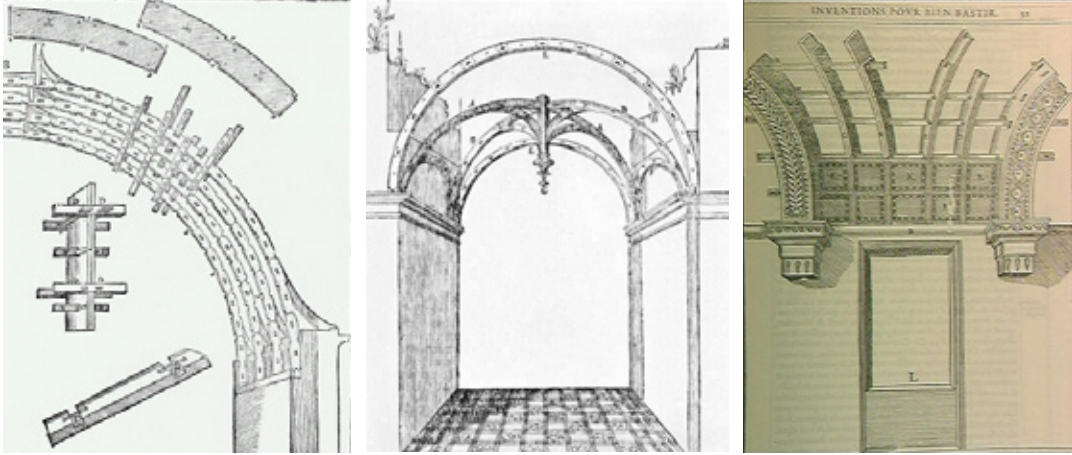
Curiosamente, el desarrollo de la aviación a principios del siglo xx, que convirtió en realidad las máquinas voladoras “pre-vistas” por Leonardo, contribuyó decisivamente al desarrollo de adhesivos estructurales que fueron la base de la madera laminada encolada; así, hacia 1930 aparecen las colas de urea-formol y las de resorcina, diez años más tarde.

Philibert de l’Orme

El arquitecto francés Philibert de l’Orme (1510-1570) fue uno de los grandes maestros del Renacimiento de su país, como lo acredita su trayectoria al servicio de la monarquía a lo largo de tres reinados.

En primer lugar, estuvo al servicio del rey Francisco I (1494-1547), que le nombró su arquitecto en 1545. En 1548, Enrique II (1519-1559) le nombró superintendente de edificaciones e intervino en el Castillo Real de Fontainebleau y en el Château Neuf de Saint-Germain-en-Laye. Por último, Carlos IX (1550-1574) le encargó, en 1564, la construcción del Palacio de las Tullerías en París.

Se caracterizó, además, por su humanismo militante, sus estudios sobre la Antigüedad y la defensa de la tradición francesa por encima de las tendencias italianas. A lo largo de su vida, mostró independencia y originalidad; buena prueba de ello son las cerchas para tejados llamadas “à la Philibert de l’Orme”, que desarrolló en el libro X de *Le premier tome de l’architecture*, publicado en 1567 del cual, como ejemplo, se acompañan los tres dibujos siguientes.



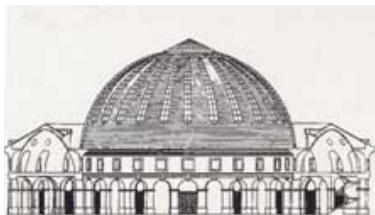
Dichas cerchas se basaban en el principio de utilizar, asociadas formando arco, tablas de madera de dimensiones reducidas. Con ello, conseguía secciones casi totalmente comprimidas, extrayendo así el máximo rendimiento de la capacidad resistente de la madera. Esta técnica la puso en práctica, por primera vez, en 1548 en el Castillo de La Muette.

En la época de Philibert de l'Orme, no se disponía de colas fiables para fines estructurales, y las grandes escuadrías de madera escaseaban a causa de la presión a que estaban sometidos los bosques en una sociedad creciente y muy dependiente de la madera para la construcción naval y terrestre.

Para unir las tablas, diseñó un sistema de perforaciones en ellas para que pudieran ser enlazadas mediante pasadores, también de madera, y estabilizadas mediante cuñas. El sistema de unión descrito permitía salvar, de forma económica y ligera, la luz de un edificio (el promedio de sus realizaciones se sitúa en los 15 m) sin entorpecer con tirantes el espacio inferior resultante bajo cubierta. De este modo, se podía aprovechar completamente el desván.

Según indican algunos autores, quizá por su "excesiva" eficiencia y economía, después de la muerte de su inventor sus técnicas fueron prácticamente olvidadas y fueron muy escasas las cubiertas así construidas entre los siglos XVI y XVIII. Con todo, se tiene constancia de la aplicación de su técnica constructiva al otro lado del Atlántico, por la difusión de sus tratados de la mano de los jesuitas; es el caso de diversas actuaciones en el Perú y de la iglesia de la Compañía de Jesús de la ciudad de Córdoba (Argentina), en los siglos XVII-XVIII.

Con los procedimientos de l'Orme, se realizaron construcciones de luces muy superiores a las ensayadas por él. Tal es caso de la desaparecida *Halle aux Blés* de París (su lugar fue ocupado por la Bolsa de Comercio). Su patio central, de 39 m de diámetro, fue cubierto siguiendo sus preceptos.

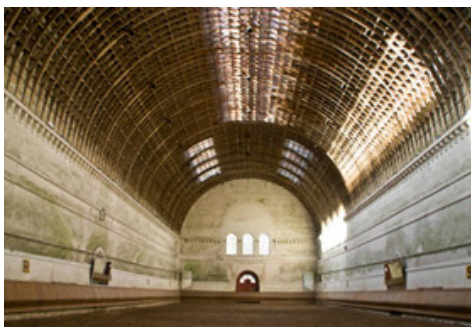


Fue construido entre 1763 y 1769 por Nicolas Le Camus de Mézières (1721-1789), Jacques-Guillaume Legrand (1743-1808) y Jacques Molinos (1743-1831) .

A principios del siglo XIX, volvieron a cobrar interés los trabajos de Philibert de l'Orme por la preponderancia que tenía la caballería, en aquellos momentos, en los ejércitos y la necesidad de entrenar los caballos en cualquier condición atmosférica. Para ello, eran precisas salas de gran luz con cubiertas realizadas de forma económica. Ello supuso el redescubrimiento de Philibert de l'Orme, gracias al Joseph Chalgrin en 1799 y al general G. Detournelle que, en su breve publicación de 1800, puso al día y difundió sus trabajos. Dicha forma de construir cubiertas fue vigente hasta principios del siglo xx, en especial en el valle del río Lot.

La fotografía inferior izquierda corresponde a la sala de equitación Sénarmom, en Fontainebleau realizada por Detournelle, con una luz de 22 m. La de la derecha corresponde al extradós de la bóveda encamionada de la iglesia de la Compañía de Jesús de Córdoba (Argentina).

La observación de los grabados de Philibert de l'Orme y su comparación con los despieces de la iglesia de los jesuitas de Córdoba muestran una coincidencia total. Ello pone de manifiesto tanto la bondad del método constructivo como la precisión en la exposición gráfica del mismo por parte de su autor.



Armand-Rose Émy (1771-1851)

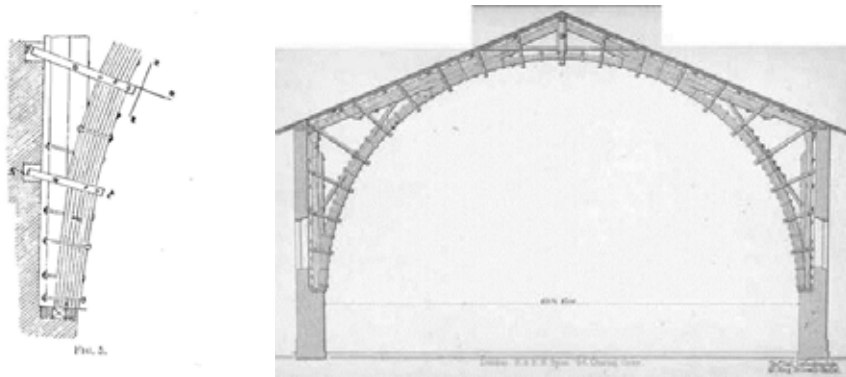
También conocido como coronel Émy, fue ingeniero militar y director de fortificaciones de Bayona. En 1823, publicó en París un breve trabajo denominado *Description d'un nouveau système d'arcs pour les grandes charpentes* y, posteriormente, el *Traité de l'art de charpenterie*, publicado en Lieja entre 1841 y 1847.



Seguidor de las ideas de Philibert de l'Orme, Émy mejoró las prestaciones de sus cubiertas asociando láminas de madera, colocadas de plano con sus caras paralelas, mediante bridas metálicas y bulones.

Cabe recordar que Philibert de l'Orme colocaba sus tablas de canto siguiendo la tradición de la construcción naval. De su observación, extrajo una parte de sus ideas y planteamientos para aplicarlos a la construcción de cubiertas, resueltos a modo del casco de un barco invertido.

La fotografía inferior izquierda muestra el detalle del arranque de uno de los arcos, en un dibujo del propio Émy. Como se ha indicado, la disposición de las láminas en los arcos es similar a la madera laminada encolada. Simplemente, la carencia de cola es suplida mediante uniones metálicas. La fotografía de la derecha corresponde a una sección del hangar del cuartel de Marac, cerca de Bayona, de 20 m de luz y 60 m de longitud.



La fotografía inferior izquierda, tomada en 1960, muestra el interior de dicho hangar poco antes de desaparecer. La fotografía de la derecha corresponde a la estación de ferrocarril de Dieppe, inaugurada en 1848, que todavía conserva la cubierta realizada según las directrices del coronel Émy.





Karl Friedrich Otto Hetzer (1846-1911)

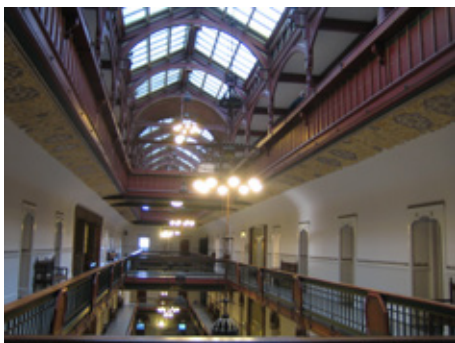
La madera laminada encolada, tal como la conocemos en la actualidad, empezó a experimentarse en 1901 de la mano de Otto Hetzer y sus hijos, Kart Paul, Walter Ernst y Otto Alfred, en su empresa Otto Hetzer AG. Ello permitió patentar su procedimiento de fabricación en 1906. Entre 1891 y 1910, Hetzer patentó otros nueve inventos, relacionados con la madera laminada encolada para uso estructural.



Hetzer dio a conocer en Europa la llamada “estructura Hetzer”; especialmente desde que en la Exposición Mundial de Bruselas de 1910 obtuviera dos premios (v. fotografía superior izquierda). La fotografía superior derecha permite apreciar las placas de unión entre las distintas piezas de sección en “H” características de este tipo de estructura.

En 1920, se contaban más de 200 edificios realizados con madera laminada encolada. En su catálogo de 1922, Hetzer incluía una relación de países donde se había ensayado este método: Alemania, Austria, Hungría, Bélgica, Checoslovaquia, Dinamarca, España, Inglaterra, Finlandia, Francia, Holanda, Italia, Noruega, Suecia y Suiza.

Los elementos estructurales desarrollados por Hetzer estaban formados por tablas, de directriz recta o curva, pegadas entre sí mediante un adhesivo formado por caseína y cal pulverizada (la conocida “cola blanca de carpintero”).





Las dos fotografías anteriores corresponden a una galería interior de distribución del Ayuntamiento de Copenhague, inaugurado en 1905, obra del arquitecto Martin Nyrop (1849-1921). Puede apreciarse la perfecta conservación de los arcos realizados con madera laminada encolada, técnica constructiva poco experimentada en la época.

Las dos fotografías inferiores corresponden a la Estación Central del ferrocarril de Copenhague, obra del arquitecto Heinrich Emil Charles Wenck (1851-1936). Fue construida en 1911, y conserva en servicio y en perfecto estado las estructuras de madera laminada según el modelo desarrollado por Hetzer.



Corresponde a Max Hanisch, arquitecto e ingeniero antiguo socio de Hetzer, que emigró a los Estados Unidos en 1923, la difusión de las construcciones estructurales en madera laminada encolada en dicho país.

Cuando en 1934, al frente de la empresa familiar Unit Structures, Hanisch propuso por primera vez el empleo de arcos de madera laminada encolada, fue ridiculizado. Solo la evidencia de los resultados comparativos con respecto al acero y el hecho de haber realizado un gimnasio de 19,50 m de luz propiciaron que en 1936 se construyera con arcos de madera un edificio público para la comunidad de Pittsville, proyectado por el arquitecto Edgar A. Stubenrauch (1894-1988).

A partir de este punto, el desarrollo de las estructuras de madera laminada encolada fue imparable en los Estados Unidos. En 1938, Unit Structures fabricó arcos que salvaban una luz de 36,50 m.

El desarrollo de la aviación propició la construcción de hangares cada vez mayores. En 1941, Hanisch construyó un hangar con una luz de 46,30 m y una altura de 10,60 m, cuya hegemonía se vio muy pronto superada.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se produjo el asentamiento definitivo de la industria de la madera laminada encolada, puesto que ahorraba una ingente cantidad de acero. En abril de 1952, los fabricantes de madera aserrada y laminada encolada unieron sus fuerzas para crear el American Institute of Timber Construction (AITC).



Cabe concluir que la madera laminada encolada, tal como la conocemos en la actualidad, como material fiable, estético y de bajo impacto ambiental, fue una necesidad histórica de la construcción, no bien resuelta durante siglos. Buena prueba de ello se encuentra en los antecedentes del material a los cuales se ha hecho referencia.

Puede concluirse, asimismo, que la madera laminada encolada es un material nacido de y para la construcción tecnológica, puesto que su desarrollo y su aplicación a gran escala se producen a partir de los años cincuenta, en paralelo al desarrollo de colas y protectores, gracias a la eclosión de la industria química de base orgánica.

3.7.3. El concepto actual de madera laminada encolada

Diversas son las definiciones que pueden encontrarse en la bibliografía técnica acerca de la madera laminada encolada. La norma francesa CB 71 detalla: “Se llama *madera laminada encolada* las piezas macizas reconstituidas a partir de láminas de madera, de dimensiones relativamente reducidas con relación a las de la pieza, ensambladas por encolado. Las láminas se disponen de modo que todas sus líneas sean paralelas.” La definición resulta más precisa si se añaden los conceptos siguientes:

- El espesor de las láminas oscila habitualmente entre 20 y 45 mm, aunque son frecuentes espesores de 38 mm.
- El número de láminas es, en general y para cada pieza, igual o superior a 4.

Con la aparición del CTE, la madera laminada encolada se ha convertido en un material estructural más en la construcción, con parámetros de cálculo fiables, amparado por unas normas de fabricación precisas y por estrictos controles de calidad.

Mediante la madera laminada encolada, ha sido posible superar una amplia serie de limitaciones propias de la madera natural. Entre ellas:

- Limitación de escuadrías
- Limitación de luces
- Dificultad en la resolución de las uniones estructurales
- Capacidad de abordar todo tipo de sistemas estructurales, desde simples pórticos a cúpulas o mallas especiales
- Ataques de insectos y hongos xilófagos
- Degradación por exposición a la intemperie



La construcción estructural realizada con madera laminada encolada presenta una serie de características que la convierten en un material altamente competitivo para resolver luces de entre 30 y 70 m. Aunque su límite mecánico es muy superior, pierde puntos frente a otras opciones, como las mallas espaciales.

Las características más destacables de la madera laminada encolada son las siguientes:

- Se trata de un material renovable y de bajo impacto ambiental.
- Es duradera.
- Tiene estabilidad estructural frente al fuego. La madera no experimenta dilataciones y el proceso de carbonización protege y aísla el interior de la sección resistente.
- Es resistente a los agentes químicos agresivos (ácidos y álcalis). Ello la hace especialmente indicada para estructuras de cubiertas para piscinas.
- Tiene un aspecto estético agradable.
- Su peso es reducido.
- Requiere poco mantenimiento.

3.7.4. Materiales y elementos que conforman una pieza estructural de madera laminada encolada

Los materiales y los elementos que conforman un elemento estructural de madera laminada encolada son:

- Madera seleccionada, trabajada en delgas de sección y longitud adecuadas al fin propuesto
- Adhesivo apropiado para el uso y la situación de la estructura proyectada
- Protectores de la madera
- Herrajes de unión
- Elementos de fijación

En los apartados siguientes, se exponen los aspectos más sustantivos de cada uno de ellos.



Las maderas empleadas

Habitualmente, se utilizan maderas procedentes de coníferas, aunque también pueden emplearse las especies frondosas. Las especies más habituales de uso común en nuestro país son: abeto, pino silvestre, *Pinus insignis* y pino gallego.

Para formar una pieza de madera laminada encolada, debe partirse de tablas o delgas. Las dimensiones de tabla más usuales en Europa son:

- Anchos de 100, 125, 150, 175, 200 y 225 mm
- Gruesos de 25, 38 y 50 mm
- Las longitudes habituales de las tablas oscilan entre los 250 y los 500 cm

Las dimensiones indicadas son en bruto. Corresponden al corte de sierra. Es preciso rebajar las caras para disponer de superficies planas que garanticen un buen encolado. A título de ejemplo, una tabla de 25 mm puede encolarse con un grueso que oscile entre los 19 y los 22 mm; las tablas de 38 mm se encolarán con un grueso comprendido entre los 32 y los 35 mm, y las de 50 mm, entre los 42 y los 45 mm.

En relación con las mermas en el ancho de las tablas, al planearse la pieza se pierden entre 10 y 20 mm. Ello supone que, de tablas de 100 mm, se acaban obteniendo piezas de unos 85 mm de media.

Adhesivos estructurales

Su función es enlazar las tablas o delgas para conformar secciones de las dimensiones deseadas. En la actualidad, los adhesivos más empleados son los elaborados sobre bases de resorcina, por su resistencia a la humedad y buen comportamiento al fuego. Pueden utilizarse en interiores y en exteriores.

El uso de adhesivos a base de urea está limitado a los interiores, al igual que los adhesivos de acetato.

La aplicación de los adhesivos se realiza, en las instalaciones modernas, de forma mecánica. Sus consumos oscilan entre los 300 y los 600 g de producto por metro cuadrado.

Protectores

Los protectores de la madera conforman una amplia gama de productos que pueden analizarse bajo diversos aspectos: según su función, el tipo del vehículo de aplicación, el tipo de protección que se desea alcanzar y la profundidad del tratamiento.



De acuerdo con su función, los productos protectores de la madera son:

- **Insecticidas.** Basados en productos orgánicos, como las piretrinas o los carbamatos, potenciados por el efecto sinérgico del butóxido de piperonilo.
- **Fungicidas.** Los fungicidas pueden destinarse a combatir los hongos de pudrición o los que producen azulado. Para los primeros, se emplean productos con contenidos de cromo, cobre y arsénico (CCA); cobre, azoles orgánicos (CA); cobres, azoles orgánicos y boro (CAB); cobre y amonios cuaternarios (ACQ), y boro. Los productos más comunes para evitar el azulado son el tribromofenato de sodio, los quinolatos de cobre y las carbendazimas.
- **Ignifugantes.** Los ignifugantes responden a dos líneas de actuación: los que impiden que llegue oxígeno a la madera durante algunos minutos y los que basan su acción ignífuga en que reaccionan con el calor, emitiendo sustancias que acaparan el oxígeno del aire, lo cual impide que la madera se queme.
- **Protectores de rayos ultravioleta.** Los rayos ultravioleta producen el grisado de la madera no protegida y la deterioran. Para que el fenómeno no se produzca, es preciso crear sobre la madera una pantalla mediante la aplicación de pinturas con pigmentos metálicos.
- **El vehículo de aplicación.** Los protectores de la madera se aplican a través de tres vehículos en los cuales se disuelven: orgánicos, hidrosolubles y creosotados.

Cada vía tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Los más universales son los orgánicos, por su facilidad de penetración en la madera. Los hidrosolubles están asociados a las protecciones realizadas en factoría sobre maderas nuevas. Los creosotados, si bien ofrecen una larga protección, tienen como contrapartida su deficiente acabado superficial, su olor y el hecho de que manchan.

- **Tipo de protección y profundidad que se desea alcanzar.** Los protectores de la madera se pueden aplicar con carácter preventivo, antes de que el ataque se produzca, o con carácter curativo, cuando los agentes destructores ya han iniciado su ataque.

La eficiencia temporal de las protecciones está asociada a la posibilidad de proteger por completo las piezas de madera. La madera nueva puede ser tratada al vacío en autoclave, lo cual no puede realizarse sobre una madera incorporada a una construcción.

En el primer caso, la protección es profunda, impregna prácticamente todo el volumen de la madera y dura decenas de años. En el segundo,



el tratamiento es superficial y protege profundidades de milímetros. Se efectúa mediante la aplicación de pinturas y barnices. Este tipo de protección ha de renovarse periódicamente en períodos de tiempo inferiores a los cinco años.

Según lo expuesto, la madera laminada encolada recibe un tratamiento en origen que consiste en su desaviado al vacío en autoclave. Con ello, se eliminan los nutrientes y, por tanto, la posibilidad de servir de soporte a hongos o a insectos. Una vez elaborada la pieza, es necesario decidir el tipo de acabado superficial más adecuado.

Herrajes

Aunque en muchos aspectos es un material excelente, la madera laminada encolada presenta déficits similares a la madera maciza para la resolución de nudos estructurales; por tanto, los herrajes son parte esencial de las estructuras de madera laminada encolada.

Los herrajes se caracterizan por su capacidad para absorber y transmitir las sollicitaciones de los puntos específicos de la estructura. A tal efecto, se realizan con acero galvanizado o inoxidable. Sin la presencia de herrajes, la capacidad resistente de los sistemas estructurales elaborados con madera laminada encolada se vería muy mermada.

Los herrajes tienen la misión de enlazar las diferentes barras que conforman una estructura para que estas cumplan su función resistente. El mercado ofrece un extenso catálogo de productos, tanto vistos como ocultos, para satisfacer un amplio abanico de uniones. Han de estar protegidos contra la corrosión mediante el galvanizado, o bien estar realizados en acero inoxidable. Comúnmente, los herrajes están elaborados con chapa plegada. Los más complejos incorporan también soldaduras.

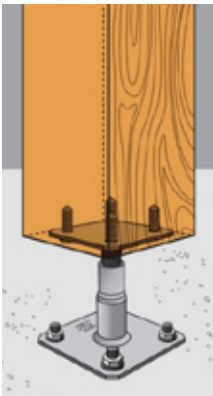
A título indicativo, se describen los herrajes más comunes y su aplicación:

- **Estribos.** Resuelven los apoyos de vigas y correas a la estructura de soporte (v. fotografía izquierda en la página siguiente).
- **Escuadras.** Permiten abordar los apoyos sobre hormigón, acero e incluso madera, para evitar el contacto directo y controlar eventuales desplazamientos (v. fotografía siguiente central).
- **Anclajes.** Habitualmente, se trata de herrajes terminales que permiten la continuidad de diversas piezas o son embebidos en hormigón fresco (v. fotografía siguiente derecha).

En primer plano, pueden apreciarse los herrajes de anclaje embebidos en la escuadría de madera laminada encolada. En la parte superior, se encuentran sendos estribos para recibir las correas.



- **Pies de pilares.** Su cometido, además de su función mecánica, es evitar el deterioro de la zona inferior de los pilares de madera laminada encolada por efecto continuado de los ciclos de humedad-secado. Este tipo de herraje mantiene la base del pilar separada entre 15 y 20 cm por encima del nivel del suelo (v. fotografía inferior izquierda).
- **Ensamblajes.** Su función es solidarizar, como si se tratase de una sola, diversas escuadrías de madera laminada encolada. Este tipo de anclaje está formado por una placa con púas, dispuestas a uno o a ambos lados de la misma, en función de su cometido. Se fijan a la madera mediante golpes de martillo o pernos (v. fotografía inferior derecha).



- **Nudos para mallas.** No es frecuente construir mallas espaciales con madera laminada encolada. Los sistemas de nudos comercializados al efecto se basan en la eficiencia de la unión del nudo (de tipo MERO) con las barras de madera laminada encolada. Dicha unión puede realizarse por medios exclusivamente mecánicos, por tornillos, o bien utilizar sistemas mixtos de adhesivo y tornillos (v. foto izquierda de la página siguiente).



- **Piezas especiales.** Si bien su diseño es conocido, no figuran en catálogo por su especificidad, puesto que se diseñan para cada caso concreto. Destacan entre ellas las rótulas. Estos herrajes se disponen en la cumbre y en los apoyos de los arcos triarticulados (v. foto inferior derecha).



La fijación de los herrajes puede hacerse mediante clavos de sección recta o helicoidal, tornillos, pernios o bulones. Las uniones atornilladas, con pernios o con bulones, facilitan el desmontaje de las estructuras, de modo que determinadas estructuras realizadas con madera laminada encolada se pueden plantear para usos itinerantes.

3.7.5. Normativa básica sobre la madera laminada encolada

A título indicativo, se acompaña una relación de la normativa que regula la fabricación de la madera laminada encolada y sus aplicaciones en construcción:

- UNE EN 385. Madera estructural con empalmes de uniones dentadas. Requisitos de fabricación.
- UNE EN 386. Madera laminada encolada. Requisitos de fabricación. Especificaciones mínimas de fabricación.
- UNE EN 390. Madera laminada encolada. Tamaños. Tolerancias.
- UNE EN 1194. Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de valores característicos.
- UNE EN 14080. Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Requisitos.

La norma UNE EN distingue ocho clases de madera laminada encolada, cuatro de composición homogénea (sigla h) y cuatro de composición combinada (sigla c), en función de sus resistencias a flexión, de 24, 28, 32 y 36 N/mm². La clase



resistente más habitual es la 24 y le sigue la 28. En el mercado, es difícil encontrar las clases resistentes superiores.

3.7.6. Ejemplos

A continuación, se exponen las características técnicas de algunos ejemplos destacados de la construcción de grandes luces con madera laminada encolada. No se plantea como una cuestión de récords, sino de aplicación del material más adecuado para resolver unas necesidades concretas, de forma racional.

Los ejemplos escogidos, que se exponen por orden cronológico, son los siguientes:

- El Palacio de Ferias y Exposiciones de Aviñón
- El Oguni Dome de Kyushu (Japón)
- Las Arenas de Barcelona
- El Stade TELUS-Université Laval de Quebec (Canadá)

El Palacio de Ferias y Exposiciones de Aviñón

Fue realizado en 1984. La estructura de su cubierta está construida con madera laminada encolada y salva una luz máxima de 102 m. Es de planta cuadrada, con esquinas redondeadas (v. fotografía inferior izquierda). Está formada por 24 semiarcos dispuestos radialmente que, en conjunto, cubren luces que oscilan entre los 87,92 y los 102 m.

A modo de clave de bóveda en que confluyen los semiarcos, se encuentra un anillo circular de acero. Las correas entre los arcos están formadas por cerchas de madera laminada, que conforman el perfil plegado de la cubierta, cuya luz oscila entre los 2 y los 12 m (v. fotografía inferior derecha).

Una estructura secundaria en forma de cráter realza la coronación del tejado, situado a 20 m del suelo, y oculta parcialmente las 24 linternas que facilitan la iluminación cenital del interior (v. fotografía inferior).

La cubierta está diseñada para dar una respuesta correcta en cuanto al aislamiento térmico. Su estanqueidad está garantizada por una doble capa de elastómero termosoldado. También está calculada para soportar fuertes cargas de viento (el mistral afecta la zona), así como para dar respuesta a las cargas escénicas derivadas de los espectáculos que pueden realizarse en su interior.





El Oguni Dome de Kyushu (Japón)

Es un pabellón polideportivo doble (dos pistas), diseñado en 1988 por el arquitecto Hamura Shoei Yoh (1941), cuya cubierta está formada por una malla espacial de doble capa, de madera de cedro, de 2 m de canto.

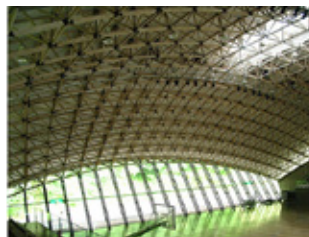
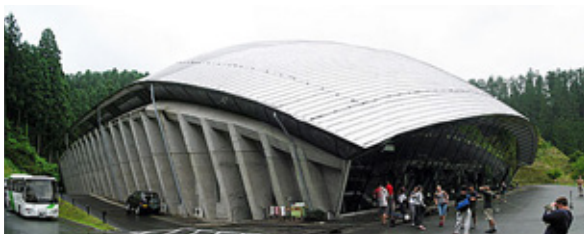
En conjunto, la cubierta tiene unas dimensiones de 63×47 m. Fue una de las primeras estructuras diseñadas con mallas de estas características después de que el Gobierno japonés aprobara sus cálculos por ordenador y las uniones metal-madera efectuadas mediante resinas epoxi.

Las barras son de madera maciza; las de la capa superior tienen una sección de 11×15 cm y las de la cara inferior, de 11×17 cm. Los refuerzos diagonales se resuelven con escuadrías de $9 \times 12,5$ cm.

La unión entre barras se realiza mediante conectores esféricos de acero de 42,70 mm de diámetro. A ellos está soldado un perno en cuya parte terminal se fija una pletina, que es la que se encaja en la madera. La unión entre la pletina y la madera se realiza mediante resina epoxi y pernos de 16 mm de diámetro.

El peso de la estructura no supera los 40 kg/m^2 . El acabado de la cubierta se efectúa mediante chapas nervadas de acero inoxidable.

La fotografía inferior izquierda muestra una imagen exterior del edificio; la de la derecha, una imagen de conjunto de la cubierta de doble curvatura, vista desde el interior.



La fotografía inferior izquierda corresponde a una imagen cenital de la cubierta; la de la derecha permite apreciar en detalle los nudos de la malla.



Las Arenas de Barcelona

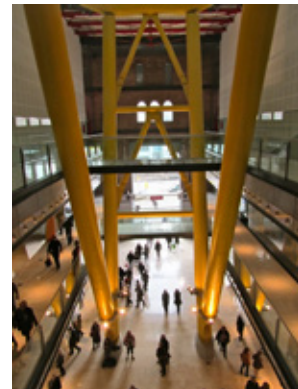
El nuevo centro comercial Arenas de Barcelona ocupa el espacio de la antigua plaza de toros de Las Arenas, obra del arquitecto August Font i Carreras (1846-1924), de la cual solo se conserva la fachada de estilo neomudéjar. Dicha fachada, cuyo peso es de 4.000 t, fue elevada cuatro metros para colocar el nivel interior de la plaza en correspondencia con el de la urbanización actual. La fotografía inferior derecha muestra el estado de la plaza antes de su remodelación; la de la derecha, una visión actual de la misma.



El proyecto de remodelación es de Richard Rogers (1933). Las obras, dirigidas por los arquitectos Luis Alonso y Sergi Balaguer, fueron iniciadas en 2003 y se prolongaron hasta mayo de 2011. Su interior, en cinco plantas, alberga una superficie construida sobre rasante de 31.000 m². Bajo rasante, la superficie construida es de 48.000 m² y está distribuida en cuatro niveles.

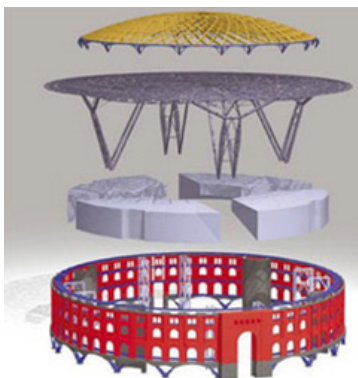
Destaca la cubierta del amplio espacio central. Está formada por un casquete esférico reticulado, de una sola capa. La retícula está formada por triángulos, tanto para adaptarse a la forma esférica como para conseguir una mayor rigidez.

Las uniones entre barras son ocultas, lo cual ofrece una imagen estética impecable de la estructura. Dichas uniones son de acero galvanizado. Están fijadas mediante pernos y pasadores (v. fotografía inferior izquierda).





La estructura está formada por cuatro grandes soportes dobles en “V”; realizados con tubos de acero arriostrados entre sí y asentados sobre rótulas (v. fotografía derecha de la página anterior y esquema inferior izquierdo). En su coronación, se encuentra la estructura de acero que conforma el aro de tracción que estabiliza los empujes generados por el casquete esférico (v. fotografía inferior derecha).



El arranque del casquete esférico está situado a 27 m de altura con respecto al nivel medio de las calles adyacentes. Salva una luz de 78 m de diámetro mediante siete círculos concéntricos y un entramado de costillas curvas cuyas barras son de madera laminada encolada. La superficie cubierta es de 4.775,90 m².

El proceso de montaje del entramado se realizó en seis fases, empezando por el círculo mayor hacia el interior, con objeto de garantizar la estabilidad del conjunto.

Los cantos de las vigas principales son variables entre 320 y 220 mm. Los espacios resultantes entre las vigas se cubren mediante tableros laminados, de espesor también variable en función de la dimensión del hueco. Los tableros más gruesos miden 45 mm. El peso de la estructura y del tablero de cerramiento es de 65 kg por metro cuadrado.

El Stade TELUS-Université Laval de Quebec (Canadá)

La cubierta de estructura de madera laminada encolada del Stade-TELUS cubre un terreno de juego de 60 × 100 m. Permite la práctica del deporte con independencia de las condiciones atmosféricas exteriores, que pueden llegar a ser muy extremas, como puede apreciarse en la fotografía inferior izquierda.

La fotografía inferior derecha muestra una fase de la impermeabilización de la cubierta mediante láminas elastoméricas. También puede observarse su perfil, cuyo diseño provocó, al poco de ser inaugurado, una peligrosa avalancha causada por la nieve acumulada.



El estadio fue inaugurado a principios de 2012. Los trabajos de construcción se habían desarrollado a lo largo de un año y medio. Su cubierta está resuelta mediante trece arcos de sección variable, apoyados sobre rótulas (v. fotografías inferior izquierda y central, respectivamente). La fotografía inferior derecha permite apreciar las triangulaciones de las correas para rigidizar el conjunto.



3.7.7. Conclusiones finales sobre la madera laminada encolada

Tras el análisis realizado en los apartados anteriores, se concluye que la madera laminada encolada es un material estructural representativo de los valores de la construcción tecnológica para salvar grandes luces, por los motivos siguientes:

- Su dependencia del desarrollo de las colas y de los protectores de la madera, derivado de la eclosión de la química orgánica.
- Su cotidianidad a partir de los años cincuenta.
- Su bajo impacto ambiental.
- Su durabilidad.
- Su fiabilidad, contrastada a través de ensayos y de sellos de garantía.



- Su bajo mantenimiento.
- La amplia disponibilidad de herrajes y accesorios, que permiten resolver todo tipo de encuentros, tanto entre piezas del mismo material como con hormigón o con acero.
- Su plasticidad: puede adoptar formas rectas, en arco o dobles curvaturas con el fin de adaptarse a cualquier diseño.
- Su versatilidad, que permite el trabajo mecánico a tracción, a compresión y a cortante. Ello posibilita realizar mallas espaciales con barras de madera laminada encolada, unida a nudos de acero.
- La forma como se ha podido calcular. A diferencia de otros materiales, como el hierro o el hormigón, que en sus primeros tiempos tuvieron que ser sometidos a récords para "demostrar" sus capacidades a los profesionales y al gran público, puede decirse que el cálculo de la madera laminada está asociado a la existencia de programas de ordenador.

Ello redundará en favor de la racionalidad con respecto a la elección más idónea del tipo estructural, del material más apropiado y del sistema constructivo idóneo para llevarlo a cabo, puesto que no es necesario demostrar físicamente nada.

Las verificaciones numéricas son suficientemente precisas para indicar que no todo lo que es posible construir de un determinado modo deba construirse efectivamente. Siempre han de valorarse alternativas y escoger, entre ellas, la de mayor eficiencia global.

→ 4



La construcción, aplicada a la edificación en altura

4.1. Introducción

Construir edificios extraordinariamente altos, al igual que salvar grandes luces, volar o conquistar las profundidades marinas, es una de las grandes inquietudes de la especie humana. Es evidente que las inquietudes impulsan los avances, motivados por una constante insatisfacción con respecto a los logros conseguidos.

La insatisfacción está indisolublemente unida a la capacidad de superación. En el ámbito de la construcción, el análisis de su historia muestra que los deseos casi siempre han quedado por debajo de las necesidades.

Un ejemplo de un deseo constructivo ambicioso, surgido del orgullo de la especie humana y jamás alcanzado, es el que narra el libro del Génesis (Gn 11:1-9): la torre de Babel.

En él se explica la construcción de una torre cuya cúspide tenía que llegar al cielo, para cuya realización se contaba con ladrillos unidos mediante betún. El





resultado final es bien conocido: se abandonaron los trabajos por el descontrol que había provocado la confusión de lenguajes por parte de Yahveh. Por ello, en todas sus hipotéticas representaciones, la torre aparece inacabada, como se muestra en las fotos anteriores.

Es evidente que ni la tecnología de la época ni la actual permiten alcanzar el objetivo propuesto. En la actualidad, los planteamientos constructivos han quedado reducidos a ámbitos físicos muy concretos, y han dejado a otras disciplinas el estudio y la conquista del espacio.

Históricamente, la razón última por la cual los deseos quedan por debajo de la ambición e incluso, en algunos casos, de la satisfacción de las necesidades más primarias se explica por las limitaciones seculares a la disponibilidad de la energía necesaria para crear nuevos materiales o para movilizar las grandes masas que se requieren para edificar en altura.

El primer gran salto cualitativo que permite desarrollar las construcciones en altura se produce en las postrimerías del siglo XIX, con la aplicación de máquinas de vapor a la construcción; posteriormente, motores de explosión y, finalmente, motores eléctricos. De este modo, se han simplificado y abaratado las operaciones de transporte de los materiales y su puesta en obra. Ello ha permitido aumentar el tamaño y la altura de los edificios.

La disposición de medios físicos es condición necesaria, pero no suficiente, para edificar en altura. Se requiere, además, la existencia de una organización social y económica que la reclame, la sustente y la defienda como la mejor opción, entre todas las posibles, para dar una respuesta adecuada a unos fines determinados.

A finales del siglo XIX, la electricidad era una fuente de energía prácticamente desconocida a la cual se estaban encontrando aplicaciones prácticas. En 1880, Thomas Alva Edison (1847-1931) había patentado la lámpara de incandescencia. Su presentación en la Exposición Universal de París de 1881 marcó el inicio de una segunda revolución industrial.

La electricidad ofrecía grandes expectativas, tanto porque podía sustituir el vapor para hacer funcionar los motores, como porque permitía disponer de iluminación artificial de una gran eficiencia. Sin embargo, en aquel tiempo se estaba librando una batalla entre los defensores de la corriente continua, representados por Edison, y la alterna, desarrollada a partir de las teorías de Nikola Tesla (1856-1943), que finalmente acabaron imponiéndose.

El espaldarazo definitivo a la electricidad como fuente de energía mecánica y lumínica se produjo durante la Exposición Universal de Chicago de 1893, cuya iluminación, mediante corriente alterna, fue adjudicada a George Westinghouse (1846-1914). Además, en dicho evento se habilitó un pabellón para mostrar los últimos avances técnicos de la electricidad.



Las dos fotografías siguientes muestran algunos aspectos generales de la composición realizada por el arquitecto paisajista Frederick Law Olmstead (1822-1903) y la firma Burnham & Root para la Exposición Universal de Chicago. En la misma, participaron cuarenta y seis países, diecinueve de ellos con pabellón propio. En una superficie de 2,4 km², se construyeron, con carácter temporal, unos doscientos nuevos edificios, en que el estilo neoclásico era predominante.



Incluso ante unas circunstancias sociales favorables, sin la disposición de las aplicaciones de la energía eléctrica con que se contó a partir de la última década del siglo XIX, la construcción en altura no se habría podido desarrollar con la celeridad, ni con los amplios logros que alcanzó en las décadas siguientes.

Las aplicaciones pacíficas de la energía atómica a partir de los años cincuenta del siglo pasado y uno de sus desarrollos asociados, la construcción tecnológica, son factores determinantes para edificar en altura, de forma plena y con un elevado nivel de prestaciones.

La disponibilidad prácticamente ilimitada de energía introduce una situación nunca vista en el ámbito de la construcción, en que por primera vez es posible acercar los deseos y las necesidades.

A lo largo de la historia anterior, al construir se pretendían cubrir determinadas necesidades. La construcción de "deseos" quedaba limitada a unos pocos edificios representativos, pues el potencial social y tecnológico de aquellas sociedades era, comparativamente, muy limitado. Ello garantizaba el empleo racional de los materiales y los recursos, en función de cada época.

La construcción tecnológica posibilita, por primera vez en la historia, construir "deseos" de todo tipo a un ritmo muy superior a las necesidades, de modo que puede llegar a superar las capacidades de regeneración del planeta. Sin ir más lejos: durante el período de cinco años comprendido entre 2004 y 2008, se construyeron en España 2.779.000 viviendas, un ritmo de construcción muy superior a la demanda, fruto de la denominada "burbuja inmobiliaria", cuyo resultado final es bien conocido y padecido.



El carácter singular de la construcción de edificios en altura transforma dicha actividad constructiva en uno de los laboratorios experimentales más completos de la construcción tecnológica.

El diseño y la construcción de edificios en altura constituyen una fuente inestimable de experiencias, que posteriormente se han trasladado a las edificaciones convencionales.

Sin embargo, la singularidad no presenta solo aspectos positivos. Una vez terminada una construcción singular, incluso en aquellas reconocidas y premiadas por su excelencia, las experiencias adquiridas durante el proyecto y la ejecución no se aprovechan para aplicarlas de nuevo, con las mejoras pertinentes, en otro emplazamiento. Por el contrario, se tiende a crear un nuevo modelo, formalmente más atractivo y más complejo de ejecución, porque el modelado mediante ordenadores lo permite y los programas de cálculo de estructuras resuelven todo tipo de planteamientos.

Ello supone un dispendio innecesario de recursos de toda índole y la imposibilidad de mejorar aquello que ya es bueno. Es preciso replantear las estrategias para generar unos estándares racionales de construcción, aplicables a edificios de alturas moderadas –en todo caso, inferiores a 40 plantas o 150 m de altura.

Si se analizan las prestaciones y los criterios de diseño y de construcción que rigen en la actualidad para realizar un edificio en altura, comparados con los de una o dos décadas atrás, cabe concluir que estos han registrado, en su corta historia, muchos más cambios que cualquier otro modelo constructivo de épocas precedentes. En buena lógica, para adaptarse a los cambios económicos, sociales y productivos, los seguirán experimentando en el futuro.

El planteamiento de partida del futuro de la edificación en altura se basará, posiblemente en la selección de técnicas y procesos constructivos más racionales, para conseguir el equilibrio necesario entre requerimientos y prestaciones. Ello no supone suprimir totalmente los “deseos”; puesto que estos también cumplen su función. Se trata, simplemente, de valorar su rentabilidad económica y su impacto ambiental, como paso previo a su realización.

Lo expuesto anteriormente responde a la consideración de que no todo aquello que “puede” ser construido “ha de ser” construido. El planeta es asimilable, en su conjunto, a un ser vivo que sufre los efectos de la actividad humana: para su conservación para las generaciones futuras, ha de ser preservado de ella adecuadamente.

El esquema a partir del cual se desarrolla la exposición general de este capítulo es el siguiente:

- Análisis de los aspectos formales y tecnológicos, tipológicos y estructurales de los edificios en altura



- Los edificios en altura como laboratorio experimental de la construcción
- Tres edificios, tres planteamientos: Turning Torso, Torre Agbar y Gherkin
- ¿Cómo serán los edificios en altura del futuro?

4.2. Análisis de los aspectos formales y tecnológicos, tipológicos y estructurales de los edificios en altura

4.2.1. Introducción

Este apartado no pretende ser un análisis detallado de la construcción de los edificios en altura. Simplemente, se ilustran algunos aspectos y conceptos de su construcción, con objeto de disponer de instrumentos de conocimiento y de valoración de esta tipología edificatoria.

Los historiadores de arquitectura señalan el año 1871, cuando se produce el pavoroso incendio de Chicago (del 8 al 10 de octubre), como el de inicio de la edificación en altura.

Por aquel entonces, la ciudad estaba construida totalmente con madera, de modo que el fuego prendió de forma descontrolada, afectó una superficie de 6,5 km² y destruyó un total de 17.000 edificios.

No puede negarse que los efectos del fuego hicieron replantear el modo en que debía reconstruirse la ciudad; sin embargo, la construcción en altura ya era un hecho, puesto que los edificios del centro de Chicago contaban hasta seis plantas, aunque sus estructuras eran de madera. Lo mismo puede afirmarse en cuanto a las alturas de los edificios de otras ciudades americanas y europeas ya densamente pobladas en la época, como Nueva York, París, Londres o Barcelona.

Las limitaciones en altura venían impuestas, más que por la capacidad resistente de los materiales, por la incomodidad derivada del acceso a las plantas superiores, en una época en que los ascensores eran prácticamente desconocidos. En estas condiciones, sobrepasar las cinco o seis plantas resultaba intolerable.

En los edificios “altos” de la época, se producía una estratificación social. Las clases de rentas más bajas ocupaban los pisos superiores, mientras que los más ricos se reservaban las inferiores, de ahí que el piso que se situaba inmediatamente sobre planta baja, que solía reservarse el propietario del inmueble, se denominase “principal”. Justo al contrario de lo que sucede en la actualidad, en que las plantas superiores, por sus mejores vistas y su mayor disponibilidad de luz natural, son las más cotizadas.

Uno de los motivos iniciales más poderosos para construir en altura es obtener el máximo aprovechamiento económico del suelo. En teoría, cuanto mayor es



el número de plantas mayor es la edificabilidad y, por tanto, mayor es el valor de venta del edificio. Sin embargo, a mayor altura, aumentan las servidumbres estructurales y los costes de construcción y de mantenimiento, por lo que, en buena lógica, las alturas del modelo deberían limitarse en función de las circunstancias específicas de su emplazamiento.

Otra de las motivaciones iniciales de la construcción en altura era que la concentración de personas en un espacio reducido mejoraba el rendimiento de las empresas. Este argumento ha perdido fuerza, gracias a la conectividad generada por y desde los ordenadores que trabajan en red.

La viabilidad de los edificios en altura está relacionada, en primer lugar, con el respeto a los ratios urbanísticos de edificabilidad. El éxito de su implantación en una ciudad depende de la disponibilidad de adecuados accesos, circulaciones y servicios, y a la articulación de los espacios libres. Es necesario garantizar tanto su cómoda utilización como su correcta integración en el tejido urbano.

Por tanto, hay que actuar desde el planeamiento, regulando densidades, alturas de edificación, anchos de calles y reservas de espacios para sistemas y equipamientos, con el propósito de que las ciudades se desarrollen de forma orgánica y racional, incluso ante el impacto que causa la presencia de edificios en altura. Ello se traduce, por lo que se refiere a los edificios en altura, en la concentración superficial de sus plantas edificadas sobre rasante y en la consiguiente liberación de suelo.

Actuar sobre las líneas indicadas daría lugar a una limitación de alturas, dentro de unos parámetros razonables en función de las disponibilidades tecnológicas, como resultado de plantear y resolver problemas de máximos y mínimos con múltiples variables. Sin embargo, un análisis somero de cómo se ha desarrollado la edificación en altura, desde sus orígenes hasta la actualidad, evidencia el predominio de la voluntad de especular y el afán de notoriedad sobre la racionalidad urbana y edificatoria.

El ejemplo más reciente de esta forma de proceder es el Burj Dubái, edificio de 818 m de altura, inaugurado en 2010 (v. fotografía izquierda de la página siguiente). Es tan alto como caro y poco práctico. Con toda la extensión del desierto disponible a su lado que permitía planteamientos edificatorios alternativos más racionales, la opción adoptada es propia del nuevo rico en que el deseo de ostentación se antepone al raciocinio.

La fotografía de la derecha muestra la propuesta de los promotores del Burj Dubái para construir una torre de 1.200 m de altura, después de ser “rebajada” –puesto que los tanteos iniciales fijaban su altura en 1.600 m, respondiendo al anhelo de construir “una torre de una milla de altura”. La propuesta es de 2007, por lo que cabe esperar que la crisis financiera, asociada a la sostenibilidad del planeta, ya que no el sentido común, acabe imponiendo su ley.



Los países emergentes de Asia y Oriente Medio son los que han apostado, en los últimos tiempos, como estrategia de imagen, por construir edificios de mayor altura, la mayoría de los cuales son proyectados y vendidos por empresas europeas y estadounidenses, en cuyos países estos planteamientos extremos cuentan con el rechazo de muchos. En Europa, donde hay una mayor conciencia ecológica y social, los edificios más altos realizados no superan los 250 m, a pesar de que existen muchos proyectos de mayor altura.

Posiblemente, en un lapso de tiempo relativamente corto, veremos cómo se abandonan, por inviables, algunos de los proyectos faraónicos que han sido portada de revista en los últimos años. Algunos de ellos, convertidos en ruinas turísticas, serán visitados como lo son, en la actualidad, los grandes testimonios construidos del pasado.

4.2.2. Sobre los aspectos formales y tecnológicos

La construcción de edificios en altura supuso la creación de unas nuevas tipologías edificatorias y su agrupación en áreas urbanas concretas, con objeto de concentrar y crear sinergias en las actividades propias del comercio y de la industria.

Además del número elevado de plantas, sus características principales son tres: la estructura de acero, el mayor dimensionado de las ventanas y la tipología de la planta lo más libre posible, para que pueda adaptarse fácilmente a todo tipo de usos de carácter terciario.

Estas innovaciones, con respecto a los modelos precedentes, entran en conflicto con las soluciones formales adoptadas en las fachadas. Hasta la década



de los años treinta del siglo xx, los arquitectos americanos habían incorporado referencias historicistas, que eran interpretadas con toda libertad por sus autores.

El pueblo de los Estados Unidos, debido a su reciente creación, no tenía referentes arquitectónicos propios sobre los cuales basar las nuevas realizaciones. La evidencia demuestra que, en las primeras etapas, los arquitectos fueron incapaces de crear un lenguaje formal propio y adecuado al carácter de los edificios en altura. La respuesta a esta incapacidad creativa, afectada por la gestación de la nueva tipología constructiva, el rascacielos, la encontraron en la reiteración a partir de modelos arquitectónicos procedentes de la vieja Europa.

Así, pueden hallarse composiciones inspiradas en los palacios renacentistas o en edificios medievales, reinterpretaciones del románico y del gótico, e incluso columnas y frontones griegos y romanos, en clara referencia al orden y a la determinación para lograr los objetivos marcados.

A modo de ejemplos de las correspondencias formales citadas, la fotografía inferior izquierda corresponde al Palazzo Medici Riccardi, construido en 1444 por Michelozzo di Bartolomeo (1396-1472). La de la derecha es del cuartel de policía de Detroit, obra de Albert Kahn (1869-1942) datada en 1923. La semejanza compositiva es tal que sobran los comentarios.



Las tres fotografías siguientes ejemplifican las referencias medievales: a la izquierda, un modelo propio de las construcciones urbanas de la época; en el centro, el Masonic Temple de Burnham & Root, construido en Chicago en 1892 y demolido en 1939. Obsérvense las coincidencias con la zona de cubiertas, así como la incorporación del estilo neorrománico en la composición del cuerpo inferior. A la derecha, un detalle de la decoración en terracota con motivos góticos del Reliance Building de Burnham & Root, construido en Chicago entre 1890 y 1895 (en el apartado 4.3, puede verse una imagen completa del edificio).



A modo de resumen de lo expuesto, la fotografía inferior muestra una imagen de Nueva York, tomada a principios del siglo xx, en que se impone el eclecticismo historicista (de izquierda a derecha: los edificios del *New York World*, del Ayuntamiento, del *New York Tribune*, de la American Tract Society y de *The Times*).



El período comprendido entre finales de los años veinte y el inicio de la Segunda Guerra Mundial está dominado, en arquitectura, por el estilo denominado *art déco*.

Nacido en el París de los años veinte como un estilo artístico ecléctico, con capacidad para aplicar sus principios a campos tan dispares como la moda, la joyería, el diseño y, claro está, también la arquitectura el *art déco* se plantea como una reacción a las formas estereotipadas del eclecticismo historicista. El concepto



de *art déco* intenta representar todo aquello que es moderno, funcional y deslumbrante.

Su presencia en la arquitectura adquiere fuerza a partir de finales de los años veinte, especialmente por la disposición, entre los recursos constructivos y de diseño, de las posibilidades plásticas del hormigón armado.

En los edificios *art déco*, la decoración pasa a un segundo plano. El protagonismo lo asumen los planos y los volúmenes puros, tratados con gran rigor geométrico sobre planteamientos simétricos.

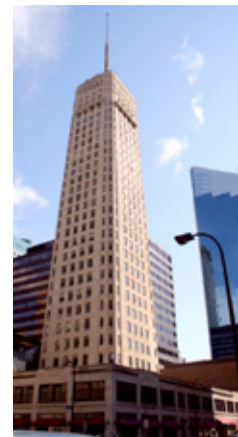
Siguiendo sus principios formales, varios rascacielos han pasado a los anales de la historia de la arquitectura. Entre ellos, se ejemplifican tres prácticamente coetáneos: el Chrysler Building, el Ayuntamiento de Buffalo (Buffalo City Hall) y la Foshay Tower de Minneapolis.

El más famoso, sin duda, es el Chrysler Building, de 319 m de altura y 66 plantas, que entró en servicio en 1930 (v. foto inferior izquierda). Está considerado, entre los críticos de arquitectura, el rascacielos más elegante construido en la ciudad de Nueva York.

La fotografía central muestra el Buffalo City Hall, edificio que alberga el gobierno municipal de la ciudad de Buffalo. Fue terminado en 1931 y tiene una superficie construida que supera los 56.000 m², repartida en 32 plantas. Alcanza una altura de 121 m.

La fotografía de la derecha corresponde a la Foshay Tower de la ciudad de Minneapolis, inaugurada en 1929. Actualmente, es un hotel de 32 plantas y una altura de 136 m (o de 185 m, si contamos la antena).

Tras el paréntesis impuesto por la Segunda Guerra Mundial, el llamado "estilo internacional" asume el papel de vanguardia en el diseño arquitectónico e incide de forma muy directa en los edificios en altura.





El estilo internacional se basa en el racionalismo alemán, algunos de cuyos seguidores más destacados, como Walter Gropius (1883-1969) y Ludwig Mies van der Rohe (1886-1969), los austriacos Richard Neutra (1892-1970) y Rudolph Schindler (1887-1953), emigran a los Estados Unidos y crean una nueva generación de rascacielos. A ellos se unen, como cultivadores de un mismo estilo, el suizo Charles-Édouard Jeanneret, más conocido como Le Corbusier (1887-1965) y el norteamericano Philip Johnson (1906-2005).

Según los datos precedentes, puede afirmarse que el lenguaje arquitectónico de los rascacielos de posguerra, basado en formas geométricas puras, es generado mayoritariamente por arquitectos europeos que emigran o trabajan en los Estados Unidos. Desde allí se difunden y se aplican en todo el mundo los mismos modelos, sin atender, en la mayoría de las ocasiones, a los condicionantes locales.

La paulatina incorporación de la tecnología

En los edificios en altura de posguerra, la estructura de acero se encuentra plenamente controlada, tanto desde el punto de vista del cálculo y el diseño como de la ejecución, al disponer de técnicas fiables de unión y una gran variedad de perfiles con capacidad para adaptarse a todo tipo de solicitaciones. El dominio de la estructura permite ensayar y avanzar en otros campos, especialmente en los cerramientos y en las instalaciones.

En su simplicidad y pureza de líneas, inciden directamente los aspectos relativos a la aplicación de los procesos industriales, como es el caso de los muros cortina. El escaso juego que permiten este tipo de recursos técnicos uniformiza la imagen de los edificios, especialmente durante los primeros tiempos.

A continuación, se exponen tres ejemplos de Mies van der Rohe para ilustrar tanto las virtudes como los defectos del estilo internacional.

La fotografía inferior izquierda corresponde a un “rascacielos de vidrio”, proyectado en 1922 por Mies van der Rohe para un terreno de Berlín, cuyos detalles se desconocen. Aunque el proyecto no llegó a realizarse, muestra una interesante visión de futuro y, al mismo tiempo, un desconocimiento notable y lógico de los problemas tecnológicos asociados a la construcción de edificios con grandes superficies acristaladas.

La estructura se planteó mediante losas de hormigón armado, construidas en voladizos emergentes de dos cilindros de soporte del mismo material. Las posibilidades técnicas de la época hacían irrealizable el proyecto. Incluso en la actualidad, pese a disponer de forjados postensados, su realización sería especialmente compleja y costosa.

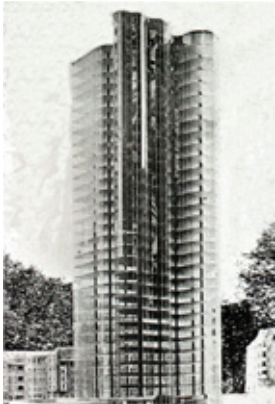
Con respecto al acristalamiento, en 1922 la industria del vidrio aún no se había enfrentado a los retos planteados desde la arquitectura. El propio Mies utilizaba el vidrio como elemento compositivo, sin considerar los problemas técnicos que



se pudieran derivar de ello. Así, con relación al rascacielos de vidrio, comenta: "Las pruebas realizadas sobre una maqueta de cristal me mostraron el camino y pronto me di cuenta de que al utilizar el cristal no se trata de conseguir un efecto de luz o sombra, sino más bien de lograr un gran juego de reflejos de luz."

A pequeña escala, Mies pudo experimentar los problemas del uso masivo del cristal, sin un conocimiento tecnológico profundo, en la casa de fin de semana de la doctora Edith Farnsworth, proyectada y construida en acero y vidrio entre 1946 y 1951. El asunto terminó en los tribunales a causa de las deficiencias de tipo térmico y de privacidad, debidas al diseño, según su propietaria. En la actualidad, esta vivienda se conserva y se visita como un icono de la arquitectura contemporánea.

La fotografía central corresponde a los apartamentos de Lake Shore Drive de Chicago, proyectados y construidos entre 1948 y 1951. La fotografía inferior izquierda muestra la fachada del edificio Seagram, edificio de oficinas de 39 plantas de altura, construido entre 1954 y 1958, considerado el ejemplo más puro del estilo internacional.



Si se considera la diferente funcionalidad de cada uno de los dos edificios, el primero de carácter residencial y el segundo de oficinas, y se observan las fachadas de ambos, cabe concluir que estas son absolutamente homogéneas, por lo que al menos una de ellas está fuera de contexto teniendo en cuenta su contenido. La perspectiva del tiempo nos indica que el modelo de fachada propugnado por el estilo internacional para los edificios en altura se adapta mejor a los edificios terciarios que a los residenciales.

Los edificios del estilo internacional distaban de ofrecer, según la óptica actual, un equilibrio entre requerimientos y prestaciones.

Sus pieles de vidrio generaban problemas de sobrecalentamiento, por el efecto invernadero, y de pérdidas térmicas, por su insuficiente aislamiento térmico. Puesto que la primera crisis del petróleo de principios de los setenta quedaba



lejos aún, el control ambiental de su interior se realizaba consumiendo ingentes cantidades de energía.

Este consumo energético excesivo y las situaciones de escaso confort que se producían entre las zonas umbrías y las soleadas de un mismo edificio fueron objeto de estudio, y se mejoraron progresivamente los sistemas de aire acondicionado mediante las sectorizaciones y los termostatos.

En los rascacielos de estilo internacional, auténtico laboratorio de edificación, se pusieron en servicio, de forma generalizada, las luces de tipo fluorescente, cuyas emisiones de calor son muy inferiores a las de las lámparas de incandescencia. Estos tubos fueron mostrados por primera vez al público en la Feria Mundial de Nueva York de 1939.

Los acristalamientos con cámara aislante para la mejora del control térmico y acústico de los edificios en altura tardarían aún en comercializarse. Si bien la patente más antigua que existe data de 1865, cuando Thomas D. Stetson recibió la US Patent n. 49167 por la idea de unir dos vidrios herméticamente con una cámara de aire intermedia, la comercialización de los dobles acristalamientos no se produjo hasta 1976, tras la primera crisis del petróleo de 1973, que los hizo rentables y, por tanto, necesarios. En los años siguientes, se realizarían notables mejoras, incorporando dobles cámaras y rellenándolas con gases nobles para reducir la transmitancia térmica.

Si en la actualidad el vidrio es uno de los materiales que más ha evolucionado para dar servicio a la construcción, ello se debe, en buena medida, a la necesidad de buscar soluciones a los problemas planteados por la evolución de la construcción de rascacielos.

Solo cuando la tecnología empezó a controlar el funcionamiento orgánico de los rascacielos construidos según el modelo generado por el estilo internacional, los arquitectos pudieron volver a centrar sus esfuerzos en los aspectos estilísticos. Entre tanto, sus modelos se habían extendido como una plaga, formalmente uniforme, por medio mundo. A título de ejemplo, la fotografía inferior izquierda corresponde a Teherán y la de la derecha, a Kinshasa.





Las dos fotografías siguientes son de Sidney (la de la izquierda) y La Paz (la de la derecha). Si se desconociera que estas cuatro ciudades están separadas por miles de kilómetros de distancia y tienen climas muy diferenciados, podría afirmarse que las imágenes corresponden a barrios de una misma ciudad.



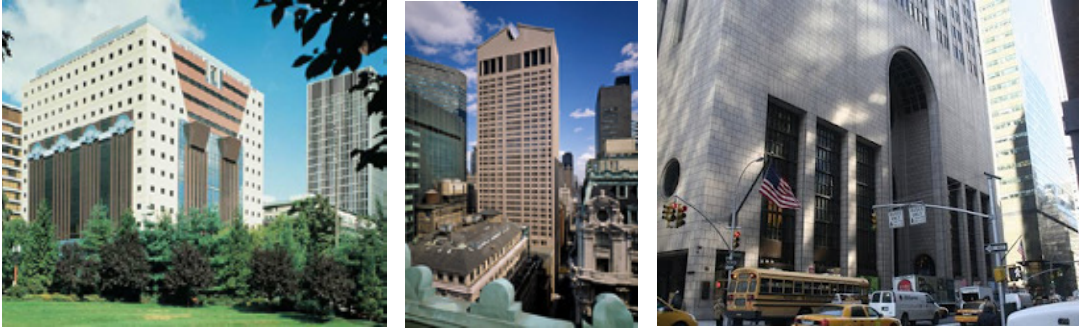
A finales de los años sesenta, reaparecen paulatinamente el historicismo y las referencias locales en la arquitectura. El movimiento se consolida en los setenta para dar paso a la posmodernidad o estilo posmoderno.

El posmodernismo no se caracteriza por sus aportaciones tecnológicas a los edificios en altura, como sí se producirá en los edificios temporalmente coetáneos, los denominados *high-tech*. Durante este período, los objetivos se centran en mejorar las prestaciones de los aislamientos térmicos y de los sistemas de control ambiental, a raíz de la presión ejercida por el incremento de los costes energéticos derivados de las sucesivas crisis del petróleo (en 1973, en 1979 y en la actualidad, en que la crisis del petróleo es sistémica).

El posmodernismo se fundamenta, esencialmente, en aportaciones estilísticas, cuyo propósito reactivo es hacer más humana y comprensible la arquitectura. Por este motivo, cabe calificarlo como el "manierismo" del estilo internacional.

Las tres fotografías siguientes corresponden a tres ejemplos significativos de arquitectura posmoderna, aplicada a edificios en altura. La izquierda muestra la imagen, un tanto controvertida en el momento de su construcción, del Portland Public Service Building de Oregón, construido por Michael Graves (1934) entre 1980 y 1982. Se trata de un edificio de oficinas de 15 plantas y 67 m de altura, con una superficie construida de unos 30.000 m².

La fotografía central y la de la derecha corresponden al edificio AT&T (actualmente, edificio Sony) de Nueva York. Tiene 37 plantas y una altura total de 197 m. Fue proyectado por Philip Johnson (1906-2005) y John Burgee (1933) y construido entre 1978 y 1984. Destaca tanto por su coronación de estilo Chippendale, como por su acceso, colosal recreación neorrománica, puesto que la altura del arco central comprende siete plantas. El ejercicio formal convierte un rascacielos en la imagen de un mueble, y viceversa.

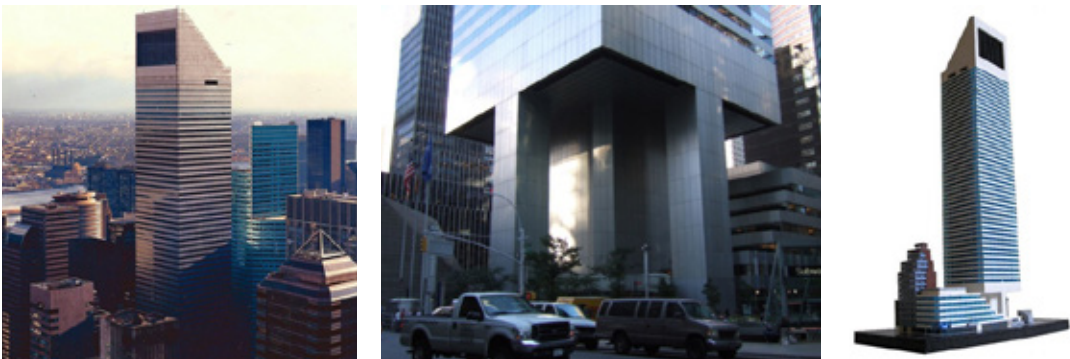


Las tres fotografías inferiores son del Citigroup Center de Nueva York, construido entre 1971 y 1977 por The Stubbins Associates, en colaboración con Emery Roth & Sons. Se trata de un rascacielos de 279 m de altura, con 59 plantas, que contiene un total de 120.000 m² de oficinas.

La fotografía inferior izquierda muestra su característica coronación en ángulo de 45°. La fotografía central permite apreciar los vuelos de 22 m correspondientes a la zona de acceso al nivel de la calle. Esta solución no es gratuita: es debida a que la comunidad evangélica que donó a la corporación Citigroup el espacio aéreo situado sobre el edificio de su iglesia para construir el rascacielos impuso la condición de que la misma no dejara de destacarse. El edificio vuela sobre la iglesia hasta alcanzar una altura de nueve plantas y libera el espacio inferior a costa de generar una estructura un tanto singular.

Con respecto a la estructura, durante la construcción se observó que las hipótesis de cálculo habían considerado el efecto del viento según los ejes principales de la estructura, pero no según sus diagonales. Ello obligó a reforzar discretamente la estructura durante las noches mediante la adición de placas rigidizadoras en los nudos.

El edificio Citigroup fue uno de los primeros en contar con una masa oscilante para amortiguar los efectos de viento. Se trata de un mecanismo simple, en



términos relativos, consistente en un contrapeso enorme, situado sobre una plataforma deslizante. Por su inercia, contrarresta los vaivenes y movimientos laterales al desplazarse en sentido contrario a estos.

El esquema en 3D de la derecha permite apreciar la volumetría del conjunto construido. En la zona inferior derecha puede apreciarse, bajo el voladizo, la iglesia evangélica.

El movimiento posmoderno plantea, por primera vez, los rascacielos como megaesculturas. En determinados casos, esta situación subvierte el orden lógico ciudad-edificio, mediante actuaciones políticas que consisten en encargar a arquitectos famosos la construcción de edificios singulares para “situar en el mapa” a ciudades que, de otro modo, pasarían prácticamente desapercibidas. Ejemplos de ello son el Turning Torso de Santiago Calatrava (1951) en la ciudad sueca de Malmö, o el Museo Guggenheim de Bilbao, de Frank Gehry (1929).

En convivencia temporal con el estilo posmoderno, el estilo *high-tech* supone la incorporación de la alta tecnología en la construcción de edificios, especialmente en los rascacielos, en múltiples aspectos: en la estructura, en los cerramientos y en las instalaciones.

Cabe destacar, en particular, la incidencia del estilo *high-tech* en la concepción espacial de los edificios, en el desarrollo de megaestructuras muy sofisticadas para su soporte o en el empleo de materiales industrializados para la construcción de forjados y cerramientos.

El diseño *high-tech* propugna optimizar los espacios interiores y reducir los consumos energéticos empleando ventilaciones naturales cruzadas, siempre que sea posible.

Por tanto, el edificio es concebido desde una nueva óptica, en que las funciones de “máquina generadora de confort” se hacen evidentes y son representadas por tubos y accesorios de toda índole. Estos, en lugar de quedar ocultos mediante falsos techos o en patios de servicio, se incorporan al diseño como elementos generadores de ambiente, en que el color adquiere un papel preponderante.





El Centro Pompidou de París, inaugurado en 1977 y rehabilitado entre 1997 y 1999, obra de Renzo Piano (1937) y Richard Rogers (1933), cuya construcción fue muy controvertida en su época, es en la actualidad un icono de la arquitectura *high-tech*. La fotografía anterior izquierda muestra una imagen exterior del edificio; la de la derecha, de su interior.

Como ejemplos de rascacielos *high-tech*, las tres fotografías siguientes muestran dos de los realizados por el equipo de Norman Foster. La de la izquierda y la del centro corresponden al HSBC Building (Bank of Hong Kong), construido entre 1979 y 1986. Destaca su atrio interior (v. foto central), que vincula 10 de las 47 plantas del edificio, cuya superficie total es de 93.000, m².

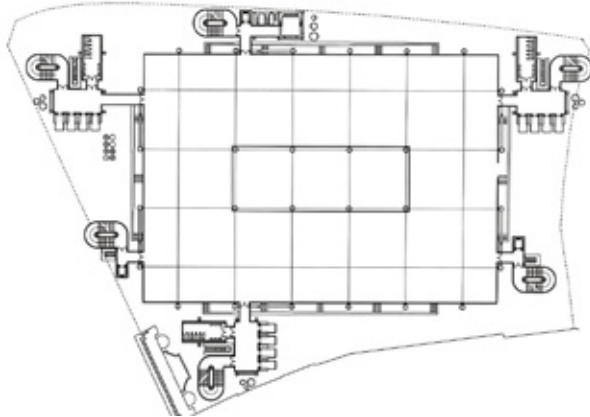
La fotografía de la derecha es de la Torre Commerzbank de Fráncfort, edificada entre 1994 y 1996. Alcanza los 256 m, distribuidos en 56 plantas, con una superficie construida total de 121.000 m². En su interior, alberga nueve jardines distribuidos en altura.



Por su singularidad técnica y conceptual en la línea *high-tech*, destaca el edificio Lloyd's de Londres (v. foto inferior izquierda), diseñado por Richard Rogers y construido por la empresa Bovis entre los años 1978 y 1986. Se trata de un edificio de un gran rigor geométrico, en la línea modular de una catedral gótica y, al mismo tiempo, innovador.

Al contrario que en la mayoría de los rascacielos, donde los servicios ocupan la zona central, en este se centrifugan hacia el perímetro, de modo que las escaleras, los ascensores, los conductos de electricidad y los sistemas de climatización se resuelven mediante seis torres exteriores, tres principales y tres de servicios. Obsérvese la imagen de la planta general en el dibujo derecho de la página siguiente.

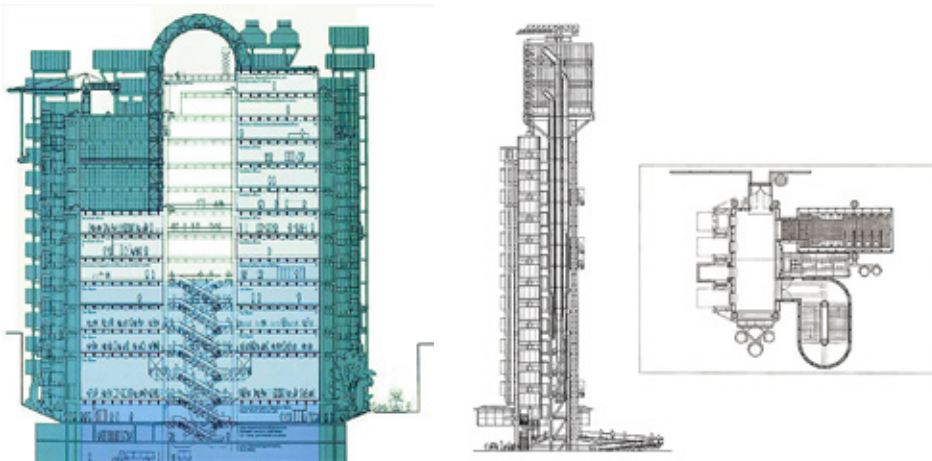
El interior del edificio es totalmente diáfano y modulado. En la zona central, se genera un amplio espacio vacío que conforma un atrio iluminado de 60 m de altura, cuyas cuatro primeras plantas están comunicadas mediante escaleras mecánicas.



A las plantas superiores solo se puede acceder mecánicamente, utilizando uno de los doce ascensores panorámicos acristalados, los primeros de estas características instalados en Inglaterra.

Está cubierto por una gran bóveda acristalada, soportada por una estructura metálica formada por cerchas tubulares. Dicha bóveda, además de proporcionar iluminación natural, contribuye a reducir el consumo energético mediante el aprovechamiento del efecto invernadero en épocas frías y la ventilación natural por convección durante las épocas más templadas. El gráfico inferior izquierdo muestra la sección del edificio con la bóveda del atrio. El de la derecha, la planta y el alzado de una de las torres de servicios.

Durante el período comprendido entre 1995 y 2007, fechas de bonanza económica a escala mundial, se produjo una revolución total en los aspectos formales de los edificios en altura y se proyectó e incluso llegó a realizarse todo aquello que la técnica de última generación permitía.





Un ejemplo de ello es el hotel Burj Al Arab (cuya traducción es “torre arábiga”; v. foto inferior izquierda). Su realización se encargó a la firma de arquitectos estadounidense Tom Wright of Atkins Middle East. Su perfil recuerda el de una embarcación a vela. Fue construido entre 1994 y 1999 sobre una isla artificial. Tiene una altura total de 321 m, distribuidos en 60 plantas. Una de las características de estos edificios es la generación de amplios atrios, en la línea iniciada por Richard Rogers en el Lloyd’s de Londres, que abarcan entre diez y quince plantas de altura. La fotografía central muestra el atrio del hotel Burj Al Arab.

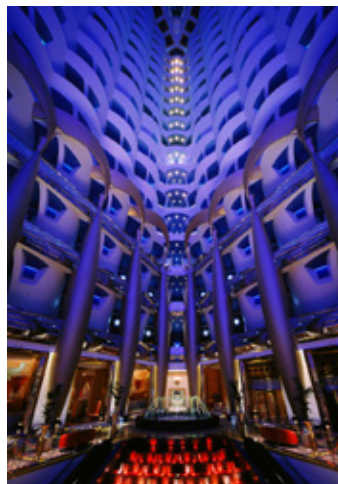
La fotografía de la derecha corresponde al World Trade Center de Baréin, ubicado en su capital Manama. Está formado por dos torres gemelas de 240 m de altura y 50 plantas destinadas a centros comerciales, oficinas y alojamientos.

Su diseño está condicionado para proporcionar corrientes de aire a tres turbinas eólicas fijas, de 29 m de diámetro cada una. Fueron puestas en servicio en 2008 y, en conjunto, producen entre el 11 y el 15 % de la energía que consume el edificio, eso es, entre 1.100 y 1.300 MWh al año.

Este edificio es el primero del mundo en integrar turbinas eólicas de gran formato en su diseño estructural. Por esta razón, en 2006 recibió un LEAF Award al mejor uso de la tecnología en un gran planeamiento y Premio de Diseño Sostenible del mundo árabe de la construcción.

A la vista de los condicionantes de diseño del edificio para conducir los flujos de aire a las turbinas y que estas no pueden orientarse para aprovechar al máximo las corrientes de aire, cabe plantearse si no habría sido más ecológico instalar en el desierto, con el mismo coste de inversión, un mayor número de turbinas de las producidas en serie y construir un edificio más racional.

El World Trade Center de Baréin es un arquetipo de sostenibilidad mal entendida en el ámbito de la arquitectura y de la edificación. La utilización de un argumento incon-





sistente para sustentar el diseño de un edificio puede llegar a propiciar su construcción, pero difícilmente se transformará en un producto realmente coherente.

En otros casos, “llegaron tarde” los proyectos o, mejor dicho, los anteproyectos a los que los estudios de arquitectura destinan ingentes sumas de dinero, que no siempre encuentran la debida recompensa en forma de encargos.

En 2012, la euforia constructora se ha frenado, como consecuencia de la crisis económica. Los tres ejemplos que se exponen a continuación son solo una pequeña muestra de este tipo de proyectos en que los deseos y el afán de notoriedad se avanzan en mucho a las necesidades reales que el diseño ha de satisfacer.

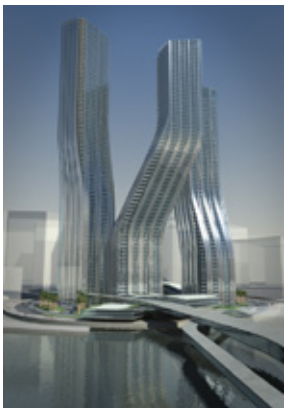
Dichos ejemplos exponen, someramente, aquello que puede realizarse en el límite de la tecnología actual, lo cual no supone, en modo alguno, que tenga que llevarse a cabo necesariamente.

En buena lógica, los valores profundos de la estética y de la racionalidad constructiva han de imponerse sobre la forma por la forma, por razones tanto de simple economía como de respeto al medio ambiente.

La arquitecta Zaha Hadid dio a conocer en 2006 el proyecto de las Dancing Towers para Dubái, consistente en un conjunto de tres edificios de 75, 65 y 55 plantas destinadas a apartamentos y oficinas. El proyecto no llegó a realizarse (v. foto inferior izquierda).

La fotografía central muestra el proyecto denominado Dubai Towers, presentado el 2006. Consiste en cuatro torres cuyas alturas son, de mayor a menor, de 550, 460, 410 y 360 m. La torre mayor albergaría 94 plantas y la de menor altura, 57. Tampoco se ha realizado.

Otro proyecto presentado en 2009 y no realizado es el del rascacielos denominado Anara, también para Dubái ,(v. foto inferior derecha). Destinado a hotel y apartamentos, había de tener una altura de 600 m, repartidos en 135 plantas. La zona central del anillo albergaría un restaurante.





Cabe concluir que determinados tipos formales de construcción en altura implican unos sobrecostes innecesarios, puesto que, de entrada, alteran la lógica estructural y, además, complican la construcción de los cerramientos. Igualmente, una vez alcanzados determinados límites de altura en edificación y observar su escasa utilidad práctica, es preciso centrar la actividad del futuro en la construcción de edificios globalmente más eficientes, desde parámetros estructurales, de seguridad, de eficiencia energética y de sostenibilidad.

Para ello, no basta con afirmar que un rascacielos es ecológico, simplemente porque contiene jardines y ventilaciones cruzadas o consume menos energía que otros de prestaciones similares. Hay que demostrar que su coste por metro cuadrado es razonable. Igualmente, han de especificarse las cifras relativas al consumo energético necesario para construirlo y mantenerlo, lo mismo que los valores de las emisiones de CO₂ que se deriven de ello.

4.2.3. Aspectos tipológicos

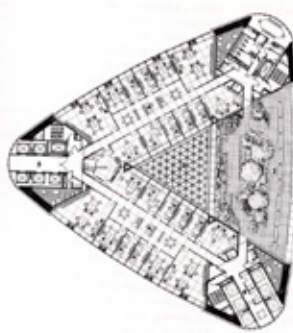
La tipología habitual de los rascacielos es la torre. En ellos, se prioriza la altura por encima de las dimensiones correspondientes al ancho y al largo. Los usos a que son destinados mayoritariamente los rascacielos son el terciario, comercial, de oficinas y hoteles, aunque ello no excluye que algunos rascacielos tengan uso residencial.

En la organización espacial de las plantas, se plantean fundamentalmente los objetivos siguientes:

Máximo aprovechamiento de la luz natural

Ello limita dimensionalmente las plantas. A título de ejemplo, las Torres Gemelas del World Trade Center de Nueva York, desaparecidas en 2001, median 63,50 m de lado y la Torre Sears de Chicago, 75 × 75 m. Ello marca el límite práctico del modelo a efectos de aprovechamiento de la luz natural para plantas sensiblemente cuadradas.

Superar estas dimensiones trae como consecuencia la necesidad de incrementar el cociente entre el perímetro y la superficie de las plantas. Para ello, hay





que recurrir a formas alargadas o abiertas, como sucede en la Burj Dubái y en el Commerzbank de Fráncfort, ilustrados, respectivamente, en los gráficos anteriores izquierdo y derecho.

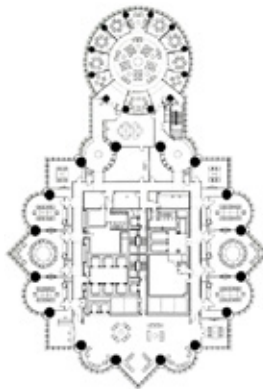
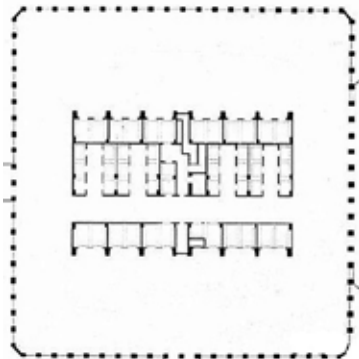
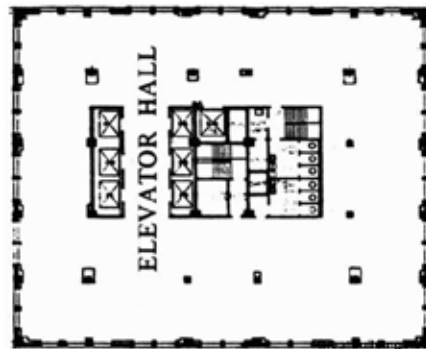
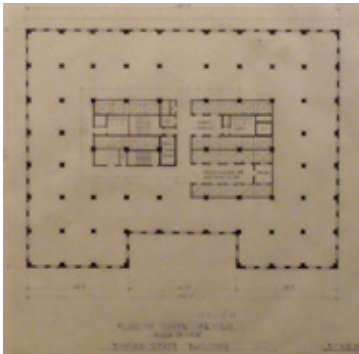
Diafanidad de las plantas

Ello permite adaptar fácilmente sus distribuciones a las situaciones cambiantes. En las plantas diáfanas, las mamparas prefabricadas y el mobiliario dan adecuada respuesta a dicha exigencia.

Disposición de un núcleo eficiente de enlaces verticales

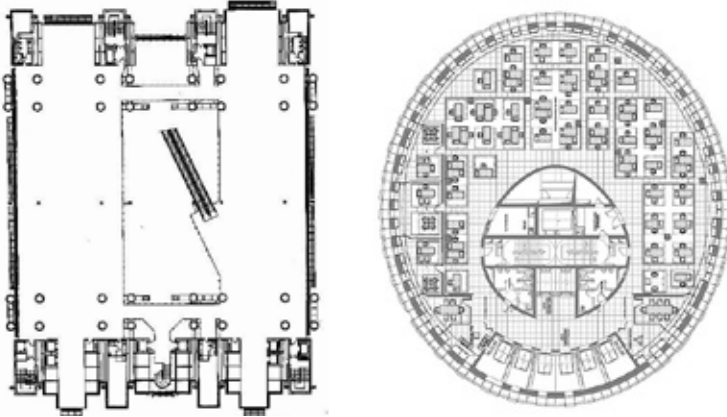
Ello supone la necesidad de ocupar cerca de un 30 % de la planta en la parte central. Esta proporción se ha mantenido prácticamente invariable a lo largo del tiempo. Basta con observar las cuatro plantas que se ilustran a continuación, que abarcan el período de setenta años comprendido entre los años treinta y principios del siglo XXI.

La primera de la izquierda corresponde al Empire Estate Building; la que se encuentra a su derecha, al edificio Chrysler; la inferior izquierda pertenece al World Trade Center de Nueva York, y la ilustrada en el gráfico inferior derecho, a las Torres Petronas de Kuala Lumpur, con plantas próximas a la circular.

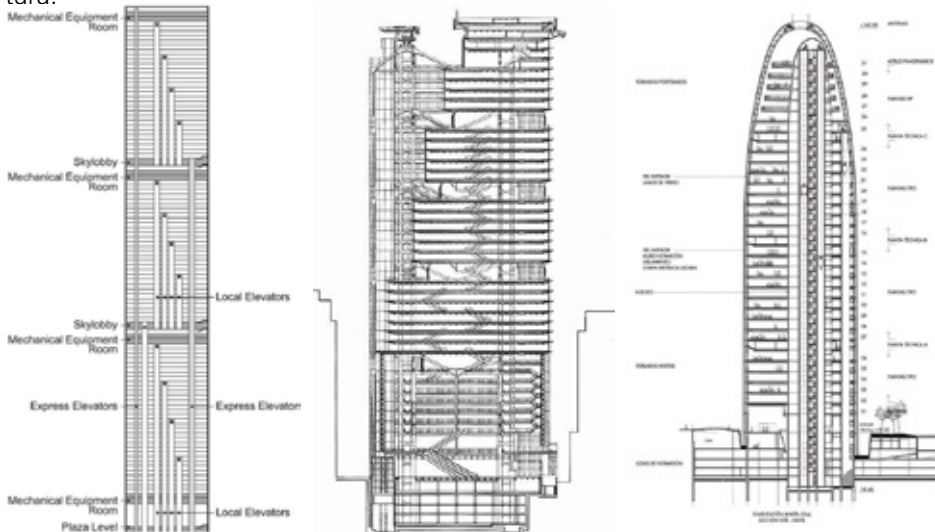




No todos los rascacielos siguen el mismo modelo de núcleo central. En determinados casos, se observan desplazamientos de los núcleos de enlace vertical hacia el perímetro para obtener mayores espacios diáfanos en la zona central del edificio. La fotografía inferior izquierda corresponde a la planta quinta del Bank of Hong Kong (1979-1986). Obsérvese el cambio de concepto impuesto por Norman Foster, consistente en centrifugar hacia el perímetro los núcleos de enlace vertical. La fotografía inferior derecha muestra una planta de la Torre Agbar de Barcelona, en que el núcleo está desplazado hacia la parte inferior y la batería principal de ascensores se sitúa en el perímetro.



Las mayores servidumbres de los edificios en altura se derivan tanto de los enlaces verticales como de la necesidad de garantizar presiones adecuadas de suministro de agua de las evacuaciones y de aire acondicionado. Para ello, se recurre a sectorizar en altura este tipo de edificios, intercalando las llamadas plantas técnicas. Así, un rascacielos puede interpretarse como la superposición modular de varios cuerpos de edificios autosuficientes e interconectados en altura.



El gráfico izquierdo de la página anterior permite observar la sectorización del World Trade Center por lo que respecta a los ascensores. El gráfico central muestra una sección del Bank of Hong Kong, donde pueden apreciarse el gran atrio de acceso y las diferentes alturas de las plantas de sectorización. A la derecha, se reproduce una sección de la Torre Agbar, En la misma, además de las 31 plantas de oficinas, se intercalan tres plantas técnicas.

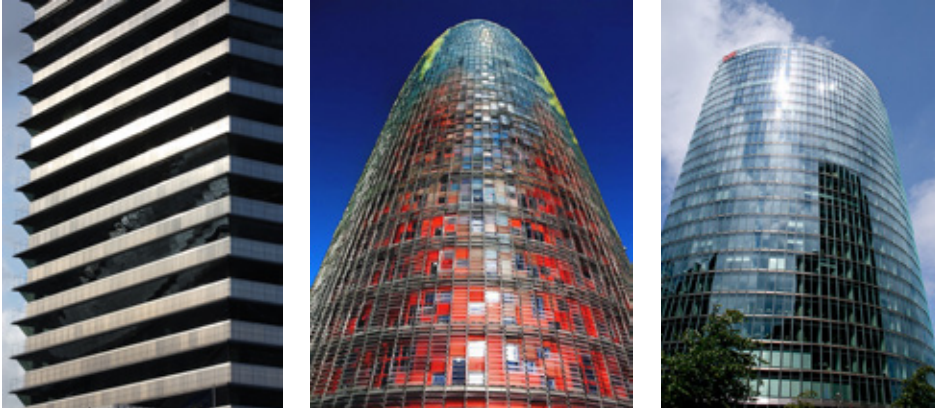
Un aspecto nada desdeñable en los edificios en altura es el relativo a la limpieza y al mantenimiento del exterior. Dos son los procedimientos habituales para atender este requerimiento: las góndolas y los pasos de servicio.

Las góndolas tienen una capacidad de carga de entre 200 y 300 kg. Se desplazan sobre carriles instalados en la azotea del edificio. Cuentan con dispositivos de limpieza y de seguridad altamente especializados. Su funcionamiento puede desarrollarse de forma automática o mediante operarios. Su velocidad de desplazamiento es relativamente lenta, entre 3 y 9 m por minuto. La fotografía inferior izquierda muestra una góndola recogida en la cubierta. La de la derecha, en el momento de iniciar el trabajo.



Las fotografías siguientes muestran tres edificios que habilitan pasos de servicio con planteamientos bien distintos. La inferior izquierda corresponde a la Torre Mapfre de Barcelona. El paso de servicio está protegido por un simple cable de seguridad, prácticamente imperceptible desde la calle. La fotografía central permite apreciar los pasos de servicio de la Torre Agbar, concebidos tanto para el mantenimiento de la fachada interior como de las lamas de cristal que constituyen la segunda piel del edificio. La fotografía de la derecha detalla la presencia de una doble piel acristalada en el edificio de la Torre Sony de la Potsdamer Platz, dispuesta para atenuar los rigores del invierno berlinés y amortiguar los ruidos urbanos.

Cabe concluir que los edificios en altura, aun teniendo elementos y aspectos tipológicos comunes, pueden responder a una gran variedad y diversidad de planteamientos y modelos. Ello refleja aspectos positivos, derivados de la evolución, la mejora y la depuración constante de los modelos y de las experiencias que se derivan de ellos, pero también lo contrario.



Esta vertiente surge, en ocasiones, de la voluntad inmoderada de crear continuamente, un ejercicio peligroso en que puede llegar a primar la forma sobre el fondo, sin dar tiempo ni lugar para la aparición del rigor crítico necesario para analizar los resultados, consolidar situaciones y compartir experiencias.

A ello ha contribuido la personalidad ególatra de algunos arquitectos “estrella”; los cuales han contado con el apoyo de promotores y de políticos ávidos como ellos de compartir notoriedad.

4.2.4. Tipologías estructurales de los edificios en altura

La voluntad de alcanzar alturas y esbelteces cada vez mayores ha sido paralela a:

- El desarrollo de la industria metalúrgica mediante la producción de gamas de perfiles laminados de mayor sección, realizados con acero de más calidad.
- La evolución de los sistemas de unión entre perfiles, que han pasado del roblonado a la soldadura con arco y al empleo de tornillos de alta resistencia.
- La utilización de hormigón armado de alta resistencia, asociado a la tecnología de los encofrados trepantes.

Los factores indicados permiten distinguir las siguientes tipologías estructurales, aplicadas a los edificios en altura:

- De jaula
- Orientada
- De nudos rígidos
- De núcleo
- De tubo externo
- De doble tubo
- De haz de tubos



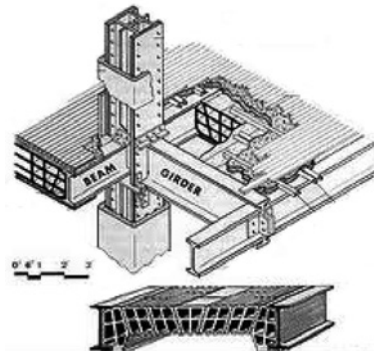
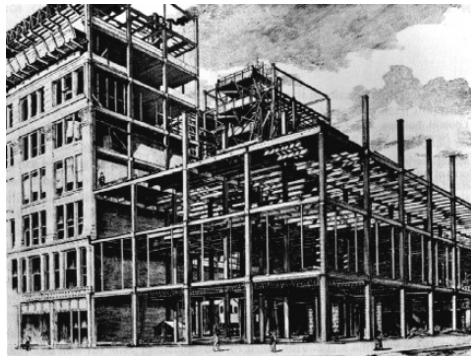
Estas tipologías se detallan a continuación.

Tipología de jaula

Como ya se ha indicado, los primeros edificios en altura se construyeron a finales del siglo XIX. La capacidad tecnológica de los trenes de laminación, la calidad de los aceros disponibles y el sistema de unión entre piezas estructurales mediante roblones limitaban las luces entre soportes a un máximo de 12 m, aunque las habituales se situaban en torno a los 7 m.

En esta primera época, los edificios se construían con jácenas y forjados, elaborados mediante perfiles de escaso canto. En sus uniones con los soportes, se generaban nudos articulados. Ello confería a las estructuras un aspecto abigarrado, como puede apreciarse en la fotografía inferior izquierda, razón por la cual estas estructuras reciben el nombre genérico de "jaulas". El gráfico inferior derecho, correspondiente a este sistema constructivo, muestra:

- Los soportes, realizados uniendo pletinas y perfiles mediante roblones para conseguir la sección necesaria.
- Las uniones roblonadas entre jácenas y soportes, y entre jácenas y vigas.
- El relleno de los espacios entre vigas mediante casetones de cerámica aligerada.
- La protección de la estructura contra el fuego mediante revestimientos ignífugos.



Tipología orientada

La tipología orientada puede utilizarse cuando los edificios no sobrepasan los 150 m de altura y presentan una marcada diferenciación dimensional entre fachadas. En estas circunstancias, puede recurrirse a la construcción de diafragmas de acero o de hormigón armado perpendiculares a la fachada mayor. Estos



actúan a modo de ménsulas, con capacidad para absorber los esfuerzos generados en el plano principal por la acción del viento.

Este tipo de edificios suelen presentar una planta en forma bivalva, ahusada en sus extremos para minimizar el efecto del viento, que incide en sentido paralelo a la fachada principal, tal como se muestra en el gráfico inferior derecho. Los servicios suelen ubicarse en los extremos ahusados de la planta.



Las dos fotografías anteriores muestran uno de los edificios más conocidos realizados con una estructura orientada de hormigón armado. Se trata de la Torre Pirelli de Milán, construida entre 1955 y 1959 bajo la dirección de Gio Ponti y Pier Luigi Nervi, ambos coetáneos (1891-1979). Tiene 32 plantas y 113 m de altura. Desde 1980, el edificio es la sede del Consejo Regional de la Lombardía. La fotografía de la izquierda permite apreciar la esbeltez lateral del edificio, cuya planta mide 75,50 m de ancho por un fondo máximo de 20,50. La fotografía central muestra, en la fachada principal, los macizos de los diafragmas de soporte.

Tipología de nudos rígidos

La tipología de nudos rígidos es consecuencia del desarrollo natural de las estructuras de jaula gracias a la mejora de los productos siderúrgicos y sus uniones. Los roblones son sustituidos por tornillos de alta resistencia y soldaduras cuidadosamente verificadas mediante procedimientos de control de calidad.

Como consecuencia de ello, los perfiles pueden asumir las solicitaciones en solitario, sin necesidad de realizar agrupaciones. Las uniones entre soportes y jácenas se convierten en nudos rígidos, en lugar de las articulaciones propias de las estructuras en jaula.

En estas condiciones, son frecuentes las luces superiores a los 8 m, con casos límite alrededor de los 25 m. Los grandes rascacielos de los años cincuenta y sesenta se realizaron mediante nudos rígidos.



La fotografía superior izquierda corresponde a una fase de la construcción de la estructura del edificio Pan Am, actualmente Met Life, de 58 plantas, construido bajo la tipología de los nudos rígidos y terminado en 1963. Cabe destacar que, en aquella época, los perímetros de las plantas no contaban con protección alguna de seguridad.

La fotografía central muestra un operario soldando una unión entre una jácena y un soporte. El gráfico de la izquierda corresponde a un detalle constructivo de la entrega del muro cortina a la estructura del edificio Seagram (1954-1959) de Mies van der Rohe. Obsérvese la protección contrafuego del soporte estructural y el sistema de aireación de los cristales para evitar condensaciones.

Tipología de núcleo

La tipología de núcleo va asociada al desarrollo de los encofrados deslizantes y trepantes. El encofrado deja de ser una construcción artesanal de madera útil solo para unas pocas puestas y se convierte en una herramienta capaz de potenciar, de forma eficiente, las posibilidades tecnológicas del hormigón armado.

Los encofrados deslizantes se caracterizan porque avanzan de modo lento pero ininterrumpidamente gracias a un sistema motorizado. Ello permite realizar las operaciones de ferrallado y vertido de hormigón siempre sobre hormigón fresco y así evitar las juntas frías. De este modo, se consiguen fustes de hormigón perfectos de gran altura.





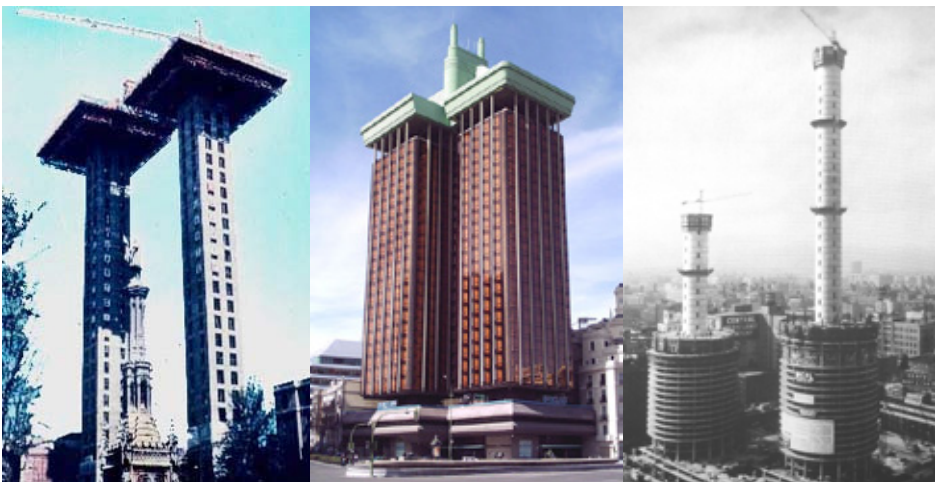
Como ejemplo, las fotografías anteriores muestran, respectivamente, las torres de comunicaciones de Berlín, cuyo mirador se sitúa a 204 m de altura (la coronación de la antena, a 368 m), y de Collserola en Barcelona, cuya altura total es de 288,40 m.

Los encofrados trepantes se desplazan planta a planta mediante diferentes procedimientos. A continuación, se exponen los sistemas de desplazamiento de los encofrados trepantes, de menor a mayor complejidad tecnológica:

1. La plataforma de trabajo y el encofrado se mueven de una fase a otra por separado con una grúa.
2. La plataforma de trabajo y el encofrado se mueven de una fase a otra conjuntamente. El movimiento se puede realizar de distintas formas:
 - **Sistemas de trepado guiados.** Se utiliza una grúa para el desplazamiento, pero la estructura y las plataformas de trabajo se mantienen unidas mediante unas guías incorporadas a los muros.
 - **Sistemas autotrepantes.** El desplazamiento se efectúa sin necesidad de grúa, mediante unos gatos hidráulicos acoplados a las plataformas.

Ello permite elevar núcleos de hormigón altamente resistentes y de formas complejas, si es preciso, por los que discurren instalaciones y enlaces verticales. De los mismos, es posible extraer grandes jácenas en voladizo, capaces de soportar hasta 20 plantas suspendidas de tirantes situados en los extremos de las mismas.

La construcción de un número mayor de plantas suspendidas requiere sectorizar el núcleo de hormigón.





La fotografía anterior izquierda muestra las torres de Rumasa durante su construcción en 1976. Pueden apreciarse el núcleo de comunicaciones y las grandes ménsulas de las cuales penderían los tirantes de soporte de los forjados. La fotografía central muestra las torres terminadas, con las plantas suspendidas de los tirantes, que dejan libre la zona inferior.

La fotografía de la derecha corresponde al mismo concepto de núcleo central realizado con anterioridad y a mayor escala. Se trata del conjunto Marina City de Chicago. Está formado por dos torres comerciales y de apartamentos de 65 plantas y 179 m de altura. Son también conocidas, por su morfología peculiar, como “las mazorcas” (v. foto inferior izquierda). En este caso, las plantas no están suspendidas, sino apoyadas en pilares perimetrales.



Fueron diseñadas en 1959 por el arquitecto Bertrand Goldberg (1913-1997) y terminadas en 1964. La fotografía de la derecha muestra la existencia de un pequeño puerto deportivo y la inteligente solución del aparcamiento mediante una rampa helicoidal continua ventilada. La presencia de nivel freático justifica plenamente la solución adoptada, ejemplo que no siempre es seguido en otras actuaciones.

Tipología de tubo externo

Este tipo de estructura ofrece altas prestaciones estructurales frente al viento y a los sismos, puesto que las secciones resistentes se desplazan hacia el perímetro; con ello, se incrementa el momento de inercia global con respecto a las soluciones centralizadas y se libera de columnas el espacio central.

Si bien las prestaciones estructurales de un tubo externo son indiscutibles frente a otras soluciones, la evidencia de la estructura en la fachada, incluidas las cruces de San Andrés, supone priorizar la eficiencia por encima de la estética. Los edificios así concebidos presentan una imagen de carácter más industrial que terciario o residencial.

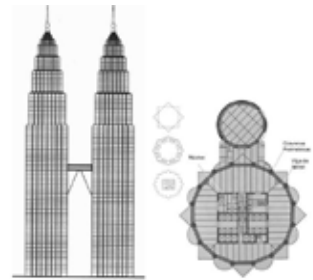
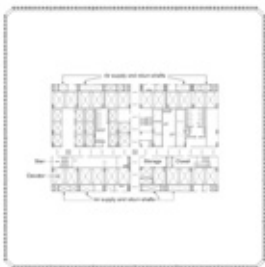


Como ejemplos, la fotografía superior izquierda corresponde al Hotel Arts de Barcelona, de 154 m de altura y 44 plantas, y la fotografía de la derecha muestra el John Hancock Center de Chicago, de 344 m de altura y 100 plantas. Su estructura fue culminada en 1968 bajo la dirección del ingeniero civil Fazlur Khan (1929-1982) y el arquitecto Bruce Graham (1925-2010), y constituye una referencia tipológica a considerar en la construcción de edificios de más de 300 m de altura. A partir de los datos expuestos, puede concluirse que, en el caso del Hotel Arts, el sistema estructural de tubo externo utilizado en su construcción queda muy por debajo de sus prestaciones potenciales.

Tipología de doble tubo

Esta tipología estructural permite muy altas prestaciones. Como su nombre indica, responde a la disposición de dos tubos concéntricos con funciones específicas. El tubo exterior se encarga, fundamentalmente, de la absorción de los empujes del viento y los sismos, así como de recibir las cargas transmitidas por los forjados perimetrales. El tubo central, en cambio, absorbe casi exclusivamente las compresiones de los forjados y queda liberado de la absorción de los esfuerzos horizontales.

Las Torres Gemelas de Nueva York, que superaban los 400 m (v. foto superior derecha, gráfico inferior izquierdo y foto central), respondían a este tipo estructural, al igual que las Torres Petronas de Kuala Lumpur, de 452 m de altura (v. gráfico inferior derecho). Obsérvese que ambos edificios tienen en común un tupido tramado estructural exterior, perfectamente trabado horizontalmente, que forma una sólida retícula.





La fotografía central anterior permite apreciar que en el vestíbulo de las Torres Gemelas se producía la concentración de las cargas de tubo de la fachada mediante el desvío y la unificación, en grupos de tres, de los perfiles estructurales de la fachada. Ello permitía disponer de espacios diáfanos entre soportes en la planta baja para facilitar los accesos.

Tipología de haz de tubos

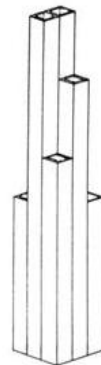
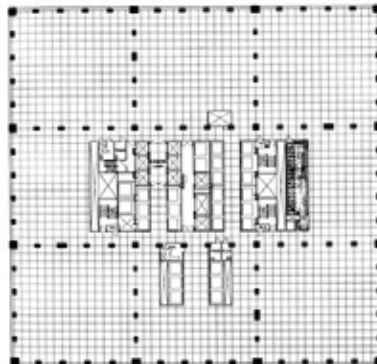
El sistema de haz de tubos, por sus extraordinarias prestaciones estructurales, es el empleado en los edificios de más altura.

Conceptualmente, esta tipología estructural se inspira en los tejidos leñosos, propios de los troncos de los árboles. Estos son altamente resistentes a los esfuerzos del viento. Vista al microscopio, la sección transversal de un tronco muestra un conjunto de tubos de dimensiones homogéneas, enlazados entre sí, por los que discurre la savia.

Salvando las distancias, la misma disposición espacial es empleada en las estructuras de haz de tubos para modular la planta. Este modulado configura los espacios edificados y permite ir reduciendo paulatinamente, en función de la altura, la superficie de la planta sin menoscabo estructural, puesto que los tubos se afianzan unos en otros. De este modo, se reducen los efectos del pandeo y se ofrece una respuesta conjunta de toda la estructura a los esfuerzos frente al viento y los sismos.

Un ejemplo de este tipo de construcción es el edificio Sears de Chicago, también diseñado por el ingeniero civil Fazlur Khan y el arquitecto Bruce Graham.

El edificio, terminado en 1973, consta de 108 plantas y alcanza una altura de 442 m (v. foto inferior izquierda). Dispone de una superficie construida de 279.000 m², destinados a oficinas. La planta está formada por un cuadrado perfecto de 75 m de lado. Como puede apreciarse en el gráfico inferior, este cuadrado está modulado estructuralmente por medio de nueve tubos de 25 × 25 m totalmente diáfanos, lo que permite una total libertad para configurar los espacios resultantes.





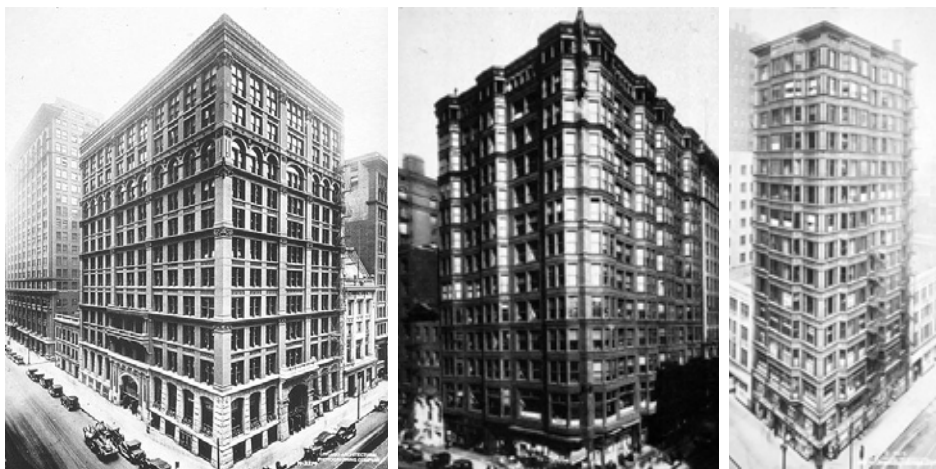
La disposición espacial de los tubos estructurales en altura es la siguiente; hasta la planta 50, se conservan los nueve tubos; hasta la planta 66, llegan siete tubos; de la 66 a la 90, quedan 4 tubos, y, de la planta 90 hasta la 108, quedan solo dos tubos, como muestra el gráfico de la derecha.

4.3. En relación con la altura y la esbeltez

La consideración de un edificio como “alto” o “esbelto” varía en función de su época de construcción y de las proporciones entre las dimensiones de su base y las de su altura.

El primer edificio catalogado como rascacielos, el Home Insurance Building, proyectado por William Le Baron Jenney (1832-1907) y construido entre 1884 y 1885, constaba de diez plantas, soportadas por una estructura de acero (v. fotografía inferior izquierda). Fue demolido en 1931.

Le siguieron, dentro de la llamada Escuela de Chicago, edificios como el Tacoma Building, de 13 plantas, de William Holabird (1854-1923) y Martin Roche (1853-1927) (Holabird & Roche), construido en 1889 (v. foto central), o el Reliance Building, de 15 plantas, construido entre 1890 y 1895 por Daniel Hudson Burnham (1846-1912) y John Wellborn Root (1850-1891), de Burnham & Root (v. foto inferior derecha). Conforme a los parámetros actuales, los edificios citados no tendrían la calificación de rascacielos.

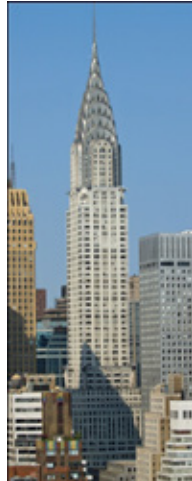


A principios del siglo xx, el estándar de “edificio en altura” estaba reservado para aquellos que superaban las 30 plantas. En la actualidad, por convención, el límite inferior para que un edificio en altura sea calificado como “rascacielos” se sitúa en los 150 m de altura y se extiende hasta los 300 m. Por encima de esta cota, los edificios tienen carácter de excepcionalidad.



Durante el período comprendido entre 1900 y 1930, el desarrollo de edificios cada vez más altos fue vertiginoso. En 1907, la Metropolitan Life Insurance Company Tower de Nueva York alcanzaba las 50 plantas y los 213 m de altura, mediante una torre de inspiración veneciana (v. fotografía inferior izquierda).

En 1930, se superaron los 300 m de altura, con la puesta en servicio del Chrysler Building, de 77 plantas y una altura de 319 m (v. fotografía central). La carrera culminó, en esta primera etapa, en 1931 con la inauguración del Empire State Building, de 381 m de altura y 102 plantas (v. fotografía inferior izquierda), que se convirtió en el edificio más alto del mundo hasta 1972, cuando fue superado por las Torres Gemelas del World Trade Center, de 110 plantas y 415 y 417 m de altura, respectivamente, desaparecidas en los atentados del 11 de septiembre de 2001.



A partir de los años ochenta y hasta la crisis financiera del 2007, la construcción de edificios en altura experimentó un crecimiento exponencial, con una capacidad de adaptación a los nuevos tiempos y con un discurso justificativo realmente sorprendente.

En las páginas web de afamados estudios de arquitectura especializados en la construcción de edificios altos, se adopta la sostenibilidad por bandera. Se hace especial hincapié en los ahorros energéticos obtenidos con respecto a los modelos precedentes, mediante la introducción de determinados criterios de diseño, dando por descontado que la construcción en altura es la única alternativa viable.

La realidad es que no existen estudios analíticos que permitan comparar los costes y los impactos ambientales, urbanísticos y de construcción de las diferentes soluciones constructivas. En las condiciones descritas, las decisiones con respecto a los modelos de crecimiento urbano tienen más peso político que



técnico. Es preciso introducir modelos de simulación eficientes para racionalizar la toma de decisiones y preservar el medio ambiente y la economía.

Un interesante modelo alternativo lo ofrece la Illa Diagonal de Barcelona (v. fotografía inferior izquierda), inaugurada en 1993, según el proyecto realizado por Rafael Moneo (1937) y Manuel de Solà-Morales (1939-2012).

Dispone de una superficie de oficinas de 48.000 m² y un aparcamiento para 2.400 vehículos. La superficie destinada a uso comercial es de 35.000 m², dispuesta en tres plantas (v. fotografía inferior derecha). La planta cero, al nivel de la avenida Diagonal, está enlazada con la planta superior y la planta sótano mediante una calle interior.

La planta sótano cuenta con un acceso a la calle mediante un paso inferior bajo la avenida Diagonal que une los distritos de Les Corts y Sarrià-Sant Gervasi. Con sus 334 m de longitud de fachada, fue planteado por sus propios diseñadores como “un rascacielos acostado.” El conjunto se completa con una zona verde de 13.500 m².



Retomando el hilo de los edificios en altura, los estudios realizados siguiendo los parámetros extraídos de las disponibilidades tecnológicas actuales concluyen que el “límite de lo razonable” se agota en las 80 plantas, equivalentes a una altura máxima de 300 m. Posiblemente, la mitad de plantas y de esta altura señalarían el punto óptimo. En esta línea, se encuentran la Torre Mapfre y el Hotel Arts de Barcelona (v. fotografías en la página siguiente izquierda y derecha, respectivamente).

Como puede observarse, las potencialidades de la construcción tecnológica superan en mucho las necesidades reales. Por ello, es preciso calibrar muy bien entre lo que *se puede* construir y lo que *se debe* construir.

La esbeltez es un factor a considerar por la incidencia de los esfuerzos horizontales derivados de los efectos del viento y los sismos en aquellos edificios en que la proporción de la dimensión menor de la base con respecto a la altura es igual o superior a cinco, pues, en estas circunstancias, los efectos de los esfuerzos horizontales son tan significativos como las cargas gravitacionales.



La estructura de un edificio alto y, a la vez, esbelto está sujeta a los efectos gravitatorios y, además, a los esfuerzos horizontales correspondientes a los efectos combinados del viento y los sismos. Ello supone que el edificio, en su conjunto, debe comportarse como una gran viga en voladizo anclada en el suelo.

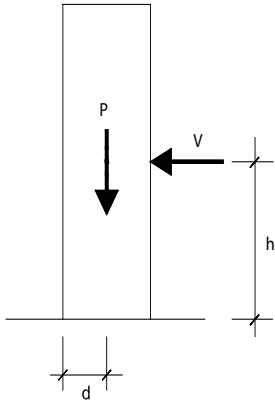
El efecto del viento, como carga dinámica, varía de dirección e intensidad en función del tiempo. Toda vez que el viento, al incidir sobre un edificio, se comporta mecánicamente como un fluido, la presión dinámica producida por este es máxima en la zona central de la fachada y va disminuyendo en los bordes. La presión dinámica del viento está regulada normativamente por el Código Técnico de la Edificación (DB SE: Seguridad Estructural, apartado 2: Acciones en la edificación).

A efectos del cálculo global del equilibrio del edificio frente a los esfuerzos del viento, se considera que este actúa en dirección horizontal y en el plano medio de la fachada. El producto del esfuerzo total del viento por su brazo mecánico, $M_v = V \cdot h$, ha de ser equilibrado, en cada uno de los ejes principales, considerando únicamente el peso propio del edificio (sin considerar las sobrecargas de uso), $M_{cv} = P \cdot d$, según se muestra en el gráfico siguiente.

En él se ilustra la situación de equilibrio límite sobre la cual se le aplica un coeficiente de seguridad, cuyo valor ha de ser superior a 1,5 en cada uno de los ejes principales del edificio, para garantizar la estabilidad frente al viento. Como es fácil de intuir en el gráfico, el efecto del viento sobrecarga los pilares del lado opuesto de la fachada que lo recibe y descarga los de la fachada sometida a su acción directa. Ello supone que la estructura ha de estar diseñada y construida para recibir ciclos de carga y descarga a lo largo de su vida útil.



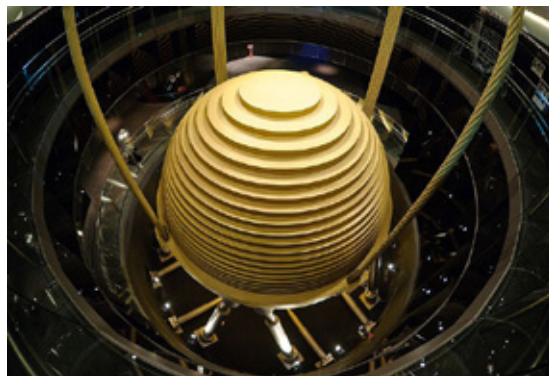
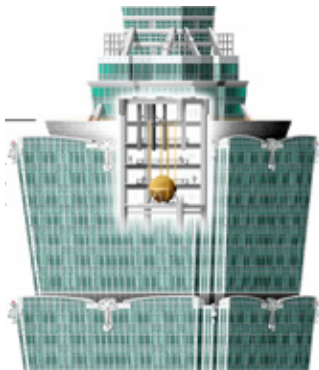
En función de lo expuesto, la sensibilidad a los esfuerzos horizontales de un edificio no depende tanto de su altura como de su esbeltez, puesto que de ella depende la longitud del brazo mecánico para contrarrestarlo.



La fotografía superior central muestra la Torre Ejecutiva Pemex, de 214 m de altura, construida en la Ciudad de México entre 1976 y 1982. Su ratio anchura/altura es de 1:6, de modo que puede considerarse un edificio esbelto. El esquema situado a su derecha muestra el perfil del Empire State Building, terminado en 1931, cuya antena alcanza los 449 m de altura, es decir, más del doble que la torre mexicana, si bien su ratio anchura/altura es solo de 1:3,5. Por ello, puede afirmarse que el edificio neoyorquino es un edificio alto, pero no esbelto.

En los edificios muy esbeltos, con períodos de oscilación superiores a un segundo, se recurre, gracias a las tecnologías más recientes, a la adopción de masas amortiguadoras que, en función de su inercia, compensan los efectos derivados de viento y los sismos.

El gráfico inferior izquierdo corresponde a la zona de coronación del edificio Taipei 101 terminado en 2013, denominado así porque dispone de 101 plantas sobre rasante, además de 5 bajo rasante. Sus 508 m de altura lo convirtieron en el edificio más alto del mundo hasta que en 2004 fue superado por el Burj Dubái.





En el gráfico puede apreciarse una masa esférica de acero de 5,50 m de diámetro, cuyo peso es de 660 t. Dicha masa está suspendida mediante cables de la planta 91, a 390,60 m de altura, y termina en la planta 87.

Mediante este dispositivo, el edificio está preparado para resistir, sin sufrir daños, vientos de hasta 216 km/h y sismos de grado 7 de la escala internacional. Ello podría suceder cíclicamente hasta 2.500 veces al año, es decir, un promedio de entre seis y siete veces al día. La foto anterior derecha permite apreciar que la esfera está constituida por 41 pletinas de acero superpuestas, de 125 mm de espesor cada una de ellas.

El afianzamiento del edificio en el suelo está garantizado por medio de 380 pilotes de 80 m de longitud y 150 cm de diámetro, empotrados 30 m en el lecho rocoso, con una capacidad de carga de entre 1.000 y 1.320 toneladas cada uno de ellos, lo cual lo convierte en uno de los edificios más seguros del mundo frente a acciones combinadas de viento y sismos, a pesar de su tamaño y esbeltez. (v. página 80).

4.4. Los edificios en altura como laboratorio experimental de la construcción

La construcción, en cada época, de edificios que superan la altura de los anteriores supone abordar nuevos retos. En todo caso, es preciso conocer y analizar las experiencias anteriores, para buscar su perfeccionamiento, o bien su abandono, si fuera preciso, con el propósito de conseguir mejores prestaciones. Dentro de lo posible, se pretende “construir más con menos”, parafraseando a Mies van der Rohe.

En este apartado, se exponen los aspectos más relevantes de la construcción o relacionados con ella, que se ha puesto en práctica a partir de los requerimientos de los edificios en altura. Se excluyen, para evitar redundancias, los conceptos tratados en el apartado correspondiente a la construcción tecnológica bajo el epígrafe “El desarrollo de nuevos materiales, de mayores prestaciones y más fiables, propiciados tanto por la industria química como por la metalúrgica”.

Sobre esta base, el esquema de la exposición es el siguiente:

- El conocimiento del comportamiento mecánico del suelo y su incidencia en el desarrollo de la construcción bajo rasante
- Presente y futuro. El hormigón armado de alta resistencia, combinado con encofrados herramienta
- Desarrollo de aplicaciones de energía eléctrica
- Seguridad y mantenimiento
- Modulación, flexibilidad y ergonomía



4.4.2. El conocimiento del comportamiento mecánico del suelo y su incidencia en el desarrollo de la construcción bajo rasante

Para explotar al límite las posibilidades, tanto de los materiales como de los sistemas constructivos, impuestos por la construcción en altura, es necesario, en primer lugar, controlar el comportamiento mecánico del suelo, más allá de los procedimientos empíricos, conocidos desde la época romana, derivados de los conceptos de carga y de tensión.

Es preciso considerar que, en un edificio alto y esbelto, los esfuerzos frente al viento y los sismos asumen valores tanto o más significativos que los gravitatorios. Ello se traduce en oscilaciones sustantivas del estado de carga de los soportes que, a su vez, inciden directamente sobre el suelo. No controlarlos podría provocar la ruina del edificio. Por el contrario, estimaciones excesivamente conservadoras supondrían asumir sobrecostes e impactos ambientales innecesarios.

La parametrización del comportamiento mecánico del suelo se debe a Karl von Terzaghi (1883-1963). En 1925 publicó *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage* (Mecánica de suelos). Esta obra creó escuela al poner de manifiesto que el colapso del suelo se produce por efecto de los esfuerzos cortantes. Es la base de trabajos posteriores, tanto del propio Terzaghi como de otros muchos autores, que han permitido alcanzar con seguridad y eficiencia grandes logros en el ámbito de la edificación, entre otros.

A mediados de los años cuarenta del siglo xx, los conocimientos sobre mecánica de suelos se extienden gracias a la aparición de nuevos aparatos de prospección y de medida. La disposición de laboratorios asociados y de programas de formación de técnicos ha incidido directamente en el desarrollo de los sistemas de cimentación y contención de tierras, y ello ha permitido construir edificios más audaces.

La parametrización del comportamiento mecánico del suelo ha incidido en la construcción de edificios en altura, en tres aspectos fundamentales:

- Cimientos especiales
- Muros pantalla
- Anclajes inyectados al terreno

No es el propósito de este trabajo realizar descripciones prolijas de cada uno de los apartados indicados, por lo que simplemente se harán breves referencias a los mismos.

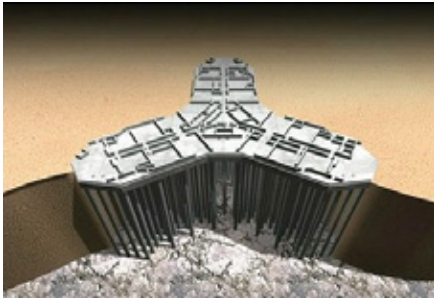
Cimientos especiales

Los edificios en altura comportan la concentración puntual de grandes cargas. Su transmisión al terreno se resuelve mediante pilotajes. El pilotaje con postes



de madera es una técnica ya conocida por los romanos y aplicada ininterrumpidamente a lo largo de la historia.

Desde principios del siglo xx, gracias al hormigón armado como material estructural y al desarrollo de maquinaria de hinca y de perforación, los pilotajes dieron un gran salto cualitativo, al disponer de sistemas de ejecución adaptables a cualquier tipo de terreno y profundidad. Al mismo tiempo, se incrementaron sus diámetros y, en consecuencia, su capacidad de transmitir cargas. Ello ha posibilitado logros tan destacados como la cimentación del edificio Burj Dubái, de 818 m de altura (en la actualidad, el edificio más alto del mundo), constituido por 192 pilotes de 150 cm de diámetro y 50 m de profundidad hasta empotrarse en el estrato rocoso situado bajo la arena. Las cabezas de los pilotes están unidas a una losa de hormigón armado 3,70 m de canto (v. fotografía inferior izquierda).



Muros pantalla

Desde los años cincuenta, los muros pantalla han contribuido decisivamente a la formación de vasos de edificación seguros, incluso en zonas densamente construidas y con niveles freáticos altos, que son previamente abatidos mediante bombeo. Su aplicación supuso, gracias a su mayor estanquidad y rendimiento estructural, una mejora sustantiva con respecto la construcción de las barreras de pilotes que se empleaban para tales menesteres con anterioridad a su desarrollo (v. fotografía superior derecha).

Anclajes inyectados al terreno

Las primeras referencias de los anclajes inyectados al terreno datan de principios de los años treinta. Los elementos que permitieron su aplicación son los cables de acero de alta resistencia, los carros perforadores, los sistemas de inyección para las lechadas de cemento, los gatos para lograr su tensado, una vez fraguada la lechada, y los sistemas de bloqueo mediante cuñas para mantener la tensión de los cables.

En la actualidad, los anclajes inyectados al terreno se utilizan, junto con los muros pantalla, como parte integrante de los sistemas de contención de los vasos de edificación. También se emplean, por su capacidad de trabajo a tracción, para



equilibrar estructuras frente a esfuerzos ocasionados por el viento o por el efecto gravitatorio en las construcciones tensadas. La fotografía inferior izquierda muestra una fase de perforación de un anclaje. La de la derecha, la colocación de un gato para proceder al tensado.



Presente y futuro. El hormigón armado de alta resistencia, combinado con encofrados herramienta

Si bien el acero se considera el material estructural por excelencia de los edificios en altura, en los últimos tiempos ha cedido terreno al hormigón armado por cuestiones de eficiencia mecánica y sostenibilidad. Basta con citar dos ejemplos: la Torre de Comunicaciones CN de Toronto, de 447 m de altura, terminada en 1976, y la estructura de hormigón del Burj Dubái, que alcanza los 586 m, correspondientes a la planta 156, completada en 2009. Desde dicha cota hasta alcanzar los 828 m de altura, incluida la antena y 7 plantas más dedicadas a usos técnicos, la estructura es de acero.

A la hora de analizar las razones del éxito del hormigón armado de alta resistencia para construir en altura, deben considerarse los aspectos siguientes:

- Las mejoras en la composición de los hormigones para optimizar sus propiedades, tanto por su resistencia como por la facilidad para su puesta en obra, como es el caso, por ejemplo, de los hormigones autocompactantes.
- La existencia de equipos de bombeo con capacidad para llevar el hormigón por encima de los 500 m. Hasta el momento, el récord de bombeo se registró en la construcción del edificio Burj Dubái, a 606 m de altura.
- La disposición de encofrados herramienta, que posibilitan la construcción de núcleos y pantallas con gran estabilidad, relativa ligereza y monolitismo frente a los esfuerzos horizontales. A ellos se ha hecho referencia al tratar de la tipología de núcleo en el apartado relativo a las estructuras de los edificios en altura. La fotografía inferior izquierda muestra el empleo de



encofrados trepantes durante la construcción del edificio Burj Dubái. La fotografía central y la de la derecha corresponden al edificio Intecons, situado en Buenos Aires, Argentina, que consta de 23 plantas, todas ellas destinadas a oficinas. En la fotografía de la derecha puede apreciarse un detalle de la calidad del acabado de la fachada, obtenido directamente del hormigonado *in situ* realizado sobre encofrados trepantes.



4.4.2. Desarrollo de aplicaciones de energía eléctrica

Se ha señalado la celebración de la Exposición Universal de Chicago en 1893 como la fecha de partida de las aplicaciones eléctricas en los edificios, como fuente energética y como fuente de iluminación.

La incidencia que ello ha tenido al posibilitar el desarrollo de edificios en altura y sus posteriores aplicaciones a situaciones más comunes es determinante. Puede afirmarse que, sin el auxilio de la electricidad, entendida como energía limpia y disponible cuando y donde sea necesaria, la edificación en altura resultaría funcionalmente inviable en aspectos básicos, como las comunicaciones verticales, la iluminación, los suministros energéticos para el control ambiental, los sistemas de seguridad o de señales débiles, por citar los más significativos. A ellos se ha hecho referencia al tratar de la construcción científica y tecnológica.

Son destacables los cambios tecnológicos experimentados en los sistemas de iluminación, con soluciones cada vez más "frías" y, por tanto, más eficientes desde el punto de vista energético. Las lámparas de incandescencia de finales de siglo XIX dieron paso, a partir de 1938, a los tubos fluorescentes, cuyo sistema de encendido ha ido evolucionando hacia métodos cada vez más eficientes, desde el más antiguo por precalentamiento, pasando por el instantáneo y, en la actualidad, el electrónico, que es la última aportación en este campo.

Las tres fotografías siguientes muestran tres oficinas abiertas que tienen en común falsos techos y luminarias fluorescentes. Constituyen el final de una etapa, pues pronto serán sustituidas por ledes.



Entre las lámparas fluorescentes de tecnología más reciente, aunque casi ya obsoleta, se encuentran las lámparas fluorescentes compactas (*compact fluorescent lamps* o CFL). Son también conocidas como lámparas económicas o ahorradoras, con una luz y un tamaño similares a los de las lámparas incandescentes, pero con las mismas ventajas de un tubo de luz fluorescente de mayor tamaño. Presentan la ventaja de que pueden sustituir las lámparas de incandescencia sin tener que cambiar las luminarias pues utilizan el mismo casquillo que estas.

La iluminación tecnológicamente más avanzada en función de su rendimiento y de sus posibilidades es la generada por LED, acrónimo de *light-emitting diode* o diodo emisor de luz.

Desde su aparición en 1962 hasta la actualidad, las prestaciones lumínicas de los ledes se han mejorado sustantivamente y de forma imparable, desde la emisión inicial de un débil color rojo hasta alcanzar longitudes de onda visibles muy brillantes, que abarcan los extremos tanto del espectro ultravioleta como de los infrarrojos. Ello permite disponer, en la actualidad, de una amplia gama de combinaciones cromáticas.

Los primeros ledes tenían potencias muy bajas, entre 30 y 60 mW, por lo que sus usos quedaban limitados a los cuadros de instrumentos. Hacia 1999, se introdujeron en el mercado diodos con potencias de 1 W para usos continuos, con disipadores para eliminar el calor generado por el efecto Joule.

En 2002, se comercializaron diodos con potencias de 5 W y una eficiencia lumínica equivalente a la de una bombilla de incandescencia de 50 W, lo que suponía un ahorro energético del 90 %. En la actualidad, se está en el proceso de abaratar la producción e incrementar los rendimientos. Por su bajo consumo energético y por su durabilidad, los ledes están llamados a ser el sistema de iluminación del futuro.

Más allá de los sistemas de iluminación interior y del abastecimiento energético de los servicios, la electricidad ha propiciado una nueva imagen a los edificios en general, y a los resueltos en altura en particular, mediante su iluminación exterior nocturna.



Sirva como ejemplo del paso del tiempo la imagen que ofrecía la coronación del carismático Empire State Building (v. fotografías inferior izquierda y central), antes de disponer, desde mayo de 2012, de un sistema de iluminación mediante ledes similar al de la Torre Agbar (v. fotografía inferior derecha), con capacidad para producir una gama de millones de colores distintos.

La iluminación original del Empire State Building se realizaba mediante 400 lámparas convencionales que, para modificar su color, eran cubiertas manualmente mediante láminas plásticas, lo que limitaba la gama de colores a 10. La nueva instalación está formada por 1.200 nuevos dispositivos, que incluyen un total de 68.000 ledes.



La luz generada por los tubos de neón, por su capacidad para adaptarse a todo tipo de formas y presentar diversidad de colores, ya a mediados de los años veinte fue incorporada a los edificios como reclamo publicitario. Al mismo tiempo, los edificios comerciales empezaron a cubrirse de textos y anuncios luminosos, de modo que, en determinados casos, la arquitectura original de las fachadas ha pasado a un segundo plano al desaparecer bajo una abigarrada mezcolanza de colores.

Las dos fotografías siguientes son un claro ejemplo de ello. La de la izquierda corresponde a la 5ª Avenida de Nueva York, en que la iluminación publicitaria cubre varias plantas de edificios emblemáticos. La de la derecha, perteneciente a una zona comercial central de Tokio, sigue la misma tónica.

En 1925, el arquitecto Hugo Häring (1882-1958), uno de los pioneros en practicar la iluminación de las fachadas de los edificios, ya mencionaba que la cara nocturna de la arquitectura pronto sería más importante que la diurna. Sin que ello haya llegado a constituir axioma, es evidente que ambas imágenes se complementan y enriquecen la visión del paisaje urbano. Disponer de iluminación eficiente potencia las posibilidades de expresión de la creatividad del ser humano al no estar condicionadas por la presencia de luz natural.



Mediante el empleo de proyecciones láser, en la actualidad es posible utilizar las fachadas de los edificios como receptoras y emisoras de todo tipo de efectos lumínicos. Esta técnica denominada *mapping*, incorporada recientemente a la luminotecnia, permite proyectar imágenes de alta definición prácticamente sobre cualquier superficie.

Gracias a su gran superficie, es muy notable el impacto visual sobre los espectadores, que pueden ser muy numerosos si el espacio urbano lo permite. La fotografía inferior izquierda corresponde a un *mapping* efectuado sobre la Casa Batlló; la de la derecha, sobre La Sagrada Família, ambos edificios de Antonio Gaudí (1852-1926) en Barcelona.

Puede afirmarse que con el *mapping* nace una nueva forma de expresión artística, capaz de dar a los edificios en altura unas posibilidades expresivas y de imagen hasta ahora solo intuidas.



4.4.3. Seguridad y mantenimiento

Bajo los conceptos de seguridad y mantenimiento, se agrupan una larga serie de aportaciones constructivas y técnicas, vinculadas tanto a la configuración espacial de los edificios en altura como a sus sistemas de protección activa.



Con respecto a la primera, cabe señalar la distribución en altura de las plantas técnicas; la ubicación, el número y las dimensiones de las vías de acceso y de evacuación; el empleo de esclusas y puertas cortafuegos, las superficies y los conductos destinados a las ventilaciones y a las extracciones de vahos y humos; la disposición de reservas de agua para los sistemas automáticos de extinción; las áreas de accesibilidad restringida, o la creación de zonas especialmente protegidas contra incendios, entre otros.

Los sistemas de protección activa se estructuran mediante detectores vinculados a cuadros permanentes de control, los cuales, a su vez, cuentan con protocolos específicos de actuación contra la intrusión, contra el fuego, así como de gestión de los aspectos derivados de funcionamientos anómalos de las instalaciones.

Como resultado de dicha concepción integradora, se establece una estrecha relación entre la seguridad y el mantenimiento, entendidos como elementos básicos y complementarios para garantizar el funcionamiento correcto de un edificio en altura. Soluciones concebidas inicialmente para edificios en altura, posteriormente han sido aplicadas con éxito para mejorar la seguridad y el mantenimiento de otros edificios más comunes.

Aspectos como la seguridad estructural frente a las explosiones y a los impactos tomaron una nueva dimensión a partir de los atentados del 11-S de 2001 al World Trade Center de Nueva York. Centrar la seguridad de los edificios en altura en situaciones tan excepcionales escapa de los ámbitos de la arquitectura y de la construcción. Dichas situaciones son consecuencia de tensiones políticas y económicas de alcance mundial por lo que deben evitarse en origen.

Puede concluirse que los edificios en altura son tan seguros o incluso más que los edificios convencionales dotados de un nivel de equipamiento de seguridad y de mantenimiento tipo, pero ello tiene un coste que todavía hoy no ha sido suficientemente debatido ni contrastado.

Si se pretende que la construcción sea realmente respetuosa con el medio ambiente, cabe plantear, de manera técnicamente precisa, cuál es el incremento del precio unitario que se produce necesariamente, en función de las diferentes alturas de edificación, en los costes de construcción y de mantenimiento, para garantizar a los edificios en altura un grado de seguridad equivalente a la que tienen los edificios convencionales, diseñados de acuerdo con los estándares normativos actuales.

4.4.4. Modulación, flexibilidad y ergonomía

Cada uno de los aspectos indicados –modulación flexibilidad y ergonomía– aporta por sí solo valor añadido a la calidad de un edificio. La presencia integrada de todos ellos en los edificios en altura supone generar sinergias fácilmente identificables al analizar los aspectos compositivos y constructivos de los mismos.



Modulación

La complejidad orgánica y funcional propia de los edificios en altura ha de apoyarse en la modulación espacial. Ello permite racionalizar tanto los procesos de construcción primaria como el diseño seriado de divisorias y acabados, así como facilitar su interacción y su encaje.

Un ejemplo de ello es la correspondencia entre falsos suelos y falsos techos, mediante la cual se facilita la colocación de divisorias modulares prefabricadas.

Flexibilidad

En un edificio en altura, se distinguen dos tipos de ámbitos en la configuración de las plantas: los concebidos para permanecer prácticamente invariables con el paso del tiempo y las zonas diáfanas.

Las zonas invariables contienen los núcleos de enlace vertical, los vestíbulos y los servicios. Los espacios diáfanos están sometidos, a lo largo de su vida útil, a eventuales cambios para adaptarse fácilmente a nuevas situaciones en la organización de los espacios.

La remoción de las divisorias tradicionales requiere más tiempo y causa más molestias de las necesarias, en forma de ruido y producción de polvo. El desarrollo y la experimentación de diversos tipos de divisorias secas, fácilmente montables y desmontables, permiten transformar rápidamente una oficina diáfana en espacios compartimentados, y viceversa.

Actualmente, las divisorias para oficinas, ampliamente experimentadas, ofrecen un extenso surtido de posibilidades, calidades y acabados en función de los requerimientos propios de cada situación: transparentes, opacas o mixtas son algunas de las opciones posibles.

Ergonomía

Los primeros edificios en altura fueron promovidos por corporaciones financieras o industriales. Se proyectaron y construyeron con el propósito de crear lugares de trabajo capaces de potenciar la eficiencia y la calidad del trabajo de sus empleados.

El desarrollo de la ergonomía y su integración en el diseño arquitectónico permitieron adaptar la modulación general de los edificios a las dimensiones óptimas de cada puesto de trabajo tipo y su equipamiento.

Aspectos como las alturas de las mesas, las sillas y los mostradores, o las dimensiones de los armarios, los archivadores y las máquinas de las oficinas se diseñan, desde entonces, para garantizar la comodidad de acceso y uso, conjugada con el máximo aprovechamiento del espacio útil disponible.



La disposición de espacio y de equipos adecuados es una condición necesaria pero no suficiente para crear entornos de trabajo eficientes. Las ciencias de las relaciones humanas y la psicología aportan su experiencia en numerosos aspectos definidores del ambiente de trabajo, como los colores de la decoración y del mobiliario, la intensidad y la temperatura de color de la iluminación, la jerarquía y la privacidad de los puestos de trabajo, la imagen corporativa o la música ambiental.

Desequilibrios y desajustes en los aspectos citados contribuyen, sin duda, a generar situaciones de conflicto e inciden en el rendimiento general de los trabajadores.

En la actualidad, mediante la decantación de las experiencias acumuladas a lo largo del tiempo, se dan por hechos y se aplican de forma sistemática y como estándares aspectos y criterios relativos a la decoración y al diseño de mobiliario de oficina, y a los puestos de trabajo en general. Téngase en cuenta que, en su origen, tales experiencias se gestaron como consecuencia de los requerimientos propios de los edificios en altura.

4.5. Tres edificios, tres planteamientos, tres soluciones constructivas: Turning Torso, Torre Agbar y Gherkin

A continuación, se exponen algunos aspectos relativos a las premisas de partida, de diseño y de construcción de tres edificios prácticamente coetáneos en el tiempo pero absolutamente distintos en sus planteamientos y en sus resultados.

Su diversidad es muestra de creatividad y, al mismo tiempo, de dispersión de esfuerzos. Ello supone desaprovechar energías de toda índole, que podrían destinarse a fines más productivos.

La realización de los tres edificios aportará valor añadido si del análisis de las experiencias de tres modelos únicos puede surgir un cuarto modelo, más económico, eficiente y seguro que sus precedentes.

Mediante la repetición controlada del modelo que resulta del proceso de análisis-crítica-síntesis, evitando caer en el adocenamiento, se verá incrementada la eficiencia de su construcción, con el consiguiente ahorro económico y energético.

4.5.1. Turning Torso

Esta obra de Santiago Calatrava (1951) fue inaugurada el 27 de agosto de 2005, después de cuatro años de construcción.

El origen del edificio se remonta a 1999 y el detonante había sido una escultura realizada por Calatrava en 1988, denominada *Twisting Torso*. En la misma (v. fotografía izquierda, esbozos y central de la página siguiente), una serie de cubos ascendían girando en el espacio hasta conformar una torre, a modo de torso



humano. Johnny Örbäck, entonces director gerente de la cooperativa sueca de viviendas HSB, atraído por la escultura pidió al arquitecto que realizara un edificio basado en la aplicación del giro a la composición de un edificio residencial. El lugar de emplazamiento sería la localidad de Malmö. La imagen inferior derecha muestra el edificio terminado junto con unos primeros esbozos. El proyecto se desarrolló entre 1999 y 2001. Las obras se llevaron a cabo de 2001 a 2005



Una de las razones que justifican el carácter escultórico deseado para el Turning Torso fue la voluntad política de restablecer la imagen internacional de Malmö. Cabe recordar la repercusión que tuvo, en 1997, la apertura del Museo Guggenheim de Bilbao, ciudad industrial en proceso de reconversión a usos terciarios.

En el caso de Malmö, se pretendía dar un nuevo impulso a una zona industrial obsoleta y degradada, situada junto a las orillas del Báltico, que anteriormente había sido ocupada por unos astilleros. El objetivo era crear un distrito de uso mixto, con viviendas, restaurantes, oficinas, un puerto deportivo y un campus universitario.

Una de las señas de identidad originales de dicho entorno era el puente grúa de la empresa Kockum, desmontado en 2002. Estaba ubicado a menos de 1 km del emplazamiento del Turning Torso, nuevo hito visual de la zona.

Datos técnicos

Los datos técnicos más relevantes del Turning Torso son:

- Superficie construida total: 32.400 m²
- Superficie útil total: 18.000 m², el 56 % sobre la superficie edificada. Ello supone dedicar el 44 % a servicios, estructura y divisorias
- Superficie residencial: 13.500 m² (147 apartamentos)

- Superficie de oficinas: 4.000 m² (situadas en los dos primeros módulos)
- Altura: 190 m, 54 plantas. Nueve módulos de seis plantas cada uno. Ello supone una altura de 3,50 m/planta

El edificio se desarrolla a partir de un núcleo de hormigón armado, asentado sobre una caja cilíndrica de 15 m de profundidad y 30 m de anchura, que reposa sobre un lecho de piedra caliza.

El núcleo mantiene interiormente un diámetro de 10,60 m. El espesor de los muros es decreciente progresivamente desde los 2,50 m de la base a los 0,40 m de la coronación. Las fotografías inferiores permiten contemplar dos fases de la construcción del edificio a partir del núcleo central.



Los forjados están constituidos por losas de hormigón pretensado hormigonadas *in situ*. Están anclados al núcleo central y a la columna tubular, planta a planta, en la zona de mayor proximidad y mediante un sistema de tornapuntas que unen las últimas plantas de cada uno de los módulos.

Son conocidos los problemas de construcción derivados tanto de su complejidad formal como de los déficits y las inconcreciones del proyecto. Ello supuso atrasos en la ejecución e incrementó de coste con respecto al proyecto inicial. A la vista de todo ello, cabe cuestionarse una serie de aspectos que se exponen en los apartados siguientes.

¿Era necesaria una planta pentagonal?

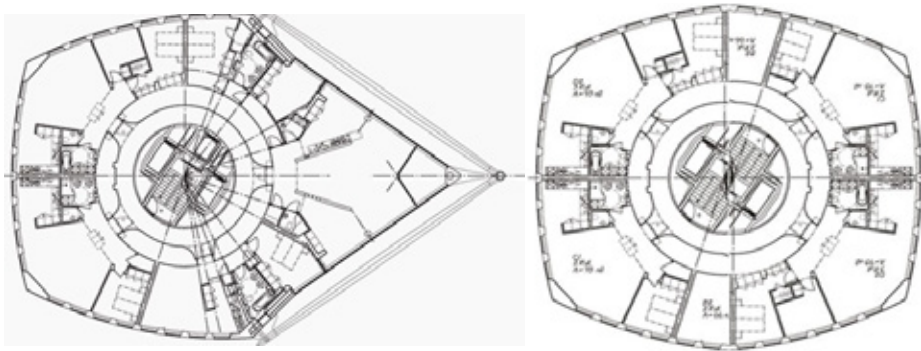
Obsérvese que, en los primeros esbozos y en la escultura, los módulos giratorios son cubos perfectos (v. fotografías anteriores). En la solución final, las plantas son ligeramente curvadas, con vuelos distintos en los ejes principales, de aproximadamente 6,50 m en el eje de abscisas y 5,15 m en el de ordenadas (v. gráfico siguiente izquierdo).



Siendo estos vuelos importantes, pueden realizarse perfectamente con las posibilidades tecnológicas de los forjados postensados. Incluso se habrían podido incrementar para aumentar la superficie de la planta. Como referencia, en la planta 36 de la Torre Agbar el forjado postensado vuela unos 10 m, puesto que queda exento con respecto al plano de fachada.

De todo ello, se concluye que habría sido posible construir toda la torre con una planta simétrica, sin necesidad del pilar helicoidal exterior y del conjunto de tornapuntas, como se muestra en el gráfico de la derecha. De esta forma, se habría sido más fiel al planteamiento formal inicial. Igualmente, se concluye que la planta pentagonal no solo resulta innecesaria, sino que además genera espacios irregulares.

La extensión longitudinal de la planta en el eje de abscisas solo se justifica desde el punto de vista formal. Al ser mayor el radio de giro, queda acentuada la forma helicoidal del pilar.



¿Es necesario el pilar helicoidal exterior?

La irregularidad introducida por la planta pentagonal, si bien permite incrementar en unos 30 m² la superficie con respecto a la planta simétrica grafiada en el ángulo superior derecho, no justifica la necesidad del pilar helicoidal. Este es más bien un elemento estético que estructural.

La fotografía inferior izquierda muestra que la construcción del sistema estructural exterior iba muy por detrás con respecto a la de los forjados. Obsérvese, además, en la fotografía inferior derecha y en la planta correspondiente al gráfico superior, que el sector triangular está soportado por tres pilares, los dos laterales y el situado frente el pilar externo. A ello debe añadirse el conjunto formado por el pilar helicoidal externo y las tornapuntas.

La ligereza del pilar helicoidal exterior y de las tornapuntas muestra que su función estructural es meramente estabilizadora y, de ningún modo, sustentante. Con toda seguridad, se trata de elementos estructuralmente prescindibles, si se



refuerzan los tres pilares de la zona triangular a los cuales se ha hecho referencia, o bien se realiza una planta con dos ejes de simetría, como la propuesta en el párrafo anterior.



De acuerdo con lo expuesto, se concluye que el pilar helicoidal y los sistemas de tornapuntas podrían ser estructuralmente prescindibles.

¿Además del aspecto estético, el giro de las plantas supone alguna aportación funcional y/o constructiva?

Mediante el giro de 90° , resulta evidente que tan solo uno de los módulos tendrá orientación y vistas óptimas.

El giro de los módulos, sumado a la forma curvilínea de las plantas, fue una fuente de conflictos en los cerramientos durante la construcción, puesto que la superficie de la fachada no responde a ninguna geometría reglada alabeada.

Una vez más, se traiciona voluntaria o involuntariamente, a favor de una pretendida estética, el modelo inspirador. Este está formado por cubos cuyas caras verticales son paraboloides hiperbólicos.

Puede concluirse que el modelo escultórico es mucho más racional y simple de construir que el edificio que se llevó a cabo. También habría sido más bello.

Es evidente que el giro de los módulos no supone ninguna aportación funcional y que hace más compleja la construcción del edificio. Debe reconocerse, con todo, el valor estético añadido de la propuesta, aunque un somero análisis de la forma en que se llevó a cabo muestra, más que lagunas, un terreno pantanoso.

Como conclusión final, un caso como el estudiado pone de manifiesto que el hecho de no disponer de auditorías de proyecto independientes posibilita que se inviertan en una obra ingentes esfuerzos y dinero, cuya traducción a la realidad acaba pasando desapercibida.



¿El resultado funcional del edificio es satisfactorio?

El edificio parte de un planteamiento conceptual en la altura de las plantas que acaba siendo una fuente de problemas. La distancia de suelo a suelo es de 3,50 m. Para un edificio en altura destinado a oficinas, se requieren entre 4 y 4,20 m entre forjados. La altura reducida entre plantas condiciona negativamente el paso de las instalaciones. A favor del edificio, cabe indicar que el uso de vivienda no resulta tan exigente como el de oficinas, a los efectos de disponer de espacios en los falsos techos para el paso de las instalaciones; de todos modos, los dos primeros módulos son de oficinas y tienen la misma altura entre plantas.

La fotografía inferior izquierda muestra varios aspectos que inciden negativamente en las prestaciones funcionales, entre ellos:

- Los espacios habitables que resultan entre el núcleo central y el perímetro de la planta son muy forzados.
- Al no haber altura libre entre las plantas para incorporar los equipos de aire acondicionado, solo se dispone de radiadores para el control ambiental interior, fotografía inferior izquierda. Ello, además de ofrecer unas prestaciones limitadas, proporciona una imagen disonante en un edificio de alto nivel.
- La forma curva de la planta no se adapta a la directriz recta de las piezas que forman la repisa bajo la ventana. La calidad de los acabados no es acorde, en algunos casos, con las pretensiones de su diseño.
- La superficie de ventanas es desproporcionada, en algunas zonas, para las necesidades de la pieza. Por muy bien resuelto que esté el acristalamiento, siempre se produce una mayor pérdida de energía que en las zonas opacas.



Por su parte, la fotografía superior derecha permite apreciar lo reducido que resulta el espacio destinado a uno de los dormitorios, con la cama pegada a la



pared y unas simples repisas a modo de mesitas de noche. Obsérvese también la pilastra alabeada que aparece junto a la cabecera de la cama.

A partir de lo expuesto, cabe entender que, más por su singularidad que por sus prestaciones reales, el Turning Torso recibió el premio del MIPIM en la Feria de la Construcción de Cannes (Francia) de 2005 al mejor edificio residencial del mundo.

4.5.2. Torre Agbar. Aspectos generales

Es obra del arquitecto francés Jean Nouvel (1945). El encargo lo realizó la inmobiliaria Layetana, con el propósito de ofrecer el edificio al mercado en venta o en alquiler.

La inmobiliaria planteaba la necesidad de crear un edificio emblemático en una zona de nueva proyección de la ciudad, con la intención de aportar valor añadido a su producto.

A diferencia del encargo Turning Torso, en la Torre Agbar no se pretendía situar la marca Barcelona en el mapa, toda vez que, desde las Olimpiadas de 1992, esta está plenamente consolidada. El propósito principal era realizar un edificio acorde con las expectativas y las necesidades de una corporación de primer nivel en el marco de la ciudad de Barcelona.

En la actualidad, es propiedad del grupo multinacional Agbar. El proyecto se desarrolló entre 1999 y 2001, y las obras, de 2001 a 2005.

Sus datos técnicos más relevantes son:

- Altura: 141,50 m
- Número de plantas: 38, cuatro de ellas bajo rasante. Las dos primeras plantas bajo rasante están ocupadas, fundamentalmente, por un auditorio con capacidad para 316 localidades. Las dos inferiores se destinan a aparcamiento.
- Las 34 plantas sobre rasante tienen los usos siguientes: 28 plantas de oficinas, 3 plantas técnicas, 1 planta para usos polivalentes (planta 14), 1 planta destinada a cafetería (planta 15) y 1 planta mirador, situada directamente bajo la cúpula.
- Las superficies construidas son las siguientes:
 - 30.000 m² de oficinas
 - 3.210 m² de plantas técnicas
 - 8.351 m² de auditorio y servicios
 - 9.132 m² de aparcamiento.



La superficie total construida es de 50.603 m².

- La piel exterior del edificio está constituida por 59.619 lamas de vidrio de 120 × 30 cm, 21.463 m² que cubren una superficie de 16.000 m². Ello supone un solapamiento entre lamas del 34,14 % con respecto a la superficie total.
- 4.359 aberturas y 4.500 ventanas elaboradas a partir de un módulo de 92,5 × 92,5 cm se encuentran en el cilindro exterior de hormigón armado para permitir el paso de la luz natural.
- Comunicación vertical mediante ocho ascensores. Los seis perimetrales llegan hasta la planta 24.
- 4.500 ledes que permiten ofrecer una imagen cromáticamente dinámica del edificio, lo que permite caracterizarlo.

Cimentación y estructura

La cimentación está formada por muros pantalla continuos de espesores que oscilan entre los 65 y los 80 cm, dispuestos según el perímetro de la planta. Alcanzan profundidades de entre 14 y 25 m, y se asientan sobre el estrato margoso. En situaciones extremas, descargan hasta 450 t/ml.

La planta de la torre es elíptica, con un eje mayor de 39,40 m y un eje menor de 35,42. Ello supone una superficie construida de 1.100 m² por planta.

En su perímetro exterior, está definida mediante un muro estructural de hormigón armado, de 35 N/mm² de resistencia característica, cuyo espesor disminuye, por tercios, de 50 cm en la base a 30 cm en la coronación, en la cota 110 m (planta 26).

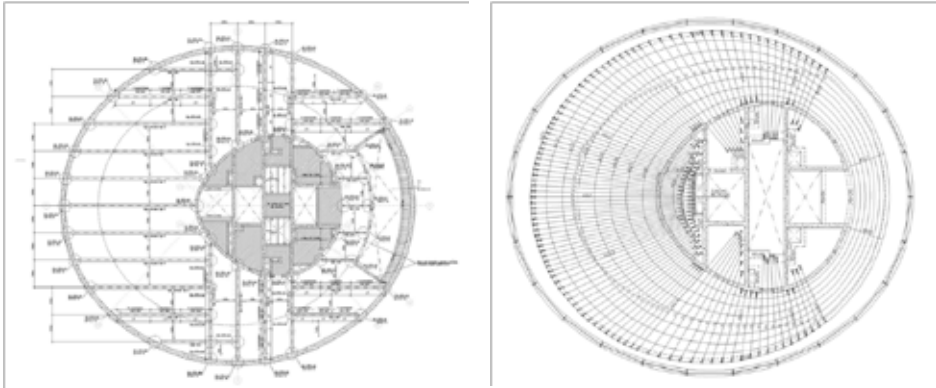
La estructura vertical se completa con un núcleo interior de forma ovoide, cuyo centro de gravedad coincide con el eje mayor de la elipse. El espesor de sus muros es de 50 cm en la base y de 30 en la coronación. El ovoide está desplazado con respecto a la intersección de los ejes de la elipse hacia la batería principal de ascensores situada en el perímetro de la planta. De esta forma, se libera un espacio diáfano mayor en la zona opuesta. La superficie útil en cada planta tipo es de 750 m².

El espacio entre ambos muros de hormigón armado es cubierto mediante jácenas metálicas, situadas cada 3 m. Sobre ellas, se coloca un forjado colaborante, unido a las jácenas mediante conectores (v. fotografía de la página siguiente izquierda).

A partir de la cota 110 m, el sistema estructural se modifica: las cinco plantas siguientes emergen en voladizo desde el núcleo central hasta alcanzar la cota

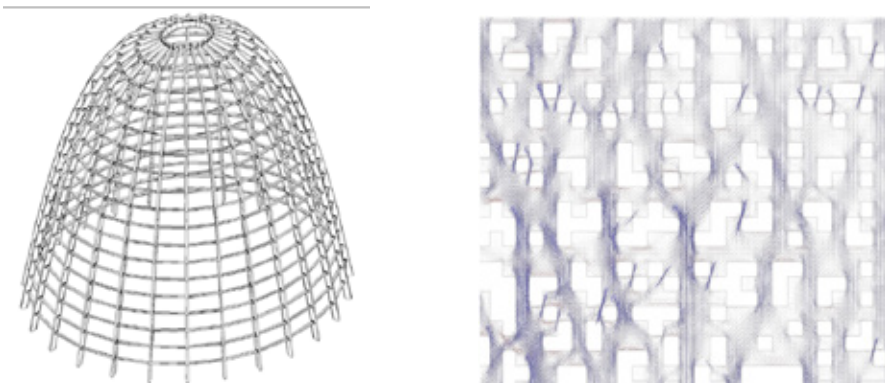


132 m. Cabe destacar el vuelo máximo del forjado, correspondiente al techo de la planta 26, que alcanza, mediante la técnica del postensado, los 10,20 m, con un canto máximo de 50 cm en la zona de apoyos y que decrece hasta los 20 cm en el extremo volado (v. fotografía inferior derecha).



Desde la cota 76,50 hasta la cota 110, el cilindro se reduce y adopta, entre plantas, una forma poligonal. La directriz entre plantas se materializa mediante una línea recta.

Sobre el perímetro de la cota 110 m, se asienta una estructura en forma cupular, constituida por una retícula de perfiles de acero, con un total de 26 meridianos y 19 paralelos (v. fotografía inferior izquierda).



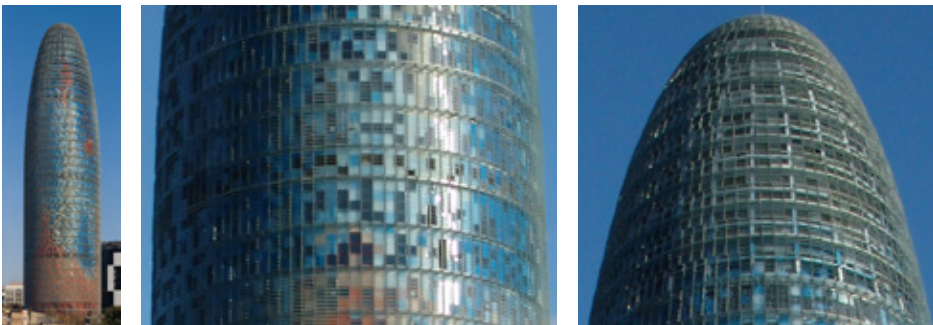
Una de las características singulares del cilindro exterior es que la disposición de las ventanas moduladas mediante cuadrados de 92,5 cm de lado no responde a una disposición de lógica constructiva. Ello produce, en determinados puntos, importantes concentraciones de tensión (v. fotografía superior derecha), que han de ser absorbidas mediante armados especiales (v. fotografía superior izquierda de la página siguiente).



Debido a la distribución aleatoria de los huecos del cilindro exterior de hormigón armado impuesto por el diseño, resultan evidentes tanto el sobreesfuerzo de cálculo como el incremento de tiempo y coste derivado de la aplicación de tal solución.

A la vista de la incidencia de dicha decisión en el resultado estético, tanto interior (v. fotografía superior derecha), como exterior (v. fotografía inferior izquierda), cabe cuestionarse la necesidad de su adopción, más allá del simple afán de notoriedad.

Es preciso valorar que determinadas decisiones de diseño, en ocasiones muy costosas, tienen escasa incidencia en la percepción global del edificio para la gran mayoría de las personas que cada día interactúan, de un modo u otro, con dicho edificio (v. fotografías siguientes).



Ratios

Si se considera un espesor medio del muro de 40 cm, la superficie del mismo es de 46,50 m² por planta. El ovoide central ocupa 216,40 m² y la batería de ascensores perimetrales, 77 m². La superficie resultante que ocupan los muros y servicios en una planta media es de 350 m², por lo que la superficie útil para oficinas es de 750 m². Ello supone una ratio de superficie útil para oficinas del 68,20 %, en relación con la construida y la ocupada por los servicios, que es del



31,8 %, como en la mayor parte de los edificios de oficinas en altura, que se sitúa en el 30 % del total, de promedio.

Cabe considerar, además, la disposición de una segunda piel acristalada, que cubre los pasos necesarios para el mantenimiento. La anchura total del paso y el acristalamiento es de 80 cm. Ello supone incrementar la superficie destinada a servicios en 100 m² más por planta, manteniendo la superficie útil de las oficinas.

En las condiciones descritas, la superficie edificada por planta asciende a los 1.200 m², mientras que la ocupada por los muros y servicios es de 450 m², con lo cual la ratio de la superficie destinada a oficinas desciende al 62,50 %, mientras que la de los muros y espacios de servicio asciende hasta el 37,50 %.

El conjunto formado por el muro de hormigón armado, el paso de mantenimiento y el acristalamiento supone destinar un total de 120 cm para resolver la piel del edificio, espesor más propio del muro de una torre medieval que de un edificio de alta tecnología.

Tanto el Turning Torso como el Gherkin disponen de góndolas para la limpieza de los acristalamientos y para el mantenimiento exterior en lugar de pasillos de mantenimiento.

Conclusiones

La Torre Agbar es un edificio típicamente mediterráneo, por sus formas, por su policromía y por la combinación, en ocasiones anárquica, de rigor técnico y creatividad exacerbada. A diferencia del Turning Torso y del Gherkin, premiados con el MIPIM 2005 y el RIBA Stirling Prize 2004, respectivamente, la Torre Agbar no mereció ningún galardón en su momento; sin embargo, su arquitecto Jean Nouvel fue distinguido en 2008 con el premio Pritzker, considerado el Nobel de la arquitectura.

Destacan su planta elíptica, la concepción estructural en doble tubo y el coronamiento cupular, que confiere al edificio –más allá del aspecto fálico argüido por algunos– una terminación interesante y novedosa, en la línea iniciada por el Gherkin.

La eliminación de los pilares intermedios y la excentricidad del núcleo interior permiten obtener una planta diáfana muy versátil.

El hecho que los forjados de las últimas plantas queden separados de la estructura cupular plantea problemas para garantizar la privacidad entre ámbitos distintos.

La adopción de una circunferencia perfecta habría facilitado la construcción, al igual que una disposición más racional de las ventanas y la previsión de una góndola para el mantenimiento exterior.



Cabe destacar la gran aportación de la iluminación exterior mediante ledes, cuya capacidad para convertir el edificio en un icono de Barcelona resulta inquestionable.

4.5.3. Gherkin. Génesis

El edificio conocido popularmente como “*gherkin*” (“pepinillo”) se encuentra en el antiguo emplazamiento de la sede de Baltic Exchange, compañía de intercambio y servicios del sector naviero, destruida en 1992 por un atentado del IRA. Su primer nombre oficial fue el de Swiss Re Tower y, posteriormente, 30 St Mary Axe, pero al final ha prevalecido la mencionada denominación popular.

El solar resultante, después de diversos avatares inmobiliarios, entre ellos el proyecto fracasado de construir la Torre del Milenio, según proyecto de Norman Foster, fue adquirido por la compañía suiza Swiss Re. Esta comenzó a trabajar, en 1999, en el proyecto de una torre de menor altura, también con Foster.

El proyecto definitivo fue aprobado en 2000 por la Corporación de Londres. La construcción se llevó a cabo entre 2001 y diciembre de 2003. Se inauguró el 28 de abril de 2004.

Datos significativos

- Altura máxima: 179,80 m
- Plantas sobre rasante: 40
- Altura por planta de suelo a suelo: 4,15 m
- Superficie construida: 47.950 m²
- Superficie acristalada: 24.000 m²
- Peso estimado: 117.000 t
- Cimentación formada por 333 pilotes de 750 mm de diámetro, con una profundidad media de 27 m

Aspectos relevantes

El Gherkin se caracteriza por una serie de aspectos que se detallan a continuación:

- Perfil apuntado
- Plantas circulares, giradas 5° con respecto a las precedentes
- Exoesqueleto triangulado y núcleo estructural
- Doble piel acristalada para el control ambiental y de incendios
- Integración de estructura, funcionalidad y estética

Perfil apuntado

En la base, el diámetro de la torre es de 49 m. A la altura de la planta 17, alcanza su máxima dimensión, con un valor de 56,80 m de diámetro (v. esquema de sección en el gráfico inferior izquierdo y la imagen aérea del edificio en la fotografía central).



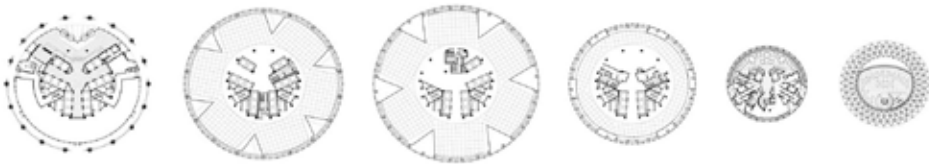
A partir de este nivel, disminuyen progresivamente hasta la coronación del edificio. Este perfil le confiere singularidad, y de ahí su popularidad en el *skyline* de Londres. En la actualidad, su forma solo es comparable a la de la Torre Agbar, si bien el Gherkin se había terminado más de un año antes.

La fotografía interior derecha muestra los carriles y el brazo extensible de la góndola, necesario para efectuar el mantenimiento exterior del edificio.



Plantas circulares, giradas 5° con respecto a las precedentes

En el sector del edificio correspondiente a las plantas tipo de oficinas, cada una de ellas presenta un total de seis atrios. El modulado de los atrios se corresponde con la estructura exterior.(v. fotografía inferior).



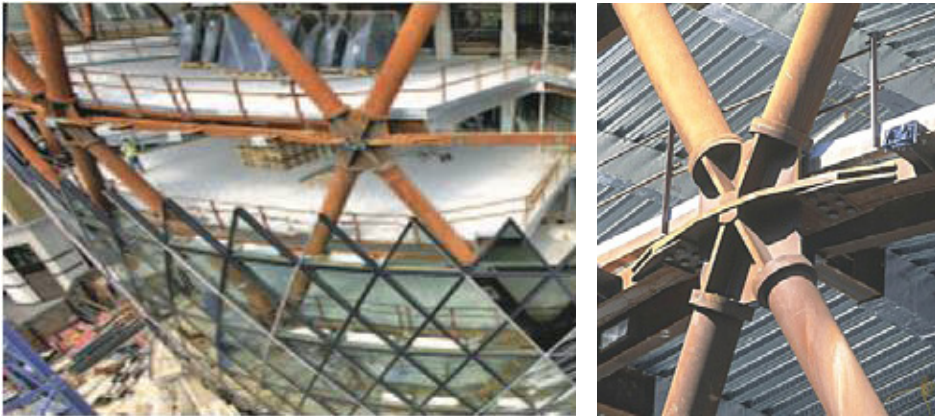
Los nudos de la estructura generan un giro helicoidal para adaptarse al envolvente. Los atrios mantienen, en cada planta, su posición con respecto a la estructura, por lo que han de girar 5° con respecto a la planta precedente para adecuarse a la misma.

Exoesqueleto triangulado y núcleo

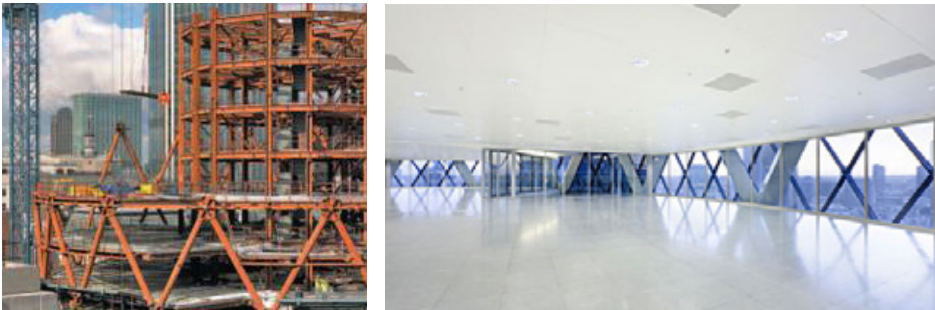
La estructura se resuelve mediante un exoesqueleto, denominado *diagrid*, enlazado a un núcleo. Ello libera de pilares el espacio destinado a oficinas. Los forjados utilizados son de tipo colaborante.



El exoesqueleto está formado por nudos hexagonales, dispuestos cada dos plantas. Las barras diagonales son circulares, de perfil y sección decreciente en función de la altura. Las barras horizontales están formadas por un perfil tubular cuadrado. En la fotografía inferior izquierda, puede apreciarse un aspecto general del exoesqueleto y, a la derecha, el detalle de uno de los nudos.



La zona de servicios, situada concéntricamente, se resuelve de forma convencional mediante una estructura de tipo jaula, como se muestra en la fotografía inferior izquierda. Ello permite disponer de plantas completamente diáfnas en los espacios destinados a oficinas (v. fotografía inferior derecha).



Doble piel acristalada para el control ambiental y de incendios

El edificio dispone de una doble piel acristalada, con una cámara de aire interpuesta de espesor variable según se trate de la zona ocupada por oficinas o por los atrios.

En el caso de los sectores de oficinas, zonas con menor espesor de cámara, el espacio entre los dos cristales es de 1,80 m. Esta dimensión, propia de un muro medieval, se debe tanto a la geometría de los envolventes de la estructura como



a la necesidad de disponer de un paso interior de servicio para limpiar los cristales (v. gráfico inferior izquierdo). Obsérvese que, en la cámara resultante, se disponen conductos de impulsión y de extracción para evitar condensaciones.

En la fotografía inferior derecha, puede apreciarse la piel exterior, constituida por paneles romboidales y triángulos de vidrio plano, y la piel interior, formada por paneles acristalados de suelo a techo, sujetos mediante montantes verticales, y su continuidad en los atrios, al fondo de la imagen.

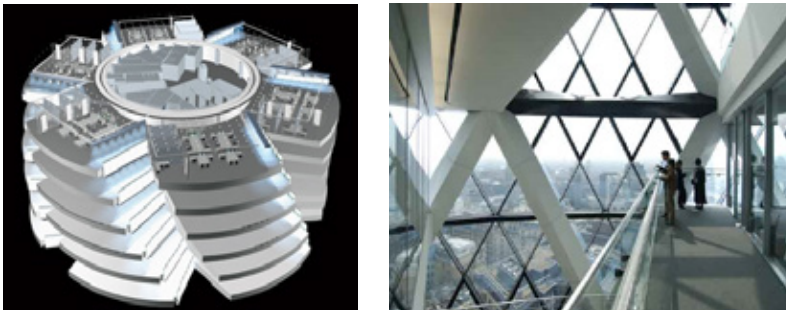


En su conjunto, y merced a los acristalamientos interiores, los atrios configuran conductos por los que circula por convección el aire durante el verano. De este modo, se consigue refrescar el ambiente, mientras que en invierno se aprovecha el efecto invernadero cerrando el paso al mismo.

Mediante el control de las circulaciones de aire en el interior de la doble piel acristalada, se consigue un notable ahorro energético, del orden del 50 % con respecto a un edificio convencional, y aislamiento acústico.

Ello tiene, como incidencia negativa, la pérdida de ratio entre la superficie útil y la construida (v. apartado "Analizando el aprovechamiento de la planta").

El volumen total generado por los atrios es interrumpido cada seis plantas (v. fotografía inferior izquierda), mediante la interposición de paneles acristalados a prueba de fuego. De este modo, el edificio se sectoriza, y se evita que el conducto resultante pueda transmitir el humo a su totalidad.





La fotografía derecha de la página anterior corresponde a uno de los atrios. En la misma puede apreciarse la piel exterior acristalada mediante triángulos y rombos planos. Algunos de sus plafones son móviles. Su apertura o cierre se controla mediante termostatos.

A la izquierda de dicha fotografía, puede apreciarse la segunda piel, acristalada, que protege las áreas de oficina.

Integración de estructura, funcionalidad y estética

El Gherkin es un edificio estéticamente bello, cuyas líneas armónicas se funden en un todo indisoluble con la estructura que le confiere un aire de racionalidad y de rigor geométrico poco común.

Ello se manifiesta, especialmente, en el encuentro del edificio con el suelo de una forma extraordinariamente limpia manteniendo el ritmo estructural, como puede apreciarse en la foto inferior izquierda.



Otro ejemplo de integración de la estructura con la funcionalidad se observa en la descomposición de los espacios estructurales de la fachada, mediante muros cortina. Dicha descomposición se realiza con submúltiplos triangulares planos, lo que facilita su construcción y reduce su coste. Algunos de estos elementos son practicables mediante accionamientos mecánicos para permitir la circulación de aire fresco entre la doble piel acristalada.

Estéticamente, el edificio queda reforzado por la utilización de franjas acristaladas de color más oscuro, que siguen la evolución helicoidal de los nudos estructurales.

Análisis del aprovechamiento de la planta

A los efectos de este estudio, se elige la planta 17, la de mayor dimensión. Como el núcleo de servicios se mantiene constante, es la planta con la ratio más favorable, al disponer de mayor superficie construida. Así se tiene:



| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| – Superficie construida total: | 2.532,60 m ² |
| • Núcleo de servicios: | 674,25 m ² |
| • Atrios: | 307,00 m ² |
| • Zona con doble acristalamiento: | 216,00 m ² |
| – Superficie total de servicios: | 1.197,25 m ² |

Ello supone que el 47,27 % de la planta está ocupado por servicios, por el grueso de la fachada o por elementos estructurales, de manera que la superficie útil para oficinas es del 52,73 %, aproximadamente un 10 % menos que la de la Torre Agbar.

Si se eliminaran los atrios, la superficie útil ascendería hasta los 1.547,50 m², con lo que la ratio correspondiente a la zona de servicios descendería hasta situarse en el 38,90 %, muy similar al 37,50 % de la Torre Agbar.

Por lo que respecta al Turning Torso, sus ratios se aproximan a los que ofrece el Gherkin: el 44 % ocupado por servicios y elementos estructurales y el 56 %, de superficie útil.

Conclusiones técnico-constructivas sobre el Gherkin

A partir de los datos aportados en los apartados anteriores, se concluyen los aspectos siguientes:

La originalidad del edificio es incuestionable, tanto por su forma como por la estructura que lo soporta.

Se trata de un prototipo y, por tanto, tiene aspectos muy mejorables o, cuando menos, revisables. Se afirma que es un edificio ecológico, porque consume menos energía que un edificio convencional –se dice que un 50 % menos. Para conseguirlo, sacrifica, más de 500 m² de una planta de 2.500, es decir un 20 % de la superficie, en cámaras de aire.

La doble piel acristalada supone duplicar el mantenimiento de la limpieza y elevar el coste de construcción.

Más que ecológico, el Gherkin es un edificio lujoso y caro de construir y de mantener. Su perfil complica la estructura y la construcción. Su construcción solo es posible merced a la disposición de ordenadores que permiten simular su volumetría y materializarla mediante instrumentos digitalizados de replanteo.

Confiar el cerramiento a un sistema de cámara perimetral con doble acristalamiento, cuyo espesor, en el menor de los casos, es de 1,80 m, es una solución que debe revisarse en el futuro, y no solo para mejorar las ratios de aprovechamiento del edificio. Se trata de sumar y evitar perder por un lado lo que se trata de ganar por otro.



Disponer de información sobre los balances energéticos y sobre los costes de mantenimiento de los edificios singulares ha de ser la base para la mejora de las propuestas constructivas. Es preciso establecer mecanismos racionales, generadores de modelos. Ello ha de permitir suprimir, en buena medida, propuestas con fuertes componentes de carácter estético, representativo o de prestigio.

4.6. ¿Cómo serán los edificios en altura del futuro?

Tratar de ofrecer una respuesta sobre cómo será el futuro, sea cual sea la pregunta, es un tanto arriesgado.

Dos son los mecanismos fundamentales de análisis: el conocimiento del pasado, como base de referencia, y la información exhaustiva de la situación actual, entendida como elemento lógico de enlace con la situación futura. De la historia, se deduce que los cambios, aunque sean profundos, se producen de forma paulatina.

Con respecto al análisis del pasado, en comparación con la situación presente, se concluye que sus escenarios resultan extraordinariamente distintos a los actuales, debido a factores que han tomado cuerpo en los últimos diez años, aunque su gestación se inicia en la primera revolución industrial, como:

- La presión demográfica y la globalización
- La incidencia de la actividad humana a escala planetaria
- Los diferenciales de riqueza
- **La presión demográfica y la globalización.** Durante el último siglo, la población mundial ha experimentado un crecimiento exponencial, paralelamente a los avances tecnológicos y de la medicina. Ello ha incidido en la demanda de recursos que hay que controlar. Sin embargo, no han crecido en la misma medida las estructuras sociales y de gobierno necesarias para soportarlo.

Como mecanismos de control del crecimiento de la población, se recurre, desde el llamado "primer mundo", a procedimientos poco éticos, como la esterilización, las multas a la natalidad (en China), las semillas genéticamente modificadas, el racionamiento de medicamentos o la realización de inversiones orientadas a la simple explotación y a los conflictos bélicos.

De todo ello se concluye que no han crecido, de forma acorde con la población, las estructuras sociales y de gobierno necesarias para dar respuesta al nuevo escenario.

En el polo opuesto del desarrollo de las estructuras sociales, se encuentra el crecimiento vertiginoso de las capacidades tecnológicas de comunicación e intercambio de ideas, de producción y de transporte de productos y equipos.



En la situación actual, resulta más fácil que un ciudadano europeo beba un vino australiano o chileno que un individuo del tercer mundo reciba atención médica. La compra del vino depende de la voluntad del ciudadano; la atención médica en el tercer mundo, del azar.

- **La incidencia de la actividad humana a escala planetaria.** La capacidad que tiene la actividad humana actualmente para incidir, a escala planetaria, en aspectos tan trascendentes como la presión sobre los recursos naturales y el cambio climático, no tiene parangón en la historia.

Las alteraciones ecológicas causadas por la actividad humana producen catástrofes naturales y diezman la producción de alimentos. Al mismo tiempo, se da la paradoja de que la capacidad para controlar plagas y mejorar la producción de alimentos es máxima.

A escala global, la sociedad se caracteriza por un conjunto de desequilibrios en el reparto de la producción de alimentos y de la riqueza. La construcción de edificios de gran altura y alta tecnología sin otra finalidad que la ostentación es paradigmática, en este sentido.

- **Los diferenciales de riqueza.** Históricamente, los diferenciales de riqueza han sido una constante; sin embargo, en la actualidad existen auténticos abismos.

La riqueza no es solo dineraria, sino también de estatus. Se manifiesta en aspectos que magnifican las diferencias. Entre ellos, la disponibilidad de alimentos y de energía (vivienda, agua potable, calefacción, automóviles, aviones...), el acceso a una sanidad de calidad, a la formación y a las manifestaciones culturales.

Las vigentes estructuras de los estados permiten que unos pocos vivan más allá de la opulencia, mientras que una inmensa mayoría subsiste en condiciones infrahumanas.

Desde la óptica de la construcción, puede constatarse, en distintos puntos del planeta, que basta con una barrera física para separar un hotel de lujo de una población en el umbral de la pobreza. En otras situaciones, no existe ni barrera física, sino solo psicológica: rascacielos junto a chabolas, mediante la interposición de un tejido urbano intermedio. Ricos y pobres están muy próximos, pero sin encontrarse.

4.6.1. Análisis del presente

El análisis del presente muestra una situación de crisis extraordinariamente profunda, que afecta no solo los aspectos económicos y sociales, sino que se trata de una crisis sistémica.



Si no por convencimiento racional, simplemente por impacto con la cruda realidad, se llega a la conclusión de que, una vez alcanzadas determinadas cotas, una sociedad basada en el crecimiento continuado del PIB, del consumo, de la explotación descontrolada de los recursos naturales (en la mayoría de los casos, de terceros) y del bienestar de unos cuantos resulta insostenible.

La población europea y su crecimiento social y económico se mantuvieron estabilizados durante siglos mediante mecanismos de control y de represión tan brutales como la ignorancia, la intolerancia religiosa, las enfermedades contagiosas y las guerras. Es de esperar que la lección del pasado no se repita en el futuro.

4.6.2. Prospectivas de futuro

Destacados analistas indican que, en el año 2050, cerca del 80 % de la población mundial residirá en centros urbanos. Como respuesta a ello, cada vez más arquitectos proponen diseños de rascacielos que, además de [aprovechar mejor](#) el espacio y los recursos naturales, incluyen todo tipo de elementos ecológicos.

La realidad es que los proyectos pretendidamente “ecológicos” se amontonan en los cajones, en espera de tiempos mejores que den respuesta precisa a numerosas cuestiones actualmente aún sin respuesta.

- ¿Están acertados los arquitectos con sus propuestas de construir en altura?
- Si así fuera, ¿qué número de plantas resultaría idóneo?
- ¿Cuáles son las justificaciones de carácter científico y técnico que amparan la construcción de edificios por encima de la altura “idónea”?
- Con independencia de la intuición, ¿qué estudios científicos relativos a los impactos ambientales y a los ciclos de vida de los materiales avalan la bondad de sus propuestas?
- ¿Bajo qué criterios se conceden las licencias de edificación de los edificios en altura? Y, ¿cómo se valoran en las mismas los aspectos relativos a la sostenibilidad?
- ¿No sería más conveniente que los arquitectos promovieran esquemas de crecimiento urbano ordenado y sostenible, más que proyectos aislados, por muy brillantes que estos sean?

Considerando lo expuesto en los apartados anteriores, las conclusiones evolutivas sobre el futuro de la humanidad en general, y de la edificación en particular, se centran en dos conceptos alternativos y de resultados yuxtapuestos: la moderación o el desastre.



Moderación

Entendida como la limitación racional de la producción de bienes y servicios, el respeto al medio ambiente y a las potencialidades del planeta, y un reparto social más equitativo y justo de los mismos.

Ello debería traducirse, en cuanto a las alturas de los edificios, en investigar para obtener el máximo rendimiento del binomio urbanismo-edificación. Igualmente debería suponer la integración, en los edificios, de sistemas de energías alternativas probadas, asociadas a la cogeneración, pues en la actualidad es el sistema energético más eficiente para satisfacer las necesidades de un edificio.

Los sistemas alternativos solo pueden aportar un pequeño porcentaje sobre el total del consumo. La intervención en origen, en el ciclo del agua, es otro de los factores relevantes a considerar en el diseño sostenible de los edificios.

Desastre

La segunda opción, el desastre a escala planetaria, parece, afortunadamente, alejada de la realidad más próxima. En honor a la verdad, en una situación de transición como la actual, todavía queda lejos un escenario futuro realmente esperanzador.

Entre tanto, en el largo camino por recorrer antes de alcanzar un mayor entendimiento entre las personas, seguirán funcionando los mecanismos ancestrales, fundamentados en la ignorancia, el adoctrinamiento religioso y las guerras. Contra ellos hay que luchar, de modo individual y colectivo, con las armas del conocimiento, el raciocinio y la tolerancia.

Freno al desenfreno

Los primeros cambios en la edificación en altura, derivados de la crisis sistémica actual, iniciada en 2007, empiezan a ser evidentes y su evolución será más acusada en el futuro.

Numerosos proyectos de edificios en altura han quedado suspendidos a causa de la crisis. Son reflejo de un cambio de actitud motivado por la necesidad de adaptarse a situaciones y a circunstancias rápidamente cambiantes.

El cambio de actitud se manifiesta a través de la ponderación crítica de algunos logros técnicamente posibles y atractivos por su novedad o por su apariencia, de la cual se concluye que estos no siempre responden a conceptos realmente racionales ni a criterios de viabilidad, por lo que pueden acabar resultando insatisfactorios.

El rigor analítico en la construcción, aunque sea propiciado por hechos circunstanciales, acaba incidiendo positivamente en la calidad global de la misma y en su capacidad para dar cumplida respuesta a las necesidades que la motivaron.



Bastan dos ejemplos para ilustrar este comentario. La fotografía inferior izquierda reproduce una imagen del edificio denominado Chicago Spire, de 609 m de altura, proyectado por Santiago Calatrava. Dicho proyecto fue interrumpido en 2010 debido a la crisis económica.

La fotografía de la derecha muestra la Torre Rusia, que estaba previsto concluir en 2012 y que, con 600 m de altura, había de ser el edificio más alto de Europa. La superficie construida total era de 520.000 m², de los cuales 200.000 m² estarían construidos bajo rasante. El edificio habría podido ser utilizado simultáneamente por 30.000 personas. Los trabajos se iniciaron en 2007, pero se suspendieron en 2008. Y el proyecto fue cancelado definitivamente en 2009.



Asociar los rascacielos a la ecología, de forma propagandística, sin publicar datos comparativos de los costes de construcción con respecto a otras opciones conceptualmente más simples y económicas, entra en el campo de la demagogia.

Algunos proyectos de rascacielos, para sumarse a la bandera de la ecología y de la sostenibilidad, han llegado a incorporar aerogeneradores. Ello ha supuesto condicionar el diseño del edificio a las exigencias de los mismos. La mayoría de estos diseños no han superado la fase de proyecto en países realmente desarrollados. Tal es el caso de la Tomigaya Tower, proyecto de 1993 de Richard Rogers (v. foto inferior izquierda) o del New York Sports and Convention Center (v. foto inferior derecha). Este último fue proyectado en 1998 por Kohn Pedersen Fox Associates (KPF), una de las principales firmas de arquitectura del mundo, con sede en [Nueva York](#) y oficinas en [Londres](#), [Abu Dabi](#), [Hong Kong](#) y [Seúl](#), conocida por sus diseños de rascacielos.



En la misma línea de incorporar aerogeneradores, se sitúa el proyecto residencial de la Aquarius Tower de Atlanta (Estados Unidos), que había de estar equipado con paneles solares y generadores eólicos. Su particular forma le habría ayudado a captar la máxima cantidad de viento y a canalizarlo hacia las aspas de los generadores. Tampoco se llegó a construir.

Es difícil justificar que el estatismo propio de un edificio pueda adaptarse, de forma eficiente, a las orientaciones cambiantes del viento. El resultado final suele ser la suma de un edificio condicionado en su forma, asociado a un sistema aerogenerador poco eficiente.

En países en que los criterios técnicos y económicos son más relajados, se ha llegado a construir algún edificio equipado con aerogeneradores. Tal es el caso del Bahrain World Trade Center, de 240 m de altura. En las fotos inferiores, se puede apreciar su principal característica: tres generadores impulsados por energía eólica, que generan 1.300 MW al año. Ello equivale a satisfacer entre el 11 y el 15 % de las necesidades de energía del edificio. Fueron puestos en servicio en 2008, justo al inicio de la crisis económica.

Además, este edificio fue construido con sistemas de aislamiento térmico especialmente eficientes para reducir el consumo que implica enfriar el edificio en un





clima caluroso como el de Bahréin. Según sus promotores, este edificio “ahorra” 55 toneladas de emisiones de CO₂ al año. Lo que no se indica es el consumo energético necesario para construirlo ni las emisiones resultantes de tal empeño.

La fotografía anterior derecha corresponde al diseño de la Tour Phare, que produce energía mediante unos aerogeneradores situados en su coronación. Se trata de un proyecto surgido de un concurso internacional organizado por el EPAD ([Établissement public pour l'aménagement de la région de la Défense](#)) en 2006. Consiste en una torre de 300 m de altura y una superficie construida de 130.000 m², que se deben al estudio Morphosis de Tom Mayne (Pritzker 2005). Debía terminarse en 2015, aunque informaciones más recientes señalan que el proyecto no finalizará hasta 2017. Posiblemente, durante el largo período de construcción, se replanteen algunos de los principios del diseño, entre ellos los aerogeneradores.

El Strata es un edificio residencial, de 148 m de altura y 43 plantas, situado en el número 408 de [Elephant and Castle](#), en el distrito de [Southwark](#), en [Londres](#) (v. fotografías inferiores). El proyecto data de 2005, la construcción comenzó en 2007 y se terminó en junio de 2010. Su coste se ha estimado en 113,5 millones de libras.



Si bien en su diseño destacan tres turbinas eólicas de nueve metros de diámetro, con una potencia de 19 kW cada, solo satisfacen el 8 % de las necesidades energéticas del edificio, por lo que no es más que un refuerzo. La mayor parte de la energía que consume el edificio se obtiene mediante un sistema de cogeneración que produce energía eléctrica y calefacción. Dispone también de un sistema de recogida y reutilización del agua de lluvia. A diferencia del Bahrain World Trade Center, el Strata no depende de un solo sistema alternativo, sino que plantea la integración de sistemas.

En otros casos, la incorporación de energías alternativas en edificios en altura se ha materializado en forma de placas fotovoltaicas, como en el edificio denominado Solar Tower, de 120 m de altura, ubicado en la ciudad de Manchester (v.



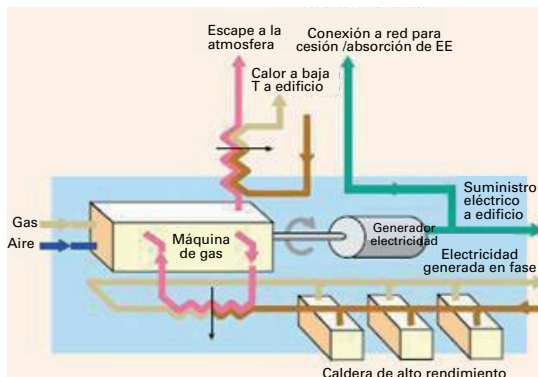
fotografía inferior izquierda). Dispone de 7.000 paneles solares y cada panel tiene 80 W de potencia, capaces de generar alrededor de 390 kW, energía suficiente para alimentar 1.000 ordenadores.

Debido a la verticalidad de las fachadas y a su orientación, el rendimiento de la instalación es mucho más bajo que en una instalación fotovoltaica convencional. Por otra parte, la energía fotovoltaica ha sido puesta en cuestión por el elevado coste ecológico que supone la producción de las placas.



El balance general de la incorporación de energías alternativas a edificios que requieren un gran consumo energético para su funcionamiento señala que la ciencia, en el estado en que se halla actualmente, todavía está lejos de ofrecer soluciones realmente válidas y rentables, teniendo en cuenta los costes iniciales de su instalación.

Los sistemas de cogeneración son, en estos momentos, los que mayor eficiencia pueden aportar a los edificios en altura, a partir de turbinas alimentadas por gas. La fotografía anterior derecha muestra la parte superior del edificio Lloyd's de Londres, inaugurado en 1984. En el mismo, además de utilizar el efecto invernadero y la ventilación natural para reducir el consumo energético, se incluyen plantas técnicas que contienen sistemas de cogeneración (v. fotografía inferior izquierda).





La cogeneración (v. esquema anterior) es el procedimiento mediante el cual se obtiene, simultáneamente, **energía eléctrica** y energía térmica útil (**vapor, agua caliente sanitaria**). Al generar electricidad mediante un alternador movido por un motor térmico o una turbina de gas, el aprovechamiento de la energía química del combustible es del 25 % al 46 % (sobre el poder calorífico inferior), y el resto se disipa en forma de calor.

Con la cogeneración, se aprovecha una parte importante de la energía térmica, que normalmente se disiparía a la atmósfera o en una masa de agua y, por tanto, se evita volver a generarla con una caldera. Además, al producir la electricidad cerca del punto de consumo, se evitan los cambios de tensión y el transporte a larga distancia. Estos factores implican una pérdida notable de energía por el **efecto Joule**. En las grandes redes, se pierde entre el 25 y el 30 % de la energía producida.

Como ejemplos de algunos de los proyectos conceptuales más atrevidos, “construibles”, pero afortunadamente no construidos, representativos de una etapa de manierismo, en algunos casos utópico (pues acaba conduciendo, según la tradición histórica, al abandono del modelo), basten los siguientes:

- Aquaria Grande Towers, Bombay
- Edificios arcológicos
- Torres giratorias

El proyecto del complejo residencial Aquaria Grande Towers en Bombay (India) se compone de dos torres de 37 pisos y 165 m de altura, que preveía piscinas particulares en el balcón de cada apartamento.



Ello supone disponer de materiales estructurales con capacidad para soportar la sobrecarga del agua en voladizo y sistemas muy perfeccionados y seguros para garantizar la contención del agua y la estanqueidad. A la vista del *render*, la posibilidad de salpicar agua al exterior parece que no está resuelta si no es por la contención de los nadadores.



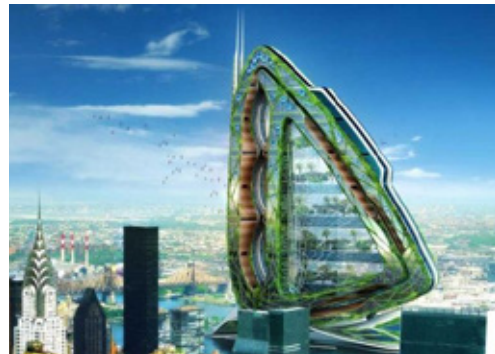
Las Aquaria Grande Towers se han incluido en este apartado porque son un ejemplo claro de construcción obscena, en que se rinde culto a la ostentación y al lujo, sin aportar creatividad tecnológica alguna.

Las dos fotografías siguientes corresponden, respectivamente, a unos proyectos de edificios colosales, pretendidamente autosuficientes, desarrollados bajo el concepto de "arcología". El término, un acrónimo que designa "arquitectura para la ecología", fue acuñado en 1970 por Paolo Soleri en su libro *Arcology: The City in the Image of Man*.

Mediante la aplicación de los criterios arcológicos, se pretenden resolver los problemas urbanos a través de la construcción de enormes rascacielos que ocupen el menor territorio posible y minimicen (teóricamente) su impacto en el medio ambiente.

Según Soleri, los edificios "arcológicos" no serían colmenas humanas, sino urbes autosuficientes, capaces de generar su propia energía, controlar la calidad del aire y del agua, gestionar sus residuos, producir alimentos y ofrecer diversas áreas de actividad, de la manera más eficiente posible.

A la vista de los mismos, cabe concluir que la imaginación desborda la realidad. A los arquitectos les resulta más fácil dibujar que medir o valorar. En las circunstancias actuales de la ciencia y la tecnología, el consumo energético y los costes económicos de una construcción de estas características no son asumibles.



El factor humano es también determinante y no puede desatenderse. Sería significativo conocer cuántas personas estarían dispuestas a vivir en un ambiente completamente artificial, por muy ecológico y saludable que fuera.

El planteamiento de Soleri recuerda el de los utopistas Robert Owen (1771-1858) y Charles Fourier (1772-1837), el resultado final de cuyas propuestas de vida colectiva es bien conocido.



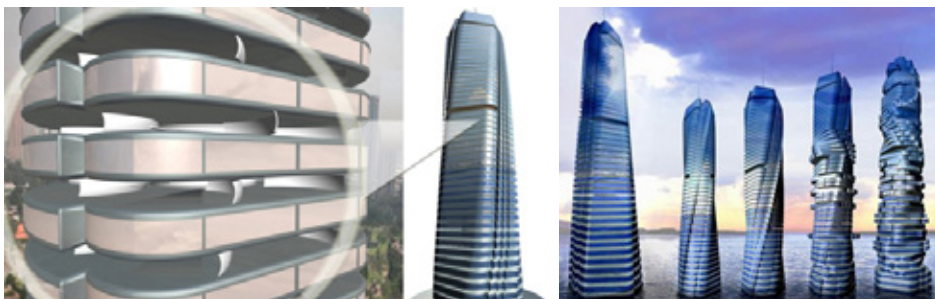
Son diversas las torres giratorias que se han proyectado y que, hasta el momento, no se han construido; la mayoría de ellas se deben a David Fisher.

Este arquitecto italiano ha proyectado un modelo de 80 pisos y 420 m de altura, con la pretensión de ubicarlo en Dubái, Nueva York y Moscú. En teoría, su concepto ofrece una amplia gama de posibilidades formales, toda vez que cada planta gira de manera independiente.

Para vender el producto, el arquitecto indica que el edificio no daña el medio ambiente, y expone lo siguiente: "La edificación no daña el medio ambiente y es la primera con capacidad para generar electricidad para sí misma y para otras torres cercanas. Logra esta hazaña por medio de aerogeneradores ubicados entre cada piso. Un edificio de 80 pisos tiene 79 aerogeneradores, lo que lo convierte en una verdadera usina eléctrica ecológica."

Sin embargo, lo que no indica es que el edificio, para abastecerse, también necesita energía fotovoltaica y que la producción de las placas no es sostenible. Todo ello, con independencia del hecho que su posición y su orientación no serán siempre óptimas, debido al giro del edificio.

A la vista del esquema del gráfico siguiente, puede concluirse que el concepto tradicional de disponer un forjado para cada planta que cumpla las funciones de suelo y techo aquí queda alterado, pues cada planta necesita dos forjados. Y, por muy modular y simplificada que pretenda ser la construcción de cada planta, duplicar el número de forjados no es una solución muy racional, ni técnica ni económicamente.



Debe considerarse, además, el exceso de construcción en altura como consecuencia de intercalar los aerogeneradores en los espacios entre plantas, de manera que si un edificio convencional de 80 plantas se resuelve con 300 m de altura, en el prototipo de Fisher alcanza los 420 m. Sin necesidad de entrar en más consideraciones, no es de extrañar que 120 m de diferencia influyan notablemente en la decisión final de los promotores. Estos han de optar entre la posibilidad, la necesidad y la conveniencia de construirlo, o no. Hasta el momento, se han decantado, juiciosamente, por esta última opción.



4.6.3. Aventurando una respuesta

En las páginas anteriores, se recoge y se analiza, de forma somera, la evolución de los edificios en altura, en función de sus aspectos formales, estructurales y tecnológicos.

Este estudio, en su conjunto, tiene el propósito de tratar de establecer cómo serán los rascacielos en el futuro. Y, para ello, se han considerado los aspectos siguientes:

- Mayor racionalidad
- Mejores proyectos y ejecuciones más cuidadas
- Reducción de los costes de construcción
- Repetición de modelos
- Simplicidad y belleza
- Conclusiones

Mayor racionalidad

Puede entenderse, debido a las necesidades de la experimentación, que la historia de los rascacielos se caracterice por los excesos. Cumplidos más de ciento treinta años, parece más que razonable concluir que el modelo constructivo ya ha sido suficientemente experimentado. Es momento, pues, de recapitular y de aprovechar las experiencias anteriores. En lugar de experimentar, en los próximos años corresponderá ejecutar.

Ello requiere ponderar aspectos tales como:

- La menor altura y su relación con la seguridad
- La reducción de los consumos energéticos
- La facilidad de mantenimiento y la integración de equipos de cogeneración

Menor altura

Una vez alcanzadas alturas de edificación por encima de las necesidades reales de uso, no debería tener sentido superarlas en el futuro, especialmente si se pretenden preservar los principios de respeto al medio ambiente.

La altura de un edificio debería obtenerse tras un estudio razonado, vinculado al coste de la urbanización y de los servicios necesarios para su construcción y su mantenimiento. De forma intuitiva, las alturas máximas de edificación deberían situarse, bajo una óptica de racionalidad, entre los 150 y los 200 m, equivalentes a un rango de entre 40 y 55 plantas.

Aunque la altura sea menor, no debe bajarse la guardia en los aspectos relativos a la seguridad activa y pasiva contra la intrusión y contra el fuego. Al contrario,



deben aprovecharse las experiencias adquiridas en los edificios más altos y, por tanto, con mayor riesgo potencial, para aplicarlas a edificios con menos necesidades y mejorar así su seguridad con respecto a unos estándares que, con anterioridad, habrían resultado aceptables.

Reducción de los consumos energéticos

La reducción de los consumos energéticos de plantearse de forma global, de modo que afecte tanto los trabajos de construcción, como los derivados del uso y del mantenimiento del edificio.

La racionalidad en la construcción de edificios en altura puede obtenerse a través de muchos mecanismos: realización de estructuras moduladas y aligeradas, empleo de elementos prefabricados en cerramientos y divisorias o utilización de materiales reciclados, por citar los más comunes.

La aplicación en el diseño de principios bioclimáticos, que permitan aprovechar las ventilaciones naturales para refrigerar el edificio en los períodos cálidos, o utilizar el efecto invernadero en las épocas más frías, junto con el empleo de los aislamientos térmicos adecuados, son recursos que permiten reducir el consumo energético derivado de las aportaciones directas a lo largo de la vida útil del edificio.

En esta línea de reducción de los consumos energéticos sin renunciar a las prestaciones, destacan como una realidad presente los sistemas de iluminación mediante ledes, a los cuales ya se ha hecho referencia en apartados anteriores.

En los rascacielos del futuro, ledes evolucionados para ofrecer mayores y mejores prestaciones serán la base de la iluminación tanto interior como exterior, por su capacidad cromática y su bajo consumo. La potencialidad de los ledes, aplicada a los edificios en altura, transformará la imagen nocturna de las ciudades.

La iluminación nocturna de los rascacielos pasará a ser un elemento más de los requerimientos propios de su diseño, al ofrecer amplias prestaciones de imagen, compatibles con los principios de sostenibilidad.

Facilidad de mantenimiento e integración de equipos de cogeneración

La consecución de un edificio en altura eficiente supone, entre otros aspectos, que su mantenimiento sea sencillo. Ello se consigue desde el proyecto, incorporando soluciones constructivas fiables y construyendo de forma cuidadosa, con materiales de calidad acordes con las prescripciones del proyecto.

Los criterios derivados de la arquitectura *high-tech* son una buena opción por su facilidad de mantenimiento, debida a la transparencia con que están integradas las instalaciones en el edificio. Constituyen un elemento indispensable para el buen funcionamiento del edificio, al igual que las zonas nobles o las de servicio.



Desde el principio del diseño, se establecen el lugar o los lugares óptimos que han de ocupar las instalaciones para garantizar un buen servicio, sobre la base de su accesibilidad y facilidad de mantenimiento.

En las fases de diseño, es frecuente proceder de forma inversa, reservando para las instalaciones los espacios residuales generados por otros requerimientos funcionales. Ello es un error que, si persiste, puede repercutir negativamente a lo largo de la vida útil del edificio.

En apartados anteriores, se han descrito los equipos de cogeneración y el interés que estos tienen por la proximidad entre la producción y el consumo, la reducción de emisiones y el rendimiento energético.

En el estado actual de la ciencia y de la técnica de producción de energía, la cogeneración es el único procedimiento capaz de producirla en cantidad suficiente para permitir el autoabastecimiento de un edificio en altura.

Si se pretenden respetar los principios de la sostenibilidad, la cogeneración debería asociarse indisolublemente a los rascacielos del futuro, mientras no se encuentre una solución más eficiente.

Las energías alternativas, como los aerogeneradores, no proporcionan más allá del 10 % del consumo total. Las placas fotovoltaicas han perdido peso, debido al coste ecológico que supone su producción.

Mejores proyectos y ejecuciones más cuidadas

A medida que una tipología edificatoria es más conocida, todas y cada uno de sus virtudes y de sus defectos, sus valores potenciales y sus carencias se encuentran más estudiados.

El proyecto y la construcción de edificios en altura siguen precisando equipos pluridisciplinarios y de especialización. El desarrollo de herramientas informáticas de análisis y de diseño permite que los proyectos se realicen a partir de planes maestros, con un número cada vez mayor de requerimientos y, por tanto, más adecuados a los objetivos deseados.

El dominio de los recursos de diseño de los edificios en altura ha dejado de ser patrimonio de unos pocos estudios, capitaneados por las grandes firmas. En la actualidad, pueden ser conocidos y compartidos por aquellos profesionales que tengan interés específico en el tema.

Reducción de los costes de construcción

El coste de construcción de un edificio en altura debería ser competitivo con respecto a otro de categoría y superficie similar pero con menos plantas, por el equilibrio de los aspectos a favor y en contra de ambas tipologías constructivas.



A favor del edificio en altura, pueden considerarse aspectos como:

- Menor incidencia por planta de los costes de formación del vaso bajo rasante
- Menor incidencia por planta de la cubierta
- Estructura y elementos con mayor repetitividad que en un edificio convencional
- Posibilidad de construir el edificio, de forma escalonada, a medida que crece en altura. Ello supone una reducción de tiempos con respecto al proceso constructivo de un edificio convencional.
- A favor del edificio de altura convencional, cabe mencionar:
 - Menos tiempo de elevación y colocación en obra de los materiales y los elementos de la construcción
 - Sistema de comunicaciones verticales más simple
 - Estructura menos solicitada
 - Costes más bajos de los sistemas de seguridad y de protección contra incendios

En el análisis de los costes de ambas tecnologías, debe considerarse la incidencia del coste urbanístico respectivo que es necesario para albergar ambas tipologías.

Repetición de modelos

Se ha indicado el esfuerzo que supone producir modelos únicos de edificios en altura. El polo opuesto sería poblar las ciudades con edificios iguales. Entre ambos extremos, es posible encontrar equilibrio.

El Ensanche de Barcelona, por ejemplo, es un conjunto armonioso, obtenido por la adición de edificios que, con pocas variantes, responden a un mismo modelo. A partir de sistemas estructurales y constructivos plenamente probados, manteniendo un mismo núcleo central de servicios y comunicaciones verticales, es posible producir un sinfín de variantes formales, cromáticas y de acabado.

Ello permite aprovechar las experiencias e incluso perfeccionar los detalles y las técnicas constructivas que, sin la reflexión que permite el conocimiento profundo de los hechos y las situaciones, pasarían inadvertidos.



En este contexto, aunque sea factible, es innecesario que cada planta sea distinta de la anterior, que gire un determinado ángulo respecto a ella o que roten en torno a un eje.

Simplicidad y belleza

La aplicación de los conceptos de simplicidad y belleza en el diseño de los futuros edificios en altura supone volver a reinterpretar, bajo otra óptica, aquello que es conocido y darle una nueva vida.

A lo largo de la historia, los lenguajes arquitectónicos han comenzado su andadura mediante el desarrollo de sus líneas esenciales. No por ello sus producciones han sido menos bellas que las posteriores.

Los manierismos no son más que belleza superficial, con escasa aportación de ideas. Los rascacielos del futuro deberán seguir siendo formalmente bellos, pero también racionalmente bellos. La belleza "obscena" debería estar prohibida.

Conclusiones

Como resultado de las consideraciones anteriores, y a modo de conclusión, se presenta un esquema de plan maestro para los edificios en altura que deban construirse en el futuro, a partir del cual pueden ajustarse las particularidades propias de cada caso.

- Altura: inferior a los 200 m
- Número de plantas: entre 40 y 55 (valor obtenido después de estudios urbanísticos razonados en relación con las potencialidades de su entorno)
- Posibilidad de construir aparcamientos y zonas de servicio en las primeras plantas sobre rasante, en especial en zonas con suelos con nivel freático alto
- Proyecto basado en experiencias previas, relativas a núcleos de enlaces verticales y servicios, redactado según un plan maestro específico y auditado por un equipo independiente a lo largo del proceso
- Cumplimiento amplio de las normativas relativas a la seguridad estructural, la seguridad frente a la intrusión y la prevención contra incendios
- Utilización de recursos técnicos y constructivos que supongan la reducción del impacto ambiental; la aplicación de los conceptos de modularidad, prefabricación, ligereza, facilidad de montaje y deconstrucción. El propósito de tales acciones es doble: reducir los tiempos de construcción y lograr unos costes más competitivos



- Concepto estructural de tubo o de doble tubo. Adopción, en el núcleo, de formas geoméricamente muy definidas, prismáticas o circulares. Utilización de encofrados trepantes en el núcleo central
- Plantas diáfanas. Estas son consecuencia del concepto estructural empleado y del dimensionado del perímetro del edificio para evitar la necesidad de pilares intermedios. Se flexibiliza así la disposición de las divisorias y se aprovechan al máximo la luz natural y las vistas al exterior desde los puestos de trabajo
- Fachada estructural ligera, con altas prestaciones mecánicas, térmicas, acústicas y de estanqueidad. Ello permite incrementar la ratio de la superficie útil con respecto a la construida. Se resolverá mediante líneas y planos simples y armoniosos, buscando la constructibilidad. Disposición de equipos exteriores de limpieza
- Utilización de sistemas pasivos de control ambiental derivados de la construcción climática, para reducir al máximo la aportación energética exterior
- Integración en el diseño de las instalaciones, en general, y de los equipos de cogeneración, para obtener un edificio de baja emisividad y energéticamente eficiente. Ello supone considerarlos en plano de igualdad con otros elementos básicos del edificio. Asimismo, deben considerarse aspectos tales como la estimación de las superficies necesarias para cada instalación o equipo y la ubicación de los mismos
- En el diseño de las instalaciones, han de priorizarse la accesibilidad y la facilidad de mantenimiento, así como considerar la posibilidad de que estas experimenten ampliaciones o reformas a lo largo de la vida útil del edificio
- Determinados espacios destinados a instalaciones son elementos a integrar en la composición formal del edificio
- Iluminación interior y exterior mediante ledes. Debe estudiarse la imagen formal o corporativa que se desea obtener del edificio
- Utilización del proyecto en otros emplazamientos. Debe aprovecharse y rentabilizarse el esfuerzo de diseño que supone la construcción. Sería una garantía (y también una economía) para los promotores poder adquirir los derechos de un proyecto del cual se tiene la certeza que ha servido para realizar un edificio que cumple con sus expectativas

→ 5



Diseño y construcción de la vivienda colectiva

5.1. Introducción

En este capítulo, a partir del concepto de vivienda, entendida como aquella edificación o parte de edificación destinada a dar cobijo a las necesidades sociales y funcionales de una familia, se efectúa:

- Una breve revisión de las tipologías constructivas de las viviendas urbanas de carácter colectivo, generadas a partir del siglo XVIII
- El análisis del proceso de transformación de la vivienda colectiva en vivienda masiva, su relación con el urbanismo, las tipologías resultantes y las aportaciones constructivas que las han hecho posibles
- Un esbozo sobre la construcción de viviendas en el futuro

El desarrollo de los aspectos anteriores consiste en:

- Conocer y reflexionar cómo y por qué se han dado, hasta el momento, respuestas desde la arquitectura y la construcción a los edificios de vivienda colectiva.
- Disponer de un instrumento para conocer y apreciar los edificios más significativos de la vivienda colectiva, entendidos como bienes patrimoniales, fundamentados en sus valores formales y estilísticos.
- Proponer, en su caso, los mecanismos técnicos apropiados para su revaloración y su conservación.
- Informar sobre las tendencias futuras que seguirá, posiblemente, la construcción de edificios de vivienda colectiva.



5.2. Antecedentes. Los edificios colectivos de viviendas urbanas, a partir del siglo XVIII

La capacidad social de la especie humana tiende al contacto y a la organización jerárquica y social de los individuos.

A lo largo de la historia, las civilizaciones más avanzadas han desarrollado ciudades de diversa índole y tipología, según las necesidades del momento y su ubicación geográfica.

Todas ellas tienen unas características comunes:

- Espacios donde potenciar las sinergias de relación
- Capacidad para incidir sobre el territorio circundante
- Construcción de un medio artificial para obtener una mejor calidad de vida
- Tradicionalmente, la ciudad fue también un lugar de refugio frente al enemigo común, aspecto este que con el desarrollo armamentístico ha perdido todo valor

Resulta evidente la correlación entre el modelo social y la ciudad resultante. En este trabajo, se considera el siglo XVIII, especialmente a partir de su segunda mitad, el punto de partida de las grandes transformaciones sociales y urbanas que han conducido hasta nuestros días.

El progreso registrado en los últimos doscientos años ha sido muy superior al de los quince siglos anteriores, entre los cuales hubo, además, largos períodos de franca decadencia.

La segunda mitad del siglo XVIII asiste a la transformación paulatina de las monarquías en estados. Ello supone, en un primer momento, disponer de estructuras para atender las necesidades de comunicación entre los distintos territorios, organizar las ciudades y recaudar impuestos. La organización y la financiación de los aspectos derivados de los hechos de armas estaban ya estructuradas desde la Edad Media.

Los primeros efectos de la nueva situación se traducen, en el ámbito urbano, en operaciones funcionales de ensanchamiento de las calles, pero también de creación de belleza mediante la construcción de edificios emblemáticos en puntos significativos de la ciudad como reflejo del poder del Estado.

El ejemplo más significativo de urbanismo residencial colectivo del siglo XVIII es, posiblemente, el Royal Crescent de Bath, de estilo georgiano, formado por un conjunto de viviendas pareadas, diseñadas por el arquitecto [John Wood el Joven](#) (1728-1782). Fue construido entre 1767 y 1774 y se caracteriza por su fachada



unitaria de orden jónico palladiano, dispuesta sobre una alineación elíptica que conforma una gran plaza interna privada cubierta de césped (v. fotografía inferior izquierda).

Obsérvese que la regularidad de la fachada “oficial” no se corresponde, en absoluto, con su opuesta. Ello es debido a que los propietarios de cada parcela adquirían la porción correspondiente de la fachada principal y tenían libertad para construir tras ella según sus necesidades. La fotografía de la derecha permite apreciar el tradicional patio inglés para facilitar la ventilación de los sótanos.



Esta forma de proceder, en que las fachadas están concebidas para conformar un acabado unitario de un conjunto residencial, no es exclusivamente inglesa ni tampoco una moda pasajera. Como ejemplos, basta con citar, en nuestro país, las plazas mayores de Madrid y Salamanca y la plaza Reial de Barcelona.

La plaza Mayor de Madrid, si bien se remonta al siglo XVI, debe su estado actual al arquitecto neoclásico Juan de Villanueva (1739-1811). Después del incendio de 1790, que afectó un tercio de la plaza, este rebajó la altura de las edificaciones de cinco a tres plantas y dio continuidad a las esquinas, en las que dispuso grandes arcadas para facilitar el acceso.

Tras la muerte de Villanueva, sus discípulos Antonio López Aguado (1764-1831) y Custodio Moreno (1780-1854) continuaron las obras de reconstrucción hasta 1854 (v. foto inferior izquierda).





La plaza Mayor de Salamanca (v. foto derecha de la página anterior) fue iniciada en 1724 por el arquitecto Alberto de Churriguera (1676-1750) y se trasladó a ella el Ayuntamiento. A la muerte de Churriguera, terminó la obra Andrés García de Quiñones (1709-1784) en 1755.

La historia de su construcción revela las dificultades que hubo para convencer y poner de acuerdo a los distintos propietarios de suelo en los lienzos de la plaza que no eran de titularidad pública.

La realización de la plaza, de acuerdo con los planos de Churriguera, se planteó de modo que cada vecino sufragase los gastos de construcción, cediendo terreno a la plaza si ello fuera necesario. El propósito de estas medidas era alinear e igualar las alineaciones de las fachadas. En caso contrario, se estableció que el propietario afectado debía vender el solar y los edificios al Ayuntamiento.

Es evidente que tales acciones, llevadas a cabo en aras al bien común, habrían resultado inviables sin la disposición de estructuras de Estado.

Las fotografías inferiores corresponden a la plaza Reial de Barcelona, construida, entre 1848 y 1859 según proyecto del arquitecto Francesc Daniel Molina i Casamajó (1812-1867).

Ocupó el espacio del antiguo convento de los capuchinos de Santa Madrona, destruido en 1835. Sigue el modelo de las plazas mayores españolas. Destaca por su planta baja totalmente porticada y por la composición de estilo isabelino de sus fachadas.

Construida en pleno siglo XIX, es una de las últimas muestras de un recurso típicamente neoclásico para el desarrollo residencial colectivo de espacios urbanos: la creación de fachadas homogéneas tras las cuales se construyen edificios de viviendas de acuerdo con la singularidad de cada parcela y las necesidades de cada promotor.

Como puede apreciarse en las fotografías aéreas de todos y cada uno de los ejemplos presentados, las fachadas posteriores se asemejan poco al orden compositivo de los lienzos de las plazas.





5.3. La vida urbana durante la primera revolución industrial y la organización y las condiciones de trabajo

Las líneas siguientes no pueden llegar a expresar, en modo alguno, el esfuerzo y el sufrimiento de nuestros antepasados para conseguir, entre otros muchos logros, lo que hoy se denomina, de forma genérica, “viviendas sociales”. Estas conforman habitualmente edificios colectivos, realizados con criterios diversos de masividad en función de las distintas épocas, capacidades tecnológicas y situaciones sociales.

Reducir el estudio de la vivienda social a las tipologías y a las técnicas constructivas sería ofrecer una visión mutilada e inexacta de la realidad. La vivienda social que hoy conforma gran parte del paisaje urbano no surge por generación espontánea. Es preciso seguir luchando para conservar las edificaciones existentes y mejorar la calidad de las futuras.

Conducir a la clase obrera a un régimen próximo a la esclavitud, organizando la vida de las fábricas, la disciplina y el régimen de trabajo, conforme a un esquema más próximo al de la vida carcelaria que al de un taller, fue el criterio general que adoptó el empresario capitalista del siglo XIX.

Los artesanos y los productores al frente de talleres de base familiar rechazaban el nuevo sistema de producción fabril. Las máquinas alimentaban sus sospechas de amenaza de paro; los largos horarios, los duros programas de trabajo y la disciplina impuesta por los capataces les repugnaban pues mermaban sus libertades.

Fueron aplastados bajo el peso de los monopolios. Los más pobres, los trabajadores del campo y los pequeños propietarios rurales, se vieron arrastrados hacia las ciudades por las leyes de cercados o por las transformaciones en la explotación agrícola.

En dichas circunstancias, se vieron obligados a contratarse en las fábricas. Los niños “asistidos” por las parroquias fueron preparados y obligados a sumarse a las primeras oleadas de este nuevo proletariado.

A principios del siglo XIX, los fabricantes ingleses acudieron al Gobierno para excusar el pago de impuestos por los “elevados salarios” que exigían los obreros. William Pitt (1759-1806), parlamentario y primer ministro del Reino Unido durante dos décadas, les contestó: “Coged a los niños.” En un discurso en el Parlamento, declaró textualmente:

“La experiencia nos ha demostrado lo que puede producir el trabajo de los niños y las ventajas que se pueden obtener empleándolos desde pequeños en los trabajos que puedan hacer [...]. Si alguien se tomase la molestia de calcular el valor total de lo que ganan ahora los niños educados según este método, se sorprenderían al considerar la carga de la cual su trabajo, suficiente para sub-



venir a su mantenimiento, libera al país, y lo que sus esfuerzos laboriosos y las costumbres en que se les ha formado vienen a añadirse a la riqueza nacional.”

La legislación inglesa y la iglesia anglicana defendieron a ultranza la contratación de niños. Ante la dificultad que suponía para la limitada economía familiar el cuidado de los pequeños, los padres los cedían a la tutela de la asistencia pública, con la consiguiente separación de las familias.

Los ritmos de trabajo eran excesivamente duros. La estrecha vigilancia de los capataces imponía toda suerte de arbitrariedades, castigos económicos y físicos. La vigencia de la tortura en las primeras concentraciones fabriles es un hecho constatado en la literatura social de la época.

Los horarios de trabajo de los obreros del siglo XIX oscilaban entre las catorce y las dieciséis horas diarias. En muchas fábricas, se habilitaban cobertizos al pie de las naves de trabajo donde dormían hacinados cientos de hombres, mujeres y niños durante escasamente cinco horas al día.

En Francia, en Estados Unidos y, con el consiguiente retraso, también en España, el negro panorama de la vida de un asalariado no desmerecía en nada el que se observaba en la Inglaterra de aquel tiempo.

Los salarios insuficientes, el trabajo agotador, la disciplina férrea, la pésima alimentación y los alojamientos insalubres provocaban en los obreros todo tipo de enfermedades.

Las revoluciones de 1830 y 1848 sacaron a la luz pública situaciones increíbles sobre la vida cotidiana del proletariado. Estudios relativos al estado físico de los obreros, como los del doctor Louis-René Villermé (1782-1863), pionero en la medicina del trabajo, ponían de manifiesto las consecuencias de los salarios del hambre.

Columnas de niños de seis a ocho años recorrían enormes distancias para ir a los talleres a las cinco de la mañana. Los informes médicos de la época señalaban el destrozo físico y psicológico de millares de hombres y mujeres, envejecidos prematuramente, así como los altos índices de mortalidad laboral.

La publicación en 1840 del *Tableau de l'état physique et moral des ouvriers employés dans les manufactures de coton, de laine et de soie* de Villermé propició la aparición, en 1841, de una ley sobre el trabajo de los niños que establecía la edad mínima para trabajar en los ocho años (esta se elevó hasta los doce años a partir de 1874).

Epidemias como la de cólera de París en 1832, que causó 19.000 muertos, acabaron incidiendo en la promulgación, en 1850, de la primera ley francesa que prohibía el alquiler de viviendas insalubres.



Es amplísima la bibliografía sobre esta época trágica en que surge el clamor a favor de una mayor justicia social y la necesidad de crear viviendas dignas para los obreros. Las pinceladas anteriores tratan solo de exponer el marco en que surge la necesidad de crear tipos edificatorios residenciales colectivos, adaptados a los nuevos tiempos.

5.4. Las aportaciones de los utopistas

El concepto de utopía está asociado a la perfección del individuo y, en consecuencia, de sus relaciones de todo tipo con los demás. Se trata de un ideal deseable, aunque, al mismo tiempo, se sabe que resulta prácticamente inalcanzable.

El resultado de este planteamiento se traduce en un tipo de sociedad cuyos factores políticos, económicos y sociales están equilibrados. Ello debería permitir, en consecuencia, que toda la comunidad pudiera disfrutar de una vida apacible formando parte del sistema.

Dos son los grandes utopistas asociados a la mejora social: Robert Owen (1771-1858) y Charles Fourier (1772-1837), que compartieron sus ideas con personajes como Víctor Considerant (1808-1893), continuador de la obra de Fourier, o Étienne Cabet (1788-1856), que trató, sin éxito, de expandir en Estados Unidos su ideal socialista, expresado en su obra *Viaje por Icaria* (1840).

Como se verá, ambos fracasaron en sus planteamientos utópicos. Sin embargo, sus pensamientos y sus acciones fueron un elemento catalizador en la creación de una nueva organización social de la cual somos herederos.

Desde 1820, Owen creía en la necesidad de reorganizar la sociedad sobre los principios del trabajo colectivo y de la propiedad social. Pretendía crear una sociedad racional, concebida como una federación libre de pequeñas comunidades socialistas autónomas, las cooperativas de producción y de distribución. Valoraba poder transformar la sociedad mediante la instrucción y la educación.

Conforme a estos principios, en 1825 fundó la comunidad de New Harmony en Indiana. El experimento fracasó y tuvo que vender el terreno en 1828, con lo cual perdió buena parte de su fortuna y tuvo que regresar a Inglaterra, donde continuó difundiendo sus ideas. En 1832, ya existían unas 500 cooperativas, que englobaban a 20.000 trabajadores. En la actualidad, el movimiento cooperativo sigue activo y convive con planteamientos productivos de base capitalista.

La fotografía siguiente izquierda muestra el concepto de Owen de una unidad de producción: viviendas dignas se organizan alrededor de los talleres formando un conjunto unitario. El dibujo fue publicado en el periódico *The New Moral World*, pero el edificio, planteado como sucesor de New Harmony, no llegó a construirse.



El capitalismo supo reinterpretar, en beneficio propio, la integración del centro fabril y la vivienda para los trabajadores en las llamadas *colonias industriales*.

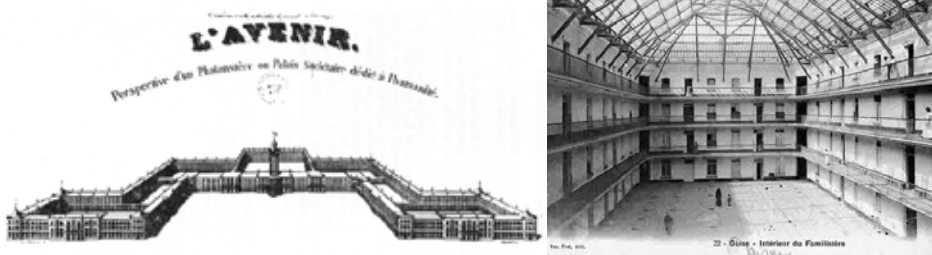
En Catalunya existen notables ejemplos de estas colonias, concebidas para ser autosuficientes, algunas de las cuales con escuela, guardería infantil, iglesia y local social, especialmente a lo largo de los ríos Ter y Llobregat, por su capacidad de generar energía hidráulica. La fotografía superior derecha corresponde a la colonia industrial de Cal Pons, en Puig-reig (Barcelona). En primer término, los edificios fabriles; a la derecha, las viviendas de los obreros, y, en un lugar preeminente, la iglesia.

Charles Fourier tenía una visión completamente opuesta a las ideas sociales dominantes en su época, empezando por la de la familia, que se basaba en el matrimonio y la monogamia. Por ello, en sus escritos, más que crítico, se mostraba satírico con la economía y el capitalismo, y adversario de la civilización urbana y el liberalismo.

Fue un ferviente impulsor del cooperativismo, materializado a partir de falansterios, concebidos como comunidades rurales autosuficientes. Pretendía que estos núcleos de actividad constituyeran la base de la transformación social.

Los falansterios se crearían por acción voluntaria de sus miembros y nunca deberían estar compuestos por más de 1.600 personas, que vivirían juntas en un edificio con todos los servicios colectivos (v. fotografía izquierda de la página siguiente). Cada persona sería libre de elegir su trabajo, y lo podría cambiar cuando quisiera, pero los salarios no serían iguales para todos. A la vista de tales premisas, cabe concluir que el calificativo de utopista cuadra perfectamente con la personalidad de Fourier.

Vivir en colectividad para reducir costos y facilitar las ayudas entre vecinos supuso recrear otros modelos constructivos, como los familisterios, el más famoso de los cuales fue edificado en Guise (Aisne, Francia) por el filántropo e industrial Jean-Baptiste André Godin (1817-1888), con capacidad para 1.200 personas, en la actualidad todavía en servicio (v. foto derecha de la página siguiente). Obsérvese el patio cubierto y el acceso a las viviendas a través de una galería corrida.



Los utopistas fueron un revulsivo social, por su capacidad para mostrar a la población, especialmente a la clase obrera oprimida, que existían alternativas más humanas, más dignas y socialmente más justas que las que ofrecían el liberalismo y la industrialización; entre otras:

- Un concepto más amplio de familia
- Unas condiciones de trabajo más dignas, organizando racionalmente la jornada laboral y los tiempos de descanso y de asueto
- La capacidad del individuo de elegir y cambiar el puesto de trabajo
- La generación de sinergias
- La disposición de servicios sociales

En conjunto, los aspectos indicados conforman el marco en que la vivienda colectiva adquiere su dimensión social y se transforma en un objetivo del urbanismo, de la arquitectura y de la construcción.

5.5. Los modelos constructivos precursores del bloque lineal. La vivienda colectiva obrera desde mediados del siglo XIX hasta las propuestas racionalistas

Los medios de locomoción de un obrero eran muy reducidos, a mediados del siglo XIX. Los desplazamientos se realizaban fundamentalmente a pie. En las zonas industriales, resultaba necesario que las viviendas estuvieran cerca de las fábricas. Así, surgieron dos tipos de desarrollo: los barrios obreros, de crecimiento desordenado y sin servicios mínimos, y las colonias industriales.

Los primeros se extendieron por los suburbios de las principales ciudades. Las colonias industriales se implantaban junto a fábricas situadas en zonas alejadas de las ciudades. Eran edificadas por los propios empresarios.

En el Reino Unido, se denominaron *model industrial villages*; en Francia, *cités ouvrières*; en Alemania, *Arbeiter Kolonien*; en Estados Unidos, *company towns*. En España, reciben el nombre de *colonias obreras*.



La tipología dominante en estas colonias es la celular, en hilera, en que cada vivienda, habitualmente formada por la planta baja y una planta piso, está adosada a la contigua. Sirvan como ejemplo de lo expuesto dos modelos geográficamente muy distantes pero conceptualmente muy próximos. A la izquierda, una calle del Saltaire Village, *model village* inglés cercano a Bradford, West Yorkshire, construido entre 1851 y 1876. A la derecha, uno de los conjuntos de viviendas de la colonia Vidal en Puig-reig (Barcelona), construido en torno a 1900.



En nuestro país, la legislación sobre las viviendas sociales fue muy laxa y a menudo se asoció el concepto “casa para pobres” a la vivienda obrera. Su estudio permite concluir que el Estado español, a lo largo de su historia, no se ha implicado decididamente a favor de la promoción de vivienda social. En la legislación, se cede la iniciativa a los ayuntamientos y a los particulares.

El primer referente es la Real Orden de 9 de septiembre de 1853, dirigida exclusivamente a los gobernadores civiles de Madrid y Barcelona, que les insta a construir “casas para pobres”.

En 1878, se intentó promulgar la Ley sobre la Construcción de Barriadas Obreras. Fue aprobada por el Senado y rechazada por el Congreso de los Diputados. En la misma, se autorizaba al Estado y a los municipios a ceder gratuitamente suelo a los constructores de barrios que cumplieran las condiciones siguientes:

- Menos de 100 viviendas
- Edificación limitada a la planta baja y a una planta piso
- Las viviendas tenían que valer menos de 2.000 pesetas o estar en alquiler por menos de 30 pesetas mensuales.
- Facilitar la integración social.

El 12 de junio de 1911, se aprobó la Ley de Bases de Casas Baratas, que se desarrolló mediante el Reglamento de 12 de abril de 1912. En la misma:



- Se otorgaba a los ayuntamientos un papel preponderante en la creación de vivienda a través de las Juntas de Fomento y Mejora de las Habitaciones Baratas.
- Se establecían exenciones fiscales y ayudas estatales, la cesión de terrenos públicos y la presión sobre los propietarios de suelo, todo ello para estimular la construcción de este tipo de viviendas.

Dicha ley fue sustituida por la de 10 de noviembre de 1921 y su Reglamento, de 8 de julio de 1922.

Durante la dictadura de Primo de Rivera, se dictaron, en relación con la vivienda social, una retahíla de decretos que poco contribuyeron a su fomento. Destaca el Real Decreto Ley de 10 de octubre de 1924, que distinguía entre:

- Casas ultrabaratadas o populares, destinadas a las rentas más bajas. Eran construidas por los ayuntamientos, con ayudas estatales, y tenían unas superficies y unos equipamientos mínimos, dentro de los parámetros de higiene propios de la época.
- Casas baratas. Igualmente se trataba de viviendas reducidas, construidas por la iniciativa privada.
- Casas económicas, de mayor superficie y calidad, destinadas fundamentalmente a funcionarios y militares.

El fomento de la política de vivienda social, durante este período, fue a cargo del Ministerio de Trabajo y Previsión Social y se centró en tres aspectos:

- Apoyo a las cooperativas de viviendas
- Implicación de los ayuntamientos, especialmente de los de más de 30.000 habitantes o de los más industrializados
- Sistemas especiales de financiación

La realidad, afectada por una situación política convulsa, acabó dejando en buenas intenciones la mayor parte de la abundante legislación en materia de vivienda social. Fue el Ministerio de Obras Públicas de Indalecio Prieto (1883-1962) el que recibió la mayor parte de los fondos destinados tanto a la creación de infraestructuras como a obras en los grandes municipios.

A título de ejemplo, de los 300 millones de pesetas prometidas para viviendas sociales por el ministro Francisco Largo Caballero (1869-1946), solo se desembolsaron, con un año de retraso, 222.719,20 pesetas, destinadas a las obras desarrolladas por la cooperativa Pablo Iglesias.



La fotografía inferior izquierda corresponde a una vista aérea del barrio del Bon Pastor poco después de su construcción en 1929. Permite apreciar la tipología constructiva celular de las viviendas resueltas en planta baja y tejados a cuatro aguas. Con 784 viviendas, fue el mayor grupo construido en la época en Barcelona. Los tres restantes, todos de tipología similar, fueron los grupos de vivienda Eduardo Aunós en la Zona Franca, Ramon Albó en Horta y Baró de Viver muy próximo al del Bon Pastor. Este último tenía 334 viviendas y fue demolido en 1985.

Las viviendas del Bon Pastor tienen superficie construida aproximada de 43 m². Conforman manzanas lineales mediante agrupamientos de cuatro en cuatro en torno a un patio central. Su simplicidad puede apreciarse en la fotografía inferior derecha, en que el vestíbulo separa las dos piezas que ventilan a fachada.



A pesar de su obsolescencia, tres de los grupos siguen en servicio. Estos grupos de "casas baratas" constituyen los escasos reductos de arquitectura popular de principios de siglo xx que se conservan en la ciudad de Barcelona.

Diferentes entidades cívicas han solicitado, en los últimos tiempos, una remodelación que respete la integridad urbanística del conjunto. Con ello, se pretende que las casas baratas sean consideradas patrimonio histórico de la ciudad por su carácter testimonial de la forma en que han vivido generaciones de trabajadores a lo largo de más de ochenta años.

Otra tipología de vivienda colectiva para obreros propia del siglo xix es la denominada *corrala* o casa de corredor, dispuesta en torno a un patio central, cuyos antecedentes históricos se remontan a Mesopotamia, Roma, los árabes y los judíos. En Madrid, se tiene referencia de corralas desde el siglo xvi.

La construcción de las corralas se generaliza durante el siglo xix, especialmente en Madrid, Sevilla y Oporto, para absorber la fuerte inmigración que llega del campo. En ésta época, a causa de la especulación, se llegan a construir corralas de hasta nueve alturas.



En ellas, las viviendas son muy humildes y de pequeño tamaño, de unos 20 m² y dos habitaciones por las que se accede a través de unos corredores abiertos al patio. Los servicios higiénicos, un simple retrete, se sitúan al final del patio y son comunes a toda la planta.

Puede apreciarse que se trata de una tipología constructiva muy similar a la del familisterio de Guise, aunque sin las connotaciones sociales de dicho inmueble.

El esquema de acceso a las viviendas mediante un corredor será utilizado posteriormente, entre otros, por los arquitectos racionalistas rusos. En la actualidad, la tipología de corredor abierto se sigue utilizando en algunas zonas de clima bonancible, especialmente en los apartamentos vacacionales.

El modelo constructivo de las corralas se extendió con fortuna a lo largo y ancho de América del Sur: en México se denominaron *vecindades*; en Venezuela, *quin-tas*, y en Chile y Buenos Aires, *conventillos*.

La fotografía inferior izquierda muestra una corrala de Madrid, hoy desaparecida, que ocupaba la intersección de las calles del Rosario y de San Bernabé. Al estar construida en madera, puede considerarse que databa del último tercio del siglo XIX, puesto que a partir de esta época el hierro vino a sustituir la madera en las funciones estructurales. Destaca la posición exenta de la escalera, aspecto poco habitual, puesto que las escaleras se solían situar en las esquinas del patio.

La fotografía inferior derecha corresponde a un bloque de viviendas de corredor del Poblado de Absorción B de Fuencarral, realizado en 1956 por el arquitecto Alejandro de la Sota (1913-1996). Nótese la similitud tipológica entre ambas construcciones, distanciadas un siglo en el tiempo.



5.6. Primeras propuestas racionalistas para la vivienda colectiva

La vivienda colectiva de carácter social tal como se conoce en la actualidad es fruto, como se ha ido mostrando, de un cúmulo de situaciones sociales y de circunstancias políticas, no ajenas al desarrollo científico y tecnológico, la evolución de las técnicas constructivas y su aplicación práctica por parte de arquitectos y urbanistas.



Todo ello produce un fuerte rechazo de la ciudad del siglo XIX. En la memoria de los arquitectos racionalistas, siguen presentes los excesos especulativos, las calles abarrotadas, la insalubridad y las epidemias como situaciones a erradicar. La creación de nuevos modelos urbanos y constructivos no solo es necesaria, sino de todo punto inevitable.

A partir de los años veinte, el hormigón armado adquiere, paulatinamente, carta de naturaleza como material estructural y arquitectónico que sustituye al hierro en las funciones estructurales.

Paralelamente, en Alemania, durante estos años se desarrollan estudios científicos sobre la vivienda colectiva construida en el período de la República de Weimar (1919-1933). También se llevan a cabo experiencias en la misma línea en Holanda, Polonia y Francia. Estos proyectos serán aceptados en toda Europa y extendidos a través de los congresos del CIAM, especialmente a partir de 1933, con la publicación de la Carta de Atenas.

Los principios racionalistas experimentados durante el período de vigencia de República de Weimar parten, como se ha indicado, de la constatación de la ineficiencia de los centros históricos de las áreas industriales generadas durante el siglo XIX.

Tratan de combatir esta situación insana desde el urbanismo. Se pretende evitar que en una hectárea se hacinen hasta 1.500 personas. Para los arquitectos racionalistas, el sol, la vegetación y la zonificación son las tres materias primas del urbanismo.

El sol es fuente de vida. Acceder cada día al mismo de forma natural mejora las funciones vitales y psíquicas de los individuos; construir en el verde resulta básico para garantizar la salubridad; por último, la asignación correcta de los espacios a fines específicos, dando prioridad a las viviendas y a las zonas de ocio, cierra el círculo virtuoso.

La primera etapa de aplicación práctica de los principios racionalistas a la vivienda colectiva queda truncada con el estallido, en 1939, de la Segunda Guerra Mundial. Durante el período comprendido entre 1920 y 1939, toma carta de naturaleza, en espacios urbanos previamente estructurados y dotados de servicios, la tipología edificatoria colectiva denominada *bloque lineal*. Sus características técnicas y constructivas son las siguientes:

- La baja altura: planta baja y cinco plantas piso, en el mejor de los casos. Habitualmente, las alturas oscilan entre las tres y las cuatro plantas. Se consiguen así densidades del orden de 300 a 350 habitantes por hectárea, muy inferiores a las generadas por el desarrollismo del siglo XIX.
- Las fachadas laterales no superan los 10 m de longitud. Ello permite que las viviendas dispongan de fachadas opuestas y, por tanto, ventilación cruzada, uno de los postulados del racionalismo.



- El sistema constructivo dominante es el de muros de carga de fábrica de ladrillo, resueltos estructuralmente mediante forjados lineales, dispuestos habitualmente en dos crujeías apoyadas en el muro central, si bien también se encuentran tipologías celulares.
- Los sistemas de calefacción y de preparación de los alimentos siguen empleando el carbón como fuente energética. Ello se traduce en la presencia de amplias chimeneas.
- Una escalera sin ascensor sirve a dos viviendas. El bloque se genera mediante la adición de escaleras.
- La presencia de terrazas para disfrutar del sol y que pueden utilizarse para usos diversos.
- Los servicios higiénicos integrados en la vivienda.
- La sistematización dimensional de puertas y ventanas.
- La posibilidad de construir viviendas de distinto tamaño, en función de las necesidades familiares.
- Durante esta primera época, el automóvil aún no ha alcanzado la difusión de las décadas siguientes.

Durante esta primera etapa de construcción de vivienda colectiva de carácter social, desde valores arquitectónicos de vanguardia, aparecen algunos nombres que han pasado a la historia de la arquitectura, como Bruno Taut (1880-1938), Franz Hillinger (1895-1973), Hans Scharoun (1893-1972), Le Corbusier (1887-1965), Michiel Brinkman (1873-1925), Otto Haesler (1880-1962) o Walter Gropius (1883-1969).

La fotografía inferior izquierda muestra una imagen aérea del conjunto residencial Carl Legien de Berlín, realizado por Bruno Taut y Franz Hillinger. El proyecto es de 1925. La construcción se llevó a cabo entre 1928 y 1930. El barrio dispone de 1.149 viviendas y una superficie de 8,4 hectáreas. Ello supone 137 viviendas por hectárea, equivalentes a unos 400 habitantes.



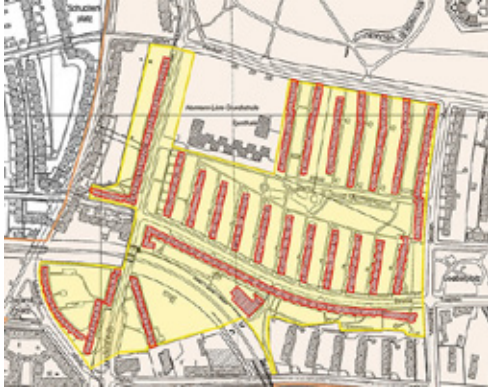


El conjunto residencial Carl Legien está catalogado por la UNESCO desde 1994. Al igual que las colonias obreras de Falkenberg, Schillerpark, Britz, Weiße Stadt y Siemensstadt, construidas en Berlín entre 1913 y 1934, fue declarado Patrimonio Mundial de la UNESCO en el año 2008. Tras su restauración en 2005 (v. fotos superiores), muestra en plenitud sus valores testimoniales y formales, en perfecto estado de servicio.

El plano general de la página siguiente corresponde al conjunto Siemensstadt de Berlín. Fue construido en diversas etapas entre 1929, 1931 y 1934, bajo la dirección del arquitecto Hans Scharoun. Participaron en su construcción Walter Gropius, Hugo Häring, Otto Bartning, Fred Forbat y Paul Rudolf Henning, que formaban parte de un grupo de arquitectos llamado Der Ring ("El Anillo"), motivo por el cual el asentamiento fue denominado también Ringsiedlung.

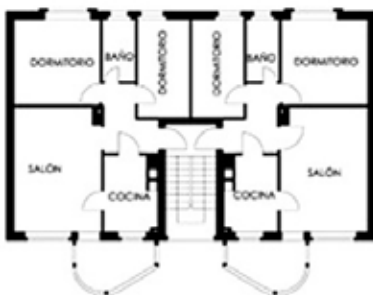
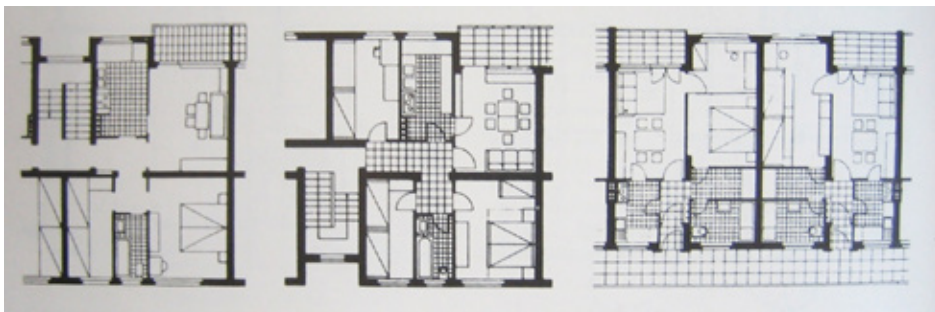
Está formado por 1.370 viviendas, distribuidas en 19,30 hectáreas. La densidad de vivienda es de 71 por hectárea, prácticamente la mitad que en el conjunto Carl Legien. El Schillerpark de Berlín, construido entre 1924 y 1930 según el proyecto de Bruno Taut, estaba formado por 303 viviendas distribuidas en 6,6 hectáreas, lo que supone una densidad todavía menor, de 66 viviendas por hectárea. Ello pone de manifiesto la diversidad de criterios que había en los primeros modelos ensayados y la necesidad de establecer parámetros comparativos entre ellos.

Con relación a las viviendas, se establecieron diferentes tipos en función del número de personas a que iban destinadas. El 30 %, de 48 m² de superficie útil para un máximo de cuatro personas; el 50 %, de 54 m²; el 10 %, de 63 m², y el 10 %, de 70 m² para un máximo de seis personas. Ello ofrece una ratio de superficie útil por persona comprendido entre 11,70 y 12 m². Ratios inferiores a 10 m² por persona suponen entrar en el ámbito del hacinamiento, si se trata de condiciones habituales de vida.



En el conjunto residencial de Siemensstadt, los bloques lineales, en general, se disponen en franjas paralelas, orientados en dirección norte-sur. De este modo, se consigue aprovechar al máximo la luz diurna. El espacio entre los bloques se encuentra ajardinado y dan a él los balcones y las terrazas de la totalidad de los bloques. Las aberturas de la fachada son múltiplos de 78 cm en horizontal y 140 cm en vertical.

A partir de las premisas expuestas, cada arquitecto elaboró su proyecto, con lo cual se pusieron de manifiesto las distintas tendencias que convivían en la arquitectura alemana de la época. Gropius, estrictamente ortogonal (v. planta inferior); Häring, con balcones curvos que sobresalen de las fachadas, revestidos con ladrillos (v. fotografía inferior izquierda), y Scharoun, con reminiscencias náuticas, como demuestran la profundidad de los cortes en los balcones, los *decks* de los techos o las ventanas de ojo de buey (v. fotografía inferior derecha).





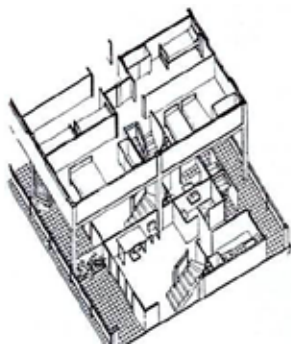
Por su singularidad compositiva, merece una mención especial el edificio moscovita denominado Narkomfin, construido en 1928 según el diseño de Moisei Ginzburg (1892-1946). Se trata de una obra avanzada a su tiempo por su bloque de servicios colectivos con gimnasio y biblioteca, su distribución y la ubicación de transiciones verticales y horizontales. Anticipa, en buena medida, los rasgos definitorios del modelo socialista, caracterizado por la presencia de corredores. Cabe señalar que el diseño trata de ser lo más autosuficiente posible para paliar los efectos del crudo invierno de Moscú (v. fotografías inferiores).



Le Corbusier lo tomó como modelo para el desarrollo de la Unité d'Habitation. En la actualidad, presenta un aspecto degradado por falta de mantenimiento.

Como último ejemplo de arquitectura residencial colectiva de raíz racionalista, edificada antes del inicio de la Segunda Guerra Mundial, es preciso hacer referencia a la Casa Bloc, por su significación en la historia de la arquitectura. Fue construida entre 1934 y 1936 dentro de los cánones del Grupo de Artistas y Técnicos Españoles para el Progreso de la Arquitectura Contemporánea (GATEPAC), rama española del CIAM. La sección catalana del GATEPAC se denominaba GATCPAC.

Sus arquitectos fueron Josep Lluís Sert (1902-1983), Josep Torres Clavé (1906-1939) y Joan Baptista Subirana (1904-1978). Fue promovido por la Generalitat de Catalunya durante la Segunda República con el propósito de realizar un proyecto innovador de vivienda social.





Los arquitectos consideraron la funcionalidad de las viviendas construidas en dúplex mediante la separación entre la zona de día y la nocturna (v. dibujo anterior izquierdo), al tiempo que proponían un modelo de desarrollo para el parque edificatorio del siglo xx compatible con la trama del Eixample.

Su construcción supuso un gran salto cualitativo con respecto a las casas baratas promovidas por los ayuntamientos bajo los auspicios del Estado, gracias a aspectos tales como:

- La generación de espacios libres integrados en la configuración del bloque.
- La planta baja libre sobre pilares, de acuerdo con la más pura tradición racionalista.
- La estructura de hormigón armado.
- La galería de acceso, según el modelo ruso, y la terraza en la fachada opuesta, siguiendo los modelos alemanes.

La ausencia de ascensor era y es uno de los aspectos negativos del edificio, al tener un total de seis alturas.

En 1992, la Casa Bloc fue declarada bien cultural, en la categoría de monumentos, por la Generalitat de Catalunya.

5.7. La actuación del CIAM en la extensión del concepto racionalista de la vivienda colectiva

El Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (CIAM) nació en junio de 1928 en el castillo de La Sarraz, en Suiza, por un grupo de 28 arquitectos europeos, liderado por Le Corbusier (1887-1965); Hélène de Mandrot (1867-1948), artista y propietaria del castillo, y Sigfried Giedion (1888-1968), historiador y crítico de arquitectura, que fue su primer secretario general. Con esta iniciativa, pretendían crear y crearon sinergias, y desarrollaron una nueva forma de ver, de analizar, de entender y de practicar la arquitectura y el urbanismo.

El CIAM se disolvió en 1959, una vez cumplida su función creativa y generadora de cambios. Durante este período, actuó como laboratorio de las ideas de la vanguardia arquitectónica del movimiento moderno, también denominado *estilo internacional*.

El CIAM, a través de la difusión de sus conclusiones, influyó y sigue influyendo, a escala planetaria, en la forma de producir urbanismo, en la creación de nuevas tipologías edificatorias y en la aportación y la incorporación, en los espacios urbanos y edificios, de los últimos avances en las técnicas constructivas.



Su comité organizador llevó a cabo, entre 1928 y 1959, un total de once congresos internacionales. Durante el IV Congreso, realizado en 1933, se redactó la Carta de Atenas, reconocida como el documento fundacional de la arquitectura moderna y del urbanismo, por sus planteamientos eminentemente funcionales y, por tanto, rupturistas frente a las situaciones anteriores.

La carta, publicada en 1942 por Le Corbusier y Josep Lluís Sert (1902-1983), es una evolución y una adaptación, a los nuevos tiempos, de los trabajos pioneros de la República de Weimar. Detalla que los problemas a los cuales se enfrentaban las ciudades se podrían resolver mediante la segregación funcional estricta y la distribución de la población en bloques altos de apartamentos en intervalos extensamente espaciados, sin entrar a valorar, sin embargo, cuáles serían las alturas óptimas de dichos edificios. Trata de nuevos conceptos, como los desplazamientos, las horas punta, las velocidades, la anchura de las calles o la forma de solventar los cruces de vías rápidas mediante enlaces a distinto nivel, entre otros.

Sus principios urbanísticos se adoptaron en la reconstrucción de Europa tras la Segunda Guerra Mundial, aunque en aquel entonces los miembros del CIAM tenían dudas sobre algunos de los conceptos contenidos en los mismos. La perspectiva que ofrece el paso de los años permite concluir que el mal resultado de algunas intervenciones urbanísticas de la época, y de los modelos edificatorios que las acompañan, no es debido a los principios teóricos, sino a las formas erróneas con que fueron aplicados.

Cronológicamente, los once congresos del CIAM se celebraron en los lugares que se indican a continuación y trataron de los temas siguientes:

- 1928, CIAM I, La Sarraz, Francia. Fundación del CIAM
- 1929, CIAM II, Frankfurt, Alemania. Sobre el trabajo de la vivienda de Ernst May (1886-1970) y la vivienda mínima (*Existenzminimum*).
- 1930, CIAM III, Bruselas, Bélgica. Sobre el desarrollo racional del espacio.
- 1933, CIAM IV, Atenas, Grecia. Publicación de la Carta de Atenas.
- 1937, CIAM V, París, Francia. Sobre la vivienda y el ocio.
- 1947, CIAM VI, Bridgwater, Inglaterra. Sobre la reconstrucción de las ciudades devastadas por la Segunda Guerra Mundial.
- 1949, CIAM VII, Bérgamo, Italia. Sobre la arquitectura como arte.
- 1951, CIAM VIII, Hoddesdon, Inglaterra. Sobre el corazón de la ciudad.
- 1954, CIAM IX, Aix-en-Provence, Francia. Publicación de la Carta de habitación.
- 1956, CIAM X, Dubrovnik, Yugoslavia. Sobre el hábitat. Primera presencia de los Team X.
- 1959, CIAM XI, Otterlo, Holanda. Disolución del CIAM.

De los apartados anteriores cabe concluir que, por primera vez en la historia, los profesionales de la construcción y de la arquitectura están informados, a escala mundial, y participan de unos mismos criterios y conocimientos fundamentales



para el desarrollo urbanístico y la generación de vivienda colectiva, que a su vez se convierte en social.

En los países socialmente y económicamente avanzados, gracias a la difusión de estos principios y a su reconocimiento por parte de las instituciones políticas, se erradican definitivamente los problemas de salubridad derivados de los crecimientos urbanos descontrolados.

Los gobiernos de estos países participan activamente en el fomento y en el desarrollo de la vivienda colectiva de carácter social a través de la legislación y mediante la creación de estamentos de gestión específicos. A partir de los años treinta, la política de vivienda pasa a formar parte de los programas de gobierno.

5.8. Mecanismos políticos de análisis y de creación de la vivienda colectiva y social

Con respecto a la consideración del tratamiento político de la vivienda social, se plantea un antes y un después de la Carta de Atenas de 1933. En este punto de inflexión, cabe reflexionar sobre cómo ha sido tratada la creación de vivienda social a lo largo de la historia hasta la actualidad, por parte de unos políticos muchas veces superados por la magnitud del problema.

Con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial, puede afirmarse que el tratamiento político de la vivienda social se convierte prácticamente en una ciencia.

Cabe distinguir tres parámetros de análisis a partir de los cuales los políticos orientaron sus respuestas:

- Higienista
- Asistencial
- Sectorialista

- **Higienista.** El enfoque higienista pretendía resolver la cuestión del hacinamiento tratándolo como un problema de salud pública. Sus actuaciones se orientaban más a suprimir los focos potencialmente peligrosos que a generar soluciones basadas en la creación de viviendas populares. Esta visión es propia de principios del siglo XIX. Trata de corregir los daños infligidos a las ciudades mediante la erradicación. Es una primera toma de conciencia del problema.

- **Asistencial.** Asumidas la carencia o la insuficiencia de vivienda como un problema social, se buscan soluciones al mismo tanto a través del esfuerzo público como de la participación privada. El propósito de las actuaciones asistenciales es garantizar a las clases más desfavorecidas el acceso a la vivienda, generalmente mínima. Es el caso de las denominadas “casas baratas”, a las cuales ya se ha hecho referencia.



- **Sectorialista.** La visión sectorialista coincide con las premisas de las implantaciones de la vivienda colectiva de inspiración racionalista que se llevan a cabo, especialmente en Centroeuropa, con anterioridad a la Segunda Guerra Mundial.

Con la puesta en marcha de programas masivos de construcción, se pretende no solo ofrecer una solución al problema social del déficit habitacional, sino también generar sinergias dando impulso a otras actividades económicas, mediante la activación del empleo industrial y la producción de materiales y equipos.

Como se ha indicado, con el paso del tiempo, el tratamiento político de la vivienda colectiva, en su vertiente tanto privada como social, se transforma en una ciencia capaz de adaptarse a las nuevas sociedades, tiempos y circunstancias, por lo que sus mecanismos de análisis y de actuación son, en la actualidad, multifactoriales.

5.9. Actuaciones para la creación de vivienda colectiva en Inglaterra y Francia tras la Segunda Guerra Mundial

El trauma social y económico producido por la Segunda Guerra Mundial se empezó a corregir eliminando de las ciudades los daños producidos por la contienda. Ello se materializó, en primer lugar, mediante la regeneración de los tejidos urbanos y, posteriormente, con nuevas implantaciones.

Los hechos indicados se producen en el lapso temporal comprendido entre 1945 y 1960, que, a su vez, coincide con la primera etapa de la construcción tecnológica.

Se trata de un período muy diversificado, orientado a reponer, por lo que se refiere a la vivienda colectiva, el parque edificatorio desaparecido o dañado. Para ello, se emplean tanto técnicas constructivas tradicionales como excedentes de la producción de guerra, estos últimos, mayoritariamente elementos prefabricados, cuya continuidad quedará abortada, una vez satisfechas las necesidades perentorias, siendo su lugar ocupado por el hormigón armado-

En Inglaterra, se crean las llamadas *new towns*, al amparo de la *New Towns Act* de 1946, cuyo propósito inicial era hacer frente a los estragos de la Guerra. Dicha ley establecía que el Gobierno podía designar áreas para la implantación de vivienda colectiva y servicios, y cederlas a una corporación para que esta llevara a cabo su desarrollo.

El concepto de las *new towns* resulta interesante, puesto que no se trataba de construir únicamente paquetes residenciales, sino de crear auténticos tejidos urbanos, dotados de equipamientos y de estructuras de gobierno propias.



Tal forma de proceder ha mostrado su validez en el tiempo. Hasta el presente, se han creado en el Reino Unido un total de 32 nuevas ciudades. Ello ha supuesto introducir modificaciones de la citada ley en 1965 y en 1981.

A título de ejemplo, la fotografía inferior izquierda, que corresponde a Harlow, Essex, muestra una *new town* iniciada en 1947. En la actualidad, tiene 80.000 habitantes y ya ha sido objeto de renovaciones urbanas en su centro.

La fotografía de la derecha muestra una zona comercial de Basildon, Essex, cuya población actual es de 153.000 habitantes. Dicha ciudad fue creada en 1949 y es, junto con Harlow, pionera de este tipo de desarrollo.



La tipología residencial es de inspiración racionalista y de baja altura. Constructivamente, el hormigón armado toma carta de naturaleza.

Con el paso del tiempo, en esta primera etapa, los edificios residenciales de las *new towns* aumentan progresivamente el número de plantas, y en su construcción adquiere un papel preponderante el hormigón armado.

Como muestra de ello, sirvan las fotografías inferiores, pertenecientes a Roehampton, distrito situado al suroeste de Londres, edificado a partir de 1958, cuya población es de 13.000 habitantes.





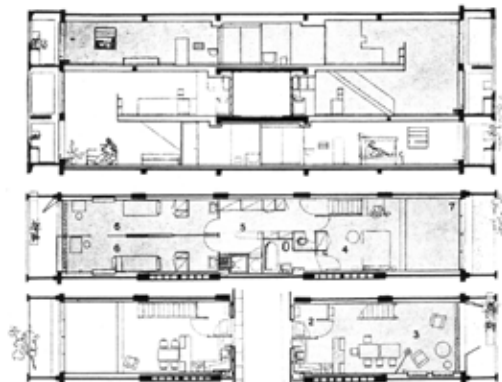
La fotografía anterior de la izquierda corresponde a la tipología de bloques lineales resueltos en dúplex. La de la derecha muestra un bloque en torre, cuyo desarrollo en altura precisa disponer de tecnología constructiva avanzada y, necesariamente, de ascensores. Ambos ejemplos tienen más de diez plantas de altura. El modelo de edificio vivienda colectiva más relevante del período de posguerra, por su concepción, su construcción y su tamaño, es la Unité d'Habitation de Marsella. Fue construida bajo un esquema de bloque lineal entre 1947 y 1952 por Le Corbusier. Consta de 337 apartamentos, distribuidos en 18 plantas. Sus dimensiones generales son 137 m de largo, 24 m de ancho y 65 m de altura (v. fotografía inferior izquierda).

Muestra las posibilidades estructurales y arquitectónicas del hormigón armado, tratado desde el rigor geométrico impuesto por el modular. El hormigón se muestra visto, y destacan la artesanalidad y el efecto estético de los encofrados de madera cepillada propios de la época (v. fotografía inferior derecha). En este sentido, constituye también un ejemplo destacado del brutalismo de los años cincuenta del siglo xx. En la misma fotografía, puede apreciarse, además, la planta baja libre como fiel reflejo de los principios racionalistas.



Cabe destacar la pintura de las terrazas mediante colores primarios, que actúan como contraste a la sobriedad del hormigón (v. fotografía inferior izquierda).

Si bien las galerías de acceso situadas cada dos plantas constituyen uno de los puntos de interés del diseño y permiten que las viviendas disfruten de ventila-





ción cruzada, actualmente los módulos de vivienda dúplex no serían aceptados, por razones de accesibilidad. El espacio que se ahorra disponiendo las galerías de acceso cada dos plantas se pierde en los ámbitos de dos alturas de las viviendas (v. fotografía anterior derecha).

Otro de los aspectos singulares del proyecto se encuentra en la azotea, concebida como espacio de relación y de relax. En la misma destacan el tratamiento de las chimeneas, una pequeña piscina y el pavimento flotante, ajeno a las pendientes propias de una cubierta plana (v. fotografías siguientes). Debe considerarse que Le Corbusier había visitado la obra de Gaudí en Barcelona. En especial, quedó cautivado por la azotea de La Pedrera y la cubierta de las escuelas de la Sagrada Familia. Con respecto a la primera, señala que transitar por ella constituye “un paseo arquitectónico”.



La Unité d'habitation, por sus características, extraídas en buena medida del Narkomfin, sirvió de modelo a los *commieblocks* soviéticos (bloques lineales de gran formato, desarrollados en altura), muchos de los cuales se construyeron mediante elementos prefabricados, sacrificando la calidad.

5.10. La vivienda colectiva entre 1960 y 1975

Si bien la primera crisis del petróleo se produce en 1973, con el consiguiente impacto en la forma de construir, en especial sobre la vivienda colectiva, el período de estudio se prolonga hasta 1975, puesto que es a partir de esta fecha cuando se empiezan adoptar medidas eficientes para controlar el consumo energético en los edificios.

En la Europa occidental, se vive un período de crecimiento tecnológico, político y económico, en que los ordenadores empiezan a tomar carta de naturaleza, aunque todavía son de gran tamaño y muy costosos. Solo se los pueden permitir las grandes empresas y algunas universidades, para llevar a cabo investigaciones de toda índole. La disposición de estas herramientas disparará la aplicación práctica de los conocimientos de forma exponencial. Será la segunda etapa de la construcción tecnológica.



Se han restañado progresivamente las heridas de la guerra. Por tanto, es posible dedicar esfuerzos a mejorar la calidad de las viviendas, incrementando su superficie, mejorando los acabados y las instalaciones, y dotándolas de toda clase de electrodomésticos.

La fuerte demanda pone en cuestión, durante este período, las formas de construir tradicionales, basadas en el carácter artesano de los oficios. Estas conviven con las experiencias realizadas para desarrollar sistemas constructivos prefabricados, mayoritariamente a partir de elementos estructurales y de cerramiento de hormigón armado. También se experimenta con métodos avanzados para la puesta en obra del hormigón, el más representativo de los cuales es el encofrado de túnel, por lo que a la vivienda colectiva se refiere.

Paralelamente, se llevan a cabo actuaciones para revalorar el patrimonio arquitectónico cultural, que hasta el momento había permanecido un tanto abandonado por la urgencia de cubrir necesidades más perentorias. En este sentido, fue determinante el impulso de la Carta de Venecia de 1964, que establecía criterios claros de actuación, tanto para los profesionales de la arquitectura como para los políticos encargados de velar por el patrimonio arquitectónico, desde sus respectivos gobiernos.

5.10.1. La vivienda colectiva en época de bonanza

Como ejemplos de la situación de bonanza descrita, se exponen dos obras de Josep Antoni Coderch de Sentmenat (1913-1984), ambas en Barcelona: el grupo de viviendas del Banco Urquijo en la Bonanova (proyecto: 1967, construcción: 1968-1973) y la gran manzana que habían ocupado las Cocheras de Sarrià (proyecto: 1968, construcción: 1971-1973).

Ambas promociones, aunque muy distintas en volumen, presentan una serie de características similares:

- Aparcamiento subterráneo común que ocupa la totalidad de la parcela. El coche ha tomado carta de naturaleza y es preciso integrarlo en la edificación.
- Estructura de pilares de hormigón armado y forjados reticulares.
- Exclusión de los patios de luces, a pesar de que las profundidades edificadas alcanzan los 26 m, similares a las que se dan en las islas cerradas del Eixample. Ello se consigue retranqueando el perímetro de las plantas. Esta solución es llevada al límite en el grupo de las Cocheras de Sarrià, puesto que los bloques en torre están en contacto a lo largo de una franja estrecha, que crea una tipología híbrida resultado de fundir un bloque en torre con el concepto de bloque lineal y la reinterpretación de un edificio tradicional entre medianeras.

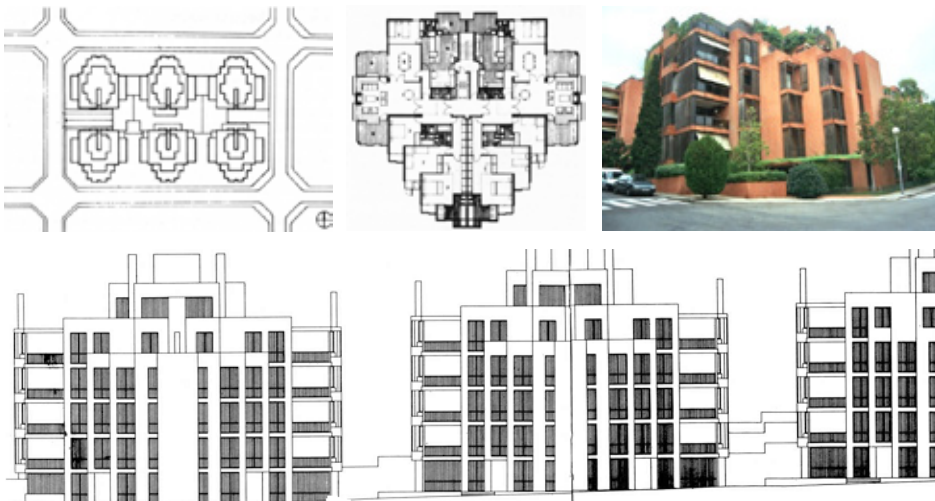


- Ventilación de los aseos mediante *shunts* en lugar de los obsoletos patinejos.
- Acabado cerámico, con un revestimiento de plaquetas colocadas verticalmente en el caso de las viviendas del Banco Urquijo y de ladrillo de cara vista con frentes de forjado aplacados con rasilla en el grupo de las Cocheras de Sarrià.
- Utilización de ventanas en esquina.
- Disposición de terrazas.
- Incorporación de jardineras en el diseño como forma de integrar la vegetación en la imagen formal del edificio.
- Aprovechamiento máximo del potencial edificable de ambas parcelas, forzando al límite las separaciones permitidas en los frentes y los fondos de parcela.

Las imágenes inferiores corresponden al grupo del Banco Urquijo, que ocupa por completo la manzana definida por las calles de Modolell, Freixa, Raset y Vico. Es un caso singular en la zona, puesto que lo habitual es que las manzanas de la Bonanova estén ocupadas por diversos edificios, resueltos con la tipología del bloque en torre.

La edificación sobre rasante consta de planta baja, cuatro plantas piso y ático: una planta retrasada con respecto al plano de la fachada para minimizar el impacto visual de la altura de la edificación desde la calle.

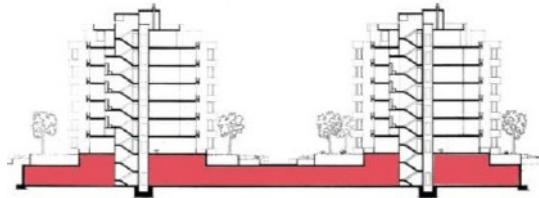
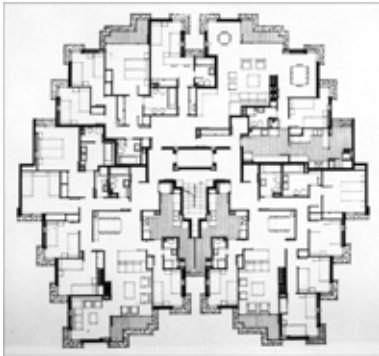
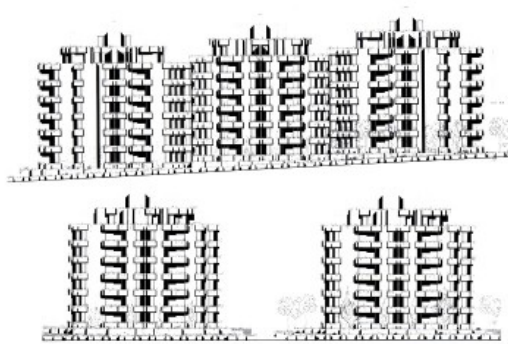
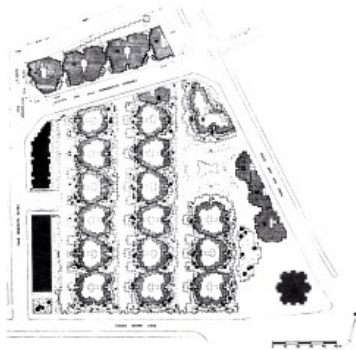
Como puede apreciarse en la planta, tanto por su superficie como por la presencia de una habitación de servicio, se trata de viviendas de lujo.





Las imágenes siguientes corresponden al grupo edificatorio de las Cocheras de Sarrà. El proyecto aborda la ordenación de la manzana limitada por las calles de Benet Mateu y Farmacèutic Carbonell, y los paseos de Sant Joan Bosco y Manuel Girona. En la misma, el arquitecto Antonio Bonet Castellana (1913-1989) ya había proyectado una parte de los terrenos, combinando edificios de diferentes alturas.

La propuesta de Coderch unifica las alturas de los edificios residenciales a planta baja más seis plantas piso, la última de ellas retranqueada con respecto al plano de fachada formando el ático. Asimismo, proyectó un edificio de oficinas, de 19 plantas, que no llegó a realizarse.





El conjunto dispone de dos sótanos comunes, destinados a aparcamiento, que abarcan la totalidad del solar.

La planta baja combina la presencia de viviendas y locales comerciales. Las plantas piso presentan múltiples variaciones, que crean diferentes tipologías de vivienda, desde un estudio a viviendas de seis dormitorios.

En esta obra, Coderch reinterpreta, mediante su composición escalonada en planta, las plazas, las calles y los patios interiores de las manzanas del Eixample barcelonés, incorporando jardines y calles interiores para uso exclusivo de los peatones.

La sección superior muestra que, en el espacio interior de la manzana, los edificios están separados por un mínimo de 20 m, conservando totalmente la proporción de las calles del Eixample. De este modo, garantizaba salubridad, vistas y asoleo.

5.10.2. Prefabricados y semiprefabricados aplicados a la vivienda colectiva durante los años setenta

La máxima “menos es más” de Mies van der Rohe, es plenamente aplicable a la historia de la construcción, puesto que a través de la misma se ha materializado la voluntad de realizar edificios cada vez de más calidad, con menos esfuerzos y más prestaciones.

Estos propósitos no siempre se han visto coronados por el éxito. Buen ejemplo de ello son los prefabricados, en especial los de hormigón armado, aplicados a la construcción de viviendas colectivas.

Durante la primera mitad de los años setenta, se dan las condiciones políticas y económicas suficientes para abrir aventurarse a romper con el pasado y crear nuevas formas de construir, de forma masiva: los edificios de vivienda colectiva.

Con independencia del posible papel obstructivo de determinados poderes fácticos de la industria de la construcción, que, en caso de prosperar una forma de construcción de base tecnológica avanzada, podrían ver muy mermada su participación en el reparto del negocio, cabe concluir, con la perspectiva que ofrecen los años, que el problema no se abordó en profundidad.

La filosofía de fondo era errónea: se pretendía construir rápido y barato, antes que bien, para obtener los máximos beneficios. Se pretendía construir con el prefabricado, no desde la prefabricación. Ello supuso, en muchos, casos que el acabado final del interior de las viviendas fuera, directamente, un panel de hormigón pintado.

Las circunstancias descritas, con independencia de la calidad estética, suponen déficits inadmisibles, por ejemplo, en cuanto al aislamiento térmico y acústico, por citar solamente dos parámetros básicos de calidad.



Durante los años setenta, los profesionales del diseño arquitectónico no estaban en disposición ni estaban preparados para proyectar bajo las premisas dimensionales y formales que imponían los sistemas prefabricados.

En la actualidad, la actitud de los proyectistas con respecto a la construcción prefabricada o semiprefabricada de vivienda colectiva ha cambiado poco o nada, puesto que desde la mitad de la década de los setenta hasta hoy, salvo en casos anecdóticos, han predominado los procedimientos tradicionales, en los cuales sigue imperando la artesanía.

Las leyes del mercado no perdonan. Los edificios de vivienda colectiva construidos durante los años setenta con prefabricados no resisten la comparación con los de forma tradicional, y simplemente se dejan de construir.

La industria, en especial la del automóvil, es un buen ejemplo a seguir por la construcción en lo relativo a conceptos como la disposición de grandes formatos para resolver envolventes y divisorias, la fabricación de módulos de baños y cocinas en el taller, la vía seca y el ensamblaje antes que la vía húmeda, la reducción de residuos y el reciclaje, por citar los aspectos más significativos.

La construcción ha de transformarse, conceptualmente, en una industria capaz de producir y mantener edificios de toda índole, de forma racional y productiva. En las circunstancias descritas, la prefabricación es, sin duda, el camino del futuro.

Antes de indicar las líneas de desarrollo de la vivienda colectiva del futuro, es preciso analizar los errores políticos y coyunturales asociados a los prefabricados de los años setenta, con el propósito de evitarlos.

Los primeros aspectos a considerar son los relativos a la productividad y su relación con la economía de escala. En el pasado, estos marcos han fallado.

La construcción, al requerir poca cualificación en la mayoría de sus empleos (lo que se traduce en sueldos bajos), está sobredimensionada por lo que respecta al número de personas que se dedican a ella.

En la forma de desarrollar la actividad en el ámbito de la construcción residencial tiene que producirse algo similar a lo que sucedió en nuestro país con la agricultura durante los años cincuenta y sesenta del siglo xx: una reconversión y un trasvase hacia otras actividades, algunas de las cuales serán, necesariamente, de nueva creación.

Asimismo, es preciso evitar la atomización de los sistemas constructivos prefabricados. En este sentido, la labor de los gobiernos ha de centrarse en analizar y potenciar un número reducido de sistemas, tres como máximo, para que su producción resulte eficiente con las economías de escala.



Ha de planificarse la producción para garantizar un equilibrio adecuado entre oferta y demanda.

Por último, es necesario plantear un cambio radical en la filosofía de las actuaciones de vivienda colectiva en el futuro y potenciar los aspectos profesionales y de servicio por encima de su consideración como una forma rápida (y engañosa) de producir dinero (no riqueza).

Desde el punto de vista eminentemente técnico, la falta de adecuación de los prefabricados de los años setenta es debida a los aspectos siguientes:

- El peso excesivo de los elementos constructivos, que encarece su transporte y dificulta su colocación, especialmente en altura. Cabe considerar que los bloques de vivienda tienen, mayoritariamente, entre cinco y diez plantas, caso muy distinto del planteamiento de las naves industriales o de las viviendas prefabricadas.
- Las uniones no monolíticas entre paneles. Se recurre con frecuencia a la soldadura o al atornillado. Algunos de los sistemas prefabricados avanzados de la actualidad recurren al hormigonado selectivo o a la aplicación de *grouts* inyectados para obtener nudos y uniones monolíticas.
- La escasa adaptabilidad dimensional. La construcción prefabricada no puede circunscribirse a la realización de edificios aislados, sino que ha de poder adaptarse sin dificultades a la construcción entre medianeras.
- La baja calidad en las prestaciones básicas y en los acabados, asociada a una normativa incipiente y todavía muy laxa. En el futuro, un usuario ha de poder intuir que se encuentra en una vivienda prefabricada por sus prestaciones de confort y por la calidad y la perfección de sus acabados.
- La dependencia de unos sistemas constructivos cerrados. Ello supone que cada sistema constructivo solo puede desarrollarse a partir de la disposición total de sus propios elementos. Con ello, se pasa a depender de la solvencia y de la disponibilidad del fabricante. Cualquier retraso en las entregas repercute en la temporalidad de la obra, al no tener alternativa de continuidad.
- La simple transposición de los sistemas constructivos tradicionales de muros de carga a los prefabricados, sin considerar en profundidad las características estructurales y funcionales del material de sustitución.
- La escasa versatilidad formal. Ello se traduce en monotonía y despersonalización del paisaje urbano, como puede apreciarse en los escasos polígonos construidos en Catalunya con sistemas prefabricados o semiprefabricados. A título de ejemplo, cabe citar los polígonos de Ciutat Badia, Fontsa-Fatjó o Bellvitge.

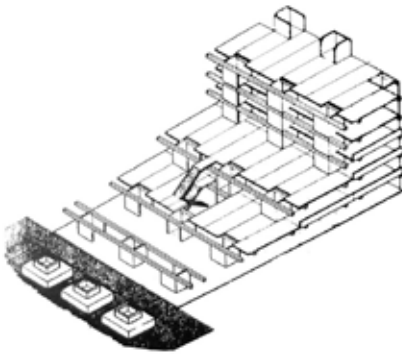


- Los forjados prefabricados de los años setenta eran escasamente compatibles con la complejidad constructiva de un edificio residencial, a diferencia de la de una nave industrial, cuyos pasos de instalaciones son mínimos y concentrados. El forjado de un edificio de viviendas ha de permitir el paso de tubos de saneamiento; de montantes de agua, de gas, de electricidad; de señales de televisión y de telefonía y datos; de aire acondicionado, además de las ventilaciones de las cocinas, los sanitarios y los servicios propios del inmueble. Ello limita sustantivamente las opciones y condiciona el diseño, si se desean obtener unos resultados satisfactorios a base de compatibilizar sistemas.

5.10.3. Algunos ejemplos de prefabricados residenciales de los años setenta

A continuación, se exponen algunas de las iniciativas más representativas para incorporar los prefabricados de hormigón a la arquitectura, más allá de su utilización en la construcción de edificios industriales.

En la Luther Tower, realizada en 1970 en la ciudad de Wilmington, Delaware (Estados Unidos), el sistema constructivo empleado es el denominado Mah-Le-Messurier, desarrollado por una ingeniería de Boston del mismo nombre. Se basa en un conjunto de cajones prefabricados que sustituyen los soportes (v. gráfico inferior). Estos cajones se utilizan para ubicar los cuartos de baño de las viviendas y los conductos de las instalaciones de los apartamentos que conforman el edificio, que alcanza las doce plantas de altura (v. foto inferior derecha).



El edificio, cuyo nombre se adoptó en memoria de Martin Luther King (1929-1968), se encuentra en servicio en la actualidad.

En 1973, el arquitecto Charles Luckman (1909-1999) construyó dos edificios residenciales para estudiantes de la Universidad de Delaware, uno de 15 plantas y el otro de 17.

Utilizó un sistema prefabricado, desarrollado y patentado por la empresa Bison, para construir 255 apartamentos de un dormitorio y 197 de dos dormitorios. Este sistema prescinde de los pilares y los paneles son los elementos portantes.



Cabe destacar que dichos paneles estaban formados por un sándwich con aislamiento térmico dispuesto en su interior, aspecto muy novedoso para la época. En los mismos, se incorporaron las carpinterías en taller.

Para los forjados, se emplearon placas alveolares, lo cual permitió generar luces de hasta 9 m.

La falta de arriostamiento frente a los esfuerzos horizontales de la estructura se compensaba incorporando paneles ortogonales en la dirección general de la estructura para constituir las cajas de escalera. La fotografía inferior izquierda muestra una fase de la fabricación de los paneles. La de la derecha corresponde a una fase de la construcción de la estructura en que la grúa está situando uno de los paneles. Puede apreciarse, además, el arriostamiento en la zona de la esquina.



El carácter industrial y poco cuidado de los prefabricados, denominados Elementa 72, que Otto Steidle (1943-2004) empleó para llevar a cabo en Múnich unas viviendas en la Genter Strasse (1969-1972), ofrece unos resultados formales difícilmente aceptables bajo los conceptos estéticos y de exigencia técnica que rigen en la actualidad para los prefabricados.

En su momento, dicha forma de construir constituyó un hito, por su versatilidad en combinar volúmenes. Sin embargo, los problemas derivados del transporte y montaje de los pilares monolíticos limitaban el sistema a tres plantas.

La fotografía siguiente izquierda reproduce, en maqueta, los pilares dotados de ménsulas y las jácenas de perforaciones en la zona neutra, para facilitar el paso de las instalaciones. La fotografía de la derecha muestra las viviendas terminadas en que ménsulas y las perforaciones están presentes en zonas de la fachada en que no tienen ningún sentido.



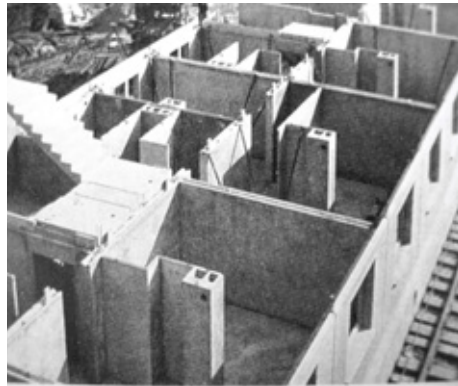
La repetición modular es uno de los recursos compositivos empleados por el arquitecto estructuralista holandés Herman Hertzberger (1932) para facilitar el uso de prefabricados.

La fotografía inferior derecha corresponde a la planta de una residencia de ancianos construida en Ámsterdam entre 1974 y 1976.



Los arquitectos del estudio MBM, Josep M. Martorell (1925), Oriol Bohigas (1925) y David Mackay (1933), tratando de racionalizar la construcción de los edificios de vivienda colectiva, realizaron en 1974 un conjunto de viviendas en la localidad barcelonesa de Cerdanyola (v. fotografía siguiente izquierda).

Como puede apreciarse en la fotografía de la derecha, la construcción se realizaba mediante paneles enlazados mecánicamente entre sí, que venían a sustituir los muros de carga. Sobre los mismos, se hormigonaba una losa maciza de hormigón armado, cuyo acabado debía ser apto para ser pintado con un mínimo de preparación.



El sistema constructivo no tuvo continuidad, por los problemas dimensionales derivados de la producción semiartesanal de los paneles por razón de las economías de escala y porque se exigía al prefabricado más de lo que podía ofrecer en aislamiento térmico y acústico y en calidad de los acabados

Con anterioridad, en el polígono de Bellvitge, iniciado en 1965, ya se habían utilizado paneles prefabricados en la construcción de bloques lineales de gran formato. Sus bloques tienen 14 plantas de altura y disponen de cinco escaleras con dos viviendas por rellano, y los ascensores solo tienen parada cada dos plantas. Cada bloque agrupa un total de 140 viviendas.

La fotografía inferior izquierda muestra, en primer término, la nave de la empresa CIDESA (acrónimo de Construcción Industrial de Edificios, SA), de capital francés y americano. En ella, se fabricaban los paneles: la proximidad entre el punto de fabricación y la puesta en obra resultaba óptima. Tras la misma, puede observarse un bloque en construcción y la grúa. La fotografía de la derecha permite apreciar los carriles sobre los cuales ésta se desplazaba para acceder a toda la obra.



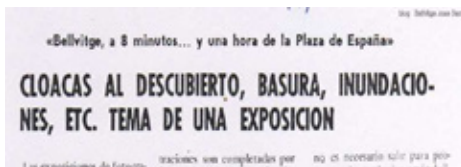
Además de los problemas derivados de falta de infraestructura urbanística (v. fotos inferiores), por lo demás propios de la mayoría de los polígonos residenciales de la época en nuestro país, la construcción de los bloques de Bellvitge

presentaba déficits, por cuestiones de falta de estanqueidad y de aislamiento térmico, en especial en los testeros. La corrección de estos defectos motivó, durante décadas, numerosas acciones y denuncias por parte de los propietarios de las viviendas.



Como muestra de la forma de proceder habitual de los promotores, con el consentimiento de las autoridades políticas, el proyecto de urbanización de Bellvitge no se materializó hasta 1974, diez años después del inicio de la construcción del polígono. Durante este tiempo, la falta de saneamiento propiciaba inundaciones, problemas sanitarios, y hasta la cacería de ratas. No se disponía de servicios tan básicos como los de pavimentación, aceras o alumbrado público.

Las fotografías inferiores corresponden a dos recortes de prensa de 1972. El de la izquierda muestra la diferencia de tiempo de desplazamiento entre el polígono y la plaza de España según si se utilizaba vehículo propio o transporte público: ocho minutos en el primer caso y una hora en el segundo. El de la derecha, encabezado por la expresión “por fin”, deja constancia de los esfuerzos de los vecinos para lograr que se subsanaran los problemas de desconexión que sufrían muchos de los polígonos de nueva creación con respecto al entorno urbanizado más próximo.

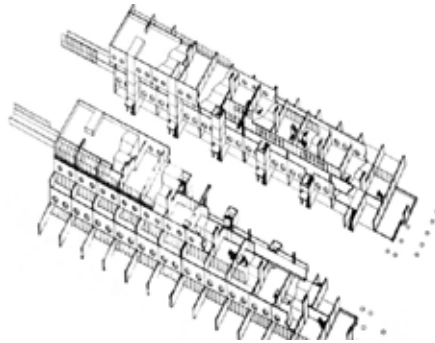


Lamentablemente, es muy significativo y representativo de una época singularmente oscura de nuestra historia reciente que los técnicos y los políticos de nuestro país, conocedores de los modelos de desarrollo urbano centroeuropeo, permitieran que se llevaran a cabo dichos edificios, antes que las infraestructuras que les habían de dar apoyo.



La construcción de estos edificios, sin soporte urbanístico y con tan mínimas prestaciones de calidad y de confort, solo era posible en una época en que el autoritarismo y la gran demanda iban de la mano, y en que primaba el beneficio de unos pocos, que especulaban con la necesidad perentoria de una mayoría de acceder a una vivienda. Las regulaciones sobre la calidad y las prestaciones mínimamente exigibles se mantuvieron en un segundo plano, como se verá más adelante.

Las fotografías siguientes muestran otro intento fracasado de edificar conjuntos de vivienda colectiva con paneles prefabricados fuera de nuestro país. El ejemplo presentado corresponde a un grupo de viviendas adosadas, construidas mediante paneles prefabricados, proyectadas por el arquitecto James Stirling (1926-1992) en la *new town* de Runcorn, Cheshire (Inglaterra), edificadas en 1976.



La disposición estructural de los paneles, materializada mediante una serie de muros paralelos, permite liberar las fachadas y convertirlas en simples cerramientos en los cuales destacan los ojos de buey.

Estas viviendas fueron demolidas en 1990 por el rechazo social e incluso estético que provocaron desde el momento de su construcción y por los costes se derivaban de su mantenimiento.

Ello causó una gran agitación en Inglaterra, tanto a su autor, que por aquel entonces tenía el tratamiento de "sir", el cual lamentó el poco aprecio a su trabajo,



como entre las personas directa o indirectamente afectadas por lo que se consideró una malversación de fondos públicos. En su lugar, una vez derribadas las viviendas prefabricadas, se construyeron viviendas convencionales de estética tradicional y de baja densidad.

Las experiencias descritas son ejemplos de otras muchas iniciativas que se desarrollaron en paralelo durante este período para tratar del construir de una forma más racional mediante el empleo de prefabricados de hormigón.

Baste citar, como ejemplos, el complejo residencial de estilo brutalista, proyectado a finales de los años sesenta por los arquitectos Alison y Peter Smithson, denominado Robin Hood Gardens y el Heygate Estate, ambos en Londres.

El primero, puesto en servicio en 1972, fue muy cuestionado a partir de los noventa por su degradación material y por la escasa aceptación de sus usuarios. Actualmente, se halla en curso de demolición, a pesar de que en su momento fue considerado un modelo de edificación ejemplar. Por su parte, el conjunto residencial de bloques lineales denominado Heygate Estate fue construido en 1974 y demolido en 2011.

El poco éxito que obtuvieron los distintos proyectos llevados a la práctica abortó definitivamente, durante décadas, los intentos de construir edificios de vivienda colectiva mediante el empleo de prefabricados de hormigón.

Es de esperar que, durante el siglo **xxi**, la construcción en general y la de vivienda colectiva en particular experimenten transformaciones positivas en los procesos de prefabricación y de semiprefabricación, así como un acercamiento decidido a los métodos industriales.

5.10.4. Encofrados de túnel. Una tercera vía

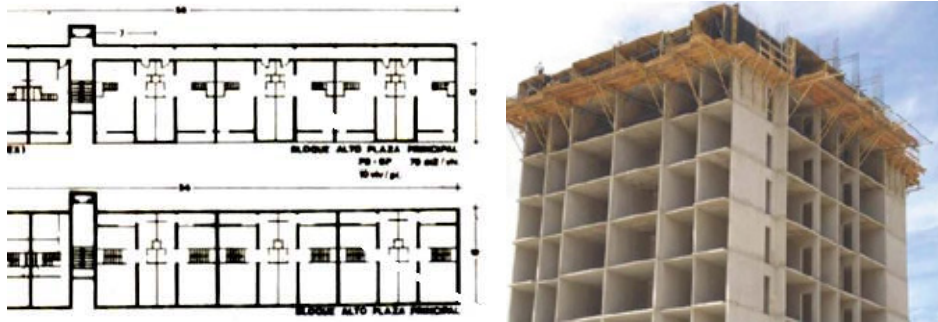
En los apartados anteriores, se ha comentado el empleo tanto de sistemas constructivos convencionales como prefabricados para la construcción de vivienda colectiva. A continuación, se hace referencia a una tercera vía, en la actualidad prácticamente abandonada en nuestro país, debido tanto a su gran productividad como a su mal uso: los encofrados de túnel.

Resulta más complicado vender que fabricar, especialmente si lo que se produce es un producto fuera de mercado. Es lo que sucedió, en su momento, con los encofrados de túnel y la pretensión de extraer directamente de ellos un producto acabado.

Los encofrados de túnel permiten, mediante el empleo de plataformas articuladas que facilitan las operaciones de desencofrado, la confección de células de luces reducidas. Dichas células tienen habitualmente entre 3 y 5 m, coincidiendo con la dimensión de una o dos de las piezas de la vivienda.



De este modo, la distribución de esta queda insertada en las células. El gráfico inferior izquierdo muestra una configuración de planta correspondiente a un bloque lineal adaptado para ser construido mediante encofrados de túnel. En este caso, presentan la particularidad de que las viviendas son dúplex.



Las luces reducidas constituyen una de las virtudes del sistema y también la causa de alguno de sus defectos y limitaciones.

Las luces reducidas aportan rigidez pero presentan el problema de la debilidad direccional, de modo que la estructura podría colapsar como un castillo de naipes frente a un esfuerzo horizontal. Para evitar esta eventualidad, en el diseño estructural han de adoptarse medidas de corrección. En la mayoría de las ocasiones, el problema se resuelve mediante la creación de pantallas ortogonales a la dirección principal (v. fotografía superior derecha).

Como las células se forman mediante muros paralelos y las luces entre ellos son relativamente pequeñas, el sistema solo es válido para plantas muy compartimentadas, como en el caso de las viviendas o de los hoteles.

Los encofrados de túnel están concebidos como una herramienta que puede utilizarse entre cien y trescientas veces. Con el empleo de los encofrados de túnel, puede llegar a ahorrarse hasta el 45 % del coste con respecto a una estructura convencional, puesto que con una sola operación de hormigonado se moldean muros y forjados, entre otras ventajas.

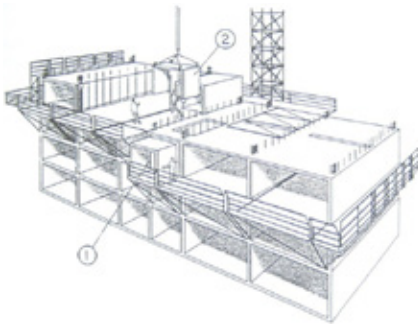
Para obtener todo el rendimiento de un sistema de encofrado de túnel, es preciso aplicarlo a promociones de cien o más viviendas; en volúmenes de obra menores, las ventajas se reducen sustancialmente frente a los sistemas convencionales. Ello limita su campo de aplicación a promociones de carácter masivo, que están totalmente fuera de contexto actualmente en nuestro país. Los encofrados de túnel responden mejor a las necesidades de vivienda de los países emergentes, dispuestos a sacrificar la calidad en aras de la cantidad.

El gráfico inferior muestra las dos operaciones básicas del trabajo con encofrados de túnel y el papel que desempeña la grúa en la construcción: (1) en



la extracción de los módulos de encofrado y (2) en la nueva colocación de los módulos en la planta superior al día siguiente. Para ello, es preciso apuntalar provisionalmente la losa del forjado, puesto que el hormigón se encuentra en proceso de fraguado. También puede apreciarse, en la parte izquierda del dibujo, que los testeros han de construirse mediante paneles trepantes.

La foto de la derecha corresponde a un encofrado de túnel con los mecanismos de husillo, que facilitan su reducción dimensional y permiten realizar las operaciones de desencofrado, elevación y nueva puesta en servicio.



Entre los aspectos que contribuyeron a abandonar los encofrados de túnel en nuestro país, a finales de los años setenta, cabe citar los siguientes:

- Resolución deficiente de los frentes de las celdas
- Déficit en el aislamiento acústico
- Dificultad para efectuar correcciones en las instalaciones
- Acabados interiores mejorables

A continuación, se comenta brevemente cada uno de ellos.

Resolución deficiente de los frentes de las celdas

Una vez terminada la fase de hormigonado, el aspecto de una estructura realizada con encofrado de túnel es el de un damero que es preciso cubrir con un cerramiento.

En lugar de emplear para ello paneles prefabricados, comúnmente se utilizaba fábrica de ladrillo y, en muchas ocasiones, una simple hoja sin cámara de aire ni aislamiento térmico.

En las condiciones descritas, durante el proceso de construcción del cerramiento se generan juntas entre el perímetro de la celda y el material constitutivo del mismo. Estas se acaban degradando y convirtiendo, con mayor frecuencia de la deseada, en puntos de filtración de agua a causa de los efectos higrotérmicos. En conclusión: la mayoría de las construcciones de la época resueltas con encofrado de túnel presentan déficits de aislamiento térmico y de estanqueidad.



Déficit en el aislamiento acústico

La conexión total entre los forjados y los muros, propia del sistema, así como la utilización de los espacios resultantes sin ninguna disposición de materiales de aislamiento acústico, transforman el interior de las viviendas en un perfecto transmisor de ruidos de impacto, con la consiguiente falta de confort para sus habitantes.

Dificultad para efectuar correcciones en las instalaciones

La dificultad para efectuar correcciones en las instalaciones se plantea tanto en fase de construcción como cuando se decide efectuar reformas.

En el primer caso, debido a la colocación, antes del hormigonado, de las redes eléctricas y sanitarias y de los accesorios en los encofrados, además de los premarcos de las puertas y las ventanas.

Si bien es cierto que ello aumenta considerablemente la eficacia en la ejecución de los acabados de las viviendas y reduce la realización de actuaciones posteriores, no es menos cierto que un simple error u omisión por parte del equipo constructor se transforma en un problema difícil de solucionar una vez el hormigón está fraguado.

Es preciso considerar, además, que las operaciones de hormigonado son violentas, debido a las acciones dinámicas generadas por el vertido. En estas condiciones, pueden desplazarse de su posición inicial algunos elementos, como las cajas de empalme y los cajetines, y estos aspectos son complejos de corregir.

Si se desea realizar reformas en las instalaciones y se pretende que estas sean empotradas, llevar a cabo las correspondientes rozas resulta un trabajo arduo y un martirio acústico para los vecinos.

Acabados interiores mejorables

Suponiendo la buena calidad de la superficie que teóricamente presenta este tipo de encofrado, se procedía a pintar directamente los paramentos de hormigón.

En realidad, era frecuente en ellos la presencia de marcas causadas por juntas con sellado deficiente, alabeos o coqueras, por citar las deficiencias más frecuentes que aparecían tras retirar los encofrados.

¿Es posible emplear encofrados de túnel en la actualidad?

Bajo las premisas de calidad descritas, es evidente que los edificios construidos mediante encofrados de túnel no cumplen los requerimientos del CTE relativos a aspectos térmicos y acústicos.



No puede negarse la eficiencia estructural y la adaptabilidad de los encofrados de túnel en procesos de carácter repetitivo y cuantitativo. El panorama actual de la construcción en los países europeos de nuestro entorno, y especialmente en nuestro país, no muestra la necesidad de producción de vivienda de forma masiva, ni a medio ni a largo plazo. El futuro de la construcción de viviendas parece orientado, fundamentalmente, a operaciones de rehabilitación y reposición del parque edificado y a atender, en su caso, el crecimiento vegetativo.

Por tanto, puede concluirse que no se dan por el momento, en los países europeos de nuestro entorno, las condiciones de mercado necesarias para utilizar encofrados de túnel en la producción de viviendas.

El análisis técnico muestra que, con los encofrados de túnel, es posible producir, donde sea necesario, edificios de vivienda colectiva de calidad y de forma masiva. Para ello, es preciso considerar la necesidad de efectuar actuaciones correctivas de los déficits apuntados.

Los mismos podrían corregirse fácilmente, en la actualidad, gracias a la evolución de la industria de la construcción en aspectos tales como los aislamientos térmicos, la posibilidad de efectuar perforaciones limpias en el hormigón, la disponibilidad de trasdosados de cartón yeso o la presencia en el mercado de paneles prefabricados con las carpinterías colocadas. Estos deberían ser utilizados para cerrar, de forma eficiente, los frentes de las celdas.

El planteamiento debería ser el siguiente:

- El encofrado de túnel resolvería únicamente los aspectos estructurales. Durante el hormigonado, los únicos elementos que se colocarían en el encofrado serían los premarcos de las puertas y las ventanas.
- Mediante herramientas de corte de hormigón, se efectuarían las perforaciones precisas para el paso de las instalaciones.
- Las instalaciones quedarían ocultas bajo trasdosados de cartón yeso, entre cuyos soportes se colocaría aislamiento acústico.
- Para mejorar el aislamiento acústico por impacto, se dispondría una base flotante aislada de la estructura, que estaría constituida por el material separador y por placas de yeso-celulosa, sobre las cuales se fijaría el pavimento definitivo.
- Por último, debería prestarse especial atención al sellado y a las condiciones higrotérmicas de los cerramientos de la fachada.

Las mejoras técnicas descritas permiten construir rápido y bien mediante el empleo de los encofrados de túnel.



5.11. Singularidad y masividad. Dos ejemplos: los edificios Corviale en Roma y Walden 7 en Sant Just Desvern, Barcelona

En este apartado, a partir de los ejemplos de los edificios Corviale y Walden 7, se analizan dos casos coetáneos de vivienda colectiva con planteamientos de partida similares:

- Fundamento ideológico enraizado en el socialismo utópico
- Destino como vivienda social
- Concepción como edificio masivo
- Solución estructural mediante el empleo de hormigón armado

pero que dan lugar a resultados absolutamente dispares.

5.11.1. Edificio Corviale

El Corviale es un edificio singular de vivienda colectiva de carácter social, situado en el suroeste de la periferia de Roma. Aunque inspirado en la Unité d'Habitation de Le Corbusier, dista mucho de la calidad arquitectónica y social de este. Más que un edificio, es una ciudad lineal desestructurada y de difícil gobernabilidad.

La singularidad del Corviale se centra en dos aspectos: su planteamiento ideológico, de base socialista, y su tamaño. La mezcla de ambos factores ha ocasionado, a lo largo de su historia, una fuente de conflictos.

Los datos con respecto a su tamaño resultan elocuentes; 958 m de longitud, 1.202 viviendas, 6.133 habitaciones, 8.000 habitantes, garaje, acceso y nueve plantas piso, con una zona de servicios en las plantas quinta y sexta. El enlace mecánico vertical se realiza mediante 74 ascensores. Está subdividido en cinco unidades de gestión, cada una con su propia plaza de acceso, un bloque principal de escaleras y un espacio para las actividades comunitarias.

El proyecto (1972-1975), obra de Mario Fiorentino (1918-1982), se terminó diez años más tarde de lo previsto, con el consiguiente descontrol de la obra, después de la quiebra de la empresa constructora. Partes del edificio, en especial sus zonas de servicio, fueron ocupadas antes de su terminación.

El Corviale constituye un ejemplo, tanto de la potencialidad de los sistemas constructivos basados en el hormigón armado, aplicados a la construcción masiva de vivienda, como de los engendros arquitectónicos que pueden llegar a construirse con ellos si no se consideran adecuadamente aspectos tales como la integración de las nuevas implantaciones en las tramas urbanas, el conocimiento de las necesidades y la escala de valores de los futuros usuarios.

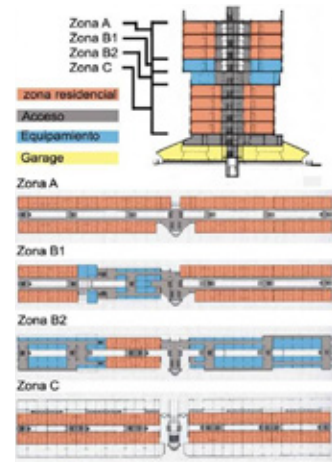
La prensa italiana se refiere sistemáticamente a la obra de Fiorentino para ilustrar los males de las actuaciones en materia de vivienda suburbial debidos a la



mala gestión, por muy bienintencionada que fuera, de los políticos y los tecnócratas de la época.

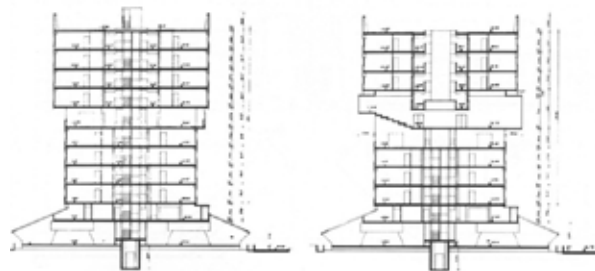
Tras constatar el fracaso de dichas actuaciones, las siguientes generaciones de responsables intelectuales se desentendieron de ellas sin haber conseguido integrar a los afectados.

La fotografía inferior izquierda muestra una visión de conjunto del edificio y de su entorno. Puede apreciarse la desconexión del mismo con respecto a las tramas urbanas articuladas. La ilustración de la derecha muestra, mediante un esquema de sección y un código de colores, los distintos usos del edificio en función de la altura.



Durante una época, el destino final del Corviale fue el derribo. En los últimos años, se han emprendido actuaciones para regenerar el edificio, en especial sus espacios comunes y de servicio. Pasada la época crítica, sus habitantes luchan por convertirlo en un referente social, en un arquetipo y en el testimonio de una época.

En la fotografía siguiente se puede observar, en escorzo, la brutal densificación que se consigue separando dos bloques lineales mediante patios. En los gráficos de sección puede apreciarse el ensanchamiento de la base para disponer el aparcamiento y la galería de servicios.





5.11.2. Edificio Walden 7

El edificio Walden 7 responde a una concepción intelectual y utópica que tiene su origen en la obra *Walden* de Henry David Thoreau (1817-1862), en que relata su experiencia vital de dos años en una cabaña autoconstruida cerca del lago del mismo nombre.

Inspirándose en dicha obra, Burrhus F. Skinner (1904-1990) escribió, en 1948, una novela de ciencia ficción titulada *Walden 2*. En ella imagina, en la línea del conductismo, una utopía mediante la cual no pretende acabar con la diferencia, sino con la desigualdad.

A partir de estas premisas intelectuales, el Taller de Arquitectura de Ricardo Bofill (1939) proyectó el edificio, en que habitan unas mil personas. El taller contaba con un grupo de trabajo interdisciplinario, integrado por arquitectos, ingenieros, psicólogos y filósofos.

Sobre la base de los conceptos Walden, Bofill y su equipo plantearon una alternativa a la vivienda social de la época mediante la construcción de una importante agrupación de viviendas y servicios como alternativa a los bloques separados.

Su propósito era formar un barrio plurifuncional compacto en el espacio que había ocupado la antigua cementera Sanson (1920-1971). A pesar de que el proyecto no se desarrolló por completo, en la actualidad el edificio cuenta con una farmacia, un supermercado, un estanco, una panadería, un restaurante, una cafetería y una peluquería.

El edificio formaba parte de un conjunto mayor. Estaba previsto construir dos edificios más, iguales al realizado, que ocuparían la totalidad del suelo edificable de la llamada Isla Walden, con una superficie de 46.000 m².

El edificio Walden 7 tiene 16 plantas de altura, más un sótano, destinado a aparcamiento. Su superficie es de 31.040 m². Tiene capacidad para unas mil personas. Está formado por 1.100 módulos de 5,30 × 5,30 × 2,50 m.

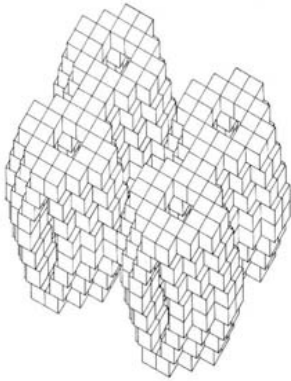
Dos módulos superpuestos constituyen una célula básica, un cubo perfecto de 5,30 m de lado que, en altura, incorpora el grosor del forjado. Las viviendas, en total 446, constan de uno a cuatro módulos, según las necesidades. Así pues, sus dimensiones oscilan entre los 28,09 y los 112,36 m².

Cada célula básica se desplaza espacialmente en cada planta y conforma un entramado de patios verticales y horizontales, como se muestra en el gráfico siguiente izquierdo.

El acceso a las viviendas se realiza mediante pasarelas que unen el núcleo de ascensores del patio central con los pasillos perimetrales. Los espacios generados entre plantas están concebidos para ser utilizados como lugares de relación,



al igual que los que se encuentran en la planta baja y en la cubierta del edificio (v. fotografía superior derecha).



La fotografía inferior izquierda muestra una vista aérea que permite apreciar el edificio en su conjunto. A la derecha, se hallan la chimenea, los silos y los restos de las instalaciones de la antigua cementera, en cuyos espacios se ubican la residencia y el Taller de Arquitectura de Ricardo Bofill.

La fotografía inferior derecha, tomada durante la construcción, muestra la estructura de hormigón durante la fase de revestimiento con baldosas cerámicas.



El edificio fue concluido en 1974. En 1977, empezó a presentar defectos, en forma de desprendimiento de los aplacados cerámicos, fisuras y entradas de agua. A la vista del peligro que constituía, el edificio fue protegido con mallas en todo su perímetro. Se llegó incluso a plantear su derribo, a causa del elevado coste de las reparaciones. La rehabilitación de las fachadas se inició en 1993 y se terminó en 1995, con un coste superior a los 6 millones de euros.

La fotografía siguiente izquierda muestra el estado actual del edificio; la de la derecha, un detalle de los pasos interiores de circulación.



5.12. La vivienda colectiva ante las nuevas realidades sociales 1975-2006

En este apartado, se explican las razones por las cuales se ha escogido el período temporal 1975-2006 como suficientemente homogéneo, a pesar de su dinamismo, como base de estudio.

Asimismo, se enumeran los cambios sociales que se han producido durante el período, con mayor incidencia sobre el diseño y/o la construcción de vivienda colectiva.

Por último, se analizan, a partir de los distintos marcos técnicos normativos de la construcción, los factores de carácter social, tecnológico y económico en que se desarrolla la construcción de vivienda colectiva durante el período indicado, especialmente en España.

5.12.1. Cambios sociales y su incidencia sobre el diseño y la construcción de vivienda colectiva (1975-2006)

Durante el período 1975-2006, la sociedad experimenta profundos cambios. Puede afirmarse que el cambio, de cualquier índole y condición, marca la diferencia entre el hoy y el mañana. Dentro de este período, se incluye el cambio de siglo y de milenio.

Se inicia el proceso de globalización, caracterizado por la interdependencia de los estados, a los que se suman los llamados “poderes fácticos”, que vienen a completar la complejísima cadena de relaciones que unen o atenazan –según se mire– la totalidad del planeta, entendido como aldea global. Esta apreciación se traduce, en lo referente a la construcción de vivienda colectiva, en la homogeneización de los estándares de diseño y de calidad entre países de rentas equivalentes.

Es preciso considerar, como hecho relevante del proceso de globalización, que en 1989 se produce la caída del muro de Berlín. Millones de personas se ven



obligadas a cambiar, en un corto espacio de tiempo, la forma de entender las estructuras sociales y de producción. Los planteamientos socialistas dan paso a una economía de mercado, que dejará fuera de lugar, entre otros muchos aspectos, los edificios de vivienda colectiva que no cumplan con los nuevos estándares de calidad.

La crisis del petróleo se transforma prácticamente en sistémica, especialmente a partir de 1991, fecha de la primera guerra de Iraq. Ello incidirá profundamente en la construcción en general y, en particular, en la construcción de vivienda colectiva. Esta situación de permanente carestía de la energía lleva a invertir más en la mejora de las prestaciones térmicas y acústicas de las viviendas, con objeto de ahorrar en consumo energético. Cabe señalar que, incluso en la actualidad, la mayor parte de la energía consumida en las viviendas sigue procediendo de combustibles fósiles.

Menos intervención de los estados

Durante este período, se han cubierto los déficits de vivienda, tanto a través de la iniciativa privada como de la pública. La necesidad de construir viviendas colectivas para las clases más desfavorecidas es solo una pequeña parte de la actividad de los gobiernos de los estados, centrados preferentemente en crear las sociedades del bienestar.

Espectacular desarrollo tecnológico, especialmente a partir de los años noventa, en el campo de las telecomunicaciones

Ello se traduce en nuevas potencialidades y, en consecuencia, en una mayor eficiencia, puesto que son aplicables al ámbito personal en cualquier lugar y en cualquier momento. A título de ejemplo, los profesionales de la construcción ya pueden solicitar un servicio, consejo, ayuda o asesoramiento en tiempo real.

El desarrollo tecnológico alcanzado durante este período también permite disponer de nuevos materiales y de los sistemas más técnicos adecuados para su aplicación. A ellos ya nos hemos referido en el apartado titulado “Construcción tecnológica”.

En la Europa occidental, la interdependencia entre estados, que ceden parte de su soberanía para obtener beneficios comerciales, la libre circulación de personas y mercancías o una moneda única, se traduce, en el ámbito de la vivienda, en la posibilidad de disponer de materiales, técnicas, procesos y normativas armonizados, y de homologar la formación de los profesionales encargados de aplicarlos. Es lo que se denomina el proceso de integración europea en el ámbito de la CEE.



5.12.2. Justificación del período temporal

Las fechas de referencia (1975-2006) se han escogido por unos motivos muy concretos. La primera coincide con el final de la dictadura franquista y es a partir de ese momento que se suceden una serie de cambios sociales y políticos que abren nuevas perspectivas en el ámbito de la construcción.

La segunda fecha coincide con la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación (CTE) y el inicio del estallido de la burbuja inmobiliaria. Ambos factores inciden en la necesidad de establecer un nuevo enfoque sobre cómo abordar la construcción de vivienda colectiva, que supone un paréntesis y propicia la apertura de una nueva etapa.

5.12.3. Los marcos técnicos normativos del período y las estrategias políticas

Como se ha indicado, a partir de 1975 la construcción se encuentra con la posibilidad y la necesidad de generar un marco normativo, con el fin de mejorar progresivamente la calidad, no solo de las viviendas colectivas, sino del parque edificado en su conjunto.

Las normas M.V. del Ministerio de la Vivienda, publicadas en 1957 y vigentes hasta la fecha, eran claramente insuficientes para los nuevos cauces en que se desarrollaba o pretendía desarrollarse la construcción.

La ausencia de una normativa técnicamente eficiente y de interpretación clara, junto con la aparición de nuevos materiales, la pérdida de los oficios tradicionales y la necesidad de efectuar luces cada vez mayores, trajeron consigo, especialmente durante los años ochenta, un cúmulo de defectos constructivos muy complejos y de cara reparación: flechas diferidas, condensaciones, efectos higrotérmicos fuera de control, problemas de compatibilidad entre los elementos portantes y los portados o desprendimientos de aplacados son algunos de los más comunes.

La aparición, en 1977, de las Normas Básicas de la Edificación (NBE), de obligado cumplimiento, fue completada con la publicación de las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), que no era obligatorio cumplir. Pero constituían un buen marco técnico de referencia para la aplicación operativa de las NBE.

Por primera vez, los proyectistas y los constructores disponían de unos parámetros objetivos de diseño. Supusieron, pues, un avance cualitativo, aunque insuficiente, para la mejora de las prestaciones de seguridad y de confort de las nuevas viviendas que se construían de acuerdo con sus especificaciones.

Su mayor defecto fue la falta de un control que garantizara el cumplimiento de las especificaciones contenidas en el proyecto: lo que se indicaba sobre el papel



no siempre era ejecutado con rigor. Y tampoco era exigido y corregido en profundidad por la Administración.

A partir de mediados de los ochenta, se empieza a considerar la rehabilitación como una rama más de la construcción y, en consecuencia, se van generando un sinnúmero de soluciones específicas, que tienen por objeto corregir, entre otros, los déficits de estanqueidad, de aislamiento, de accesibilidad, de instalaciones y estructurales que padecían muchos de los edificios de vivienda colectiva construidos en las décadas anteriores.

Numerosos bloques de vivienda colectiva pertenecientes a polígonos construidos durante los años sesenta y setenta fueron intervenidos durante este período para evitar derribos y desalojos. El caso de los edificios construidos con viguetas de cemento aluminoso es paradigmático de este tipo de actuaciones.

En 1999, se publicó la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE), que establecía los criterios reguladores básicos del sector de la edificación, cuando las NBE ya habían agotado su recorrido. La propia LOE instaba al Gobierno para que estableciera los requerimientos mínimos de los edificios en aspectos básicos como la seguridad y la habitabilidad.

La época escogida para realizar cambios en un sector tan inmovilista como el de la construcción no era la más favorable; ello explica que el Código Técnico de la Edificación (CTE) no apareciera hasta 2006, es decir, siete años más tarde.

Es preciso considerar que una parte del período estudiado coincide con el de mayor producción de viviendas en España. El parque de viviendas aumentó a una tasa anual media del 2,7 % entre 1995 y 2007 (de 18,3 a 25,1 millones), auspiciada, en buena medida, por la evolución alcista de los precios y por las expectativas de revalorización.

Paralelamente, la economía española experimentó un fuerte impulso de la demanda interna, que creció a una tasa anual media del 4,7 %, con incrementos del consumo, de la inversión en bienes de equipo y de la inversión en construcción del 4,2 %, el 5,5 % y el 6,7 %, respectivamente. En contrapartida, aumentó vertiginosamente la necesidad de aportar ingentes recursos externos, puesto que en este período se produjeron escasos avances de productividad. Como referencia, en 2008, dicha aportación se situó en el 9,1 % del PIB, con los resultados de todos conocidos.

Cuando el CTE entró en vigor, se concedió un año de gracia (2007) a los nuevos proyectos para que se adecuaran a las prescripciones del mismo. La avalancha de proyectos que se presentaron en los colegios de arquitectos para su visado antes de la fecha de entrada en vigor del CTE fue histórica.

Las razones de esta forma de proceder por parte de los promotores eran claras: para cumplir con las especificaciones CTE, los edificios construidos han de



disponer, entre otros aspectos, de un proyecto más detallado, mayores espacios y requerimientos para garantizar la accesibilidad, niveles más elevados de aislamiento térmico y acústico, e incorporar las energías renovables. Por ello, la mayoría de los proyectos de vivienda colectiva que se terminaron antes de 2010 se construyeron de acuerdo con las especificaciones NTE.

Si a ello se añade el clamoroso pinchazo de la burbuja inmobiliaria a partir de 2008 y el consiguiente hundimiento del sector de la edificación, puede afirmarse que, a finales de 2012, el CTE aún no se ha aplicado en plenitud ni se han desarrollado modelos constructivos adecuados a las circunstancias que deparará el futuro.

En los próximos años, el panorama de la construcción de vivienda colectiva pasará a un segundo plano. En 2005, la construcción representaba el 20 % del PIB; en 2011, el 11,3 %. La actividad constructora decreció un 33,1 % solo en el período 2009-2011.

Es de suponer que, al final de la crisis, hacia 2014, la incidencia del sector en el PIB no será superior al 8 %, un índice que, en el mejor de los casos, se mantendrá estable durante años, debido al exceso de edificación acumulada de reciente construcción. Ello dará, sin duda, un nuevo impulso a la rehabilitación.

En distintos foros, se coincide en señalar que “la construcción no volverá a ser lo que era antes”, y ello repercutirá en aspectos de carácter económico, social y patrimonial. También deberían incidir en ella las aportaciones positivas procedentes de los ámbitos de la tecnología, de la sostenibilidad y de la reducción de los impactos ambientales, para construir en la línea del “menos es más” propugnado por Mies van der Rohe.

Se deberá incrementar la productividad y reducir sustantivamente el número de empleos directos relacionados con el sector. Para ello, es preciso partir de proyectos perfectamente equilibrados. Estos habrán de ser tanto arquitectónicos como tecnológicos. Deberán conjugar sistemas constructivos prefabricados y semiprefabricados abiertos y de gran calidad, donde tendrán cabida los módulos prefabricados de baños y cocinas contruidos en el taller, listos para ser conectados a los suministros.

Será necesario controlar, en todo momento, las economías de escala, para no producir más allá de lo necesario. Por ello, la construcción de vivienda colectiva no podrá igualar los ritmos propios de la industria y deberá mantenerse en la semiartesanalidad de las series cortas.

Las necesidades y los estándares de vivienda colectiva han cambiado poco desde los estudios realizados en la República de Weimar en los años veinte del siglo pasado bajo la óptica racionalista.

Desde el punto de vista de su diseño óptimo y su ajustada relación calidad-precio, las viviendas colectivas responden a criterios matemáticos de máximos y



mínimos. El ángulo recto es el óptimo, las superficies, el número de piezas y las longitudes de fachada están acotadas. Sobre esta base, cabe concluir que las mejoras deberán buscarse más en las técnicas y en los sistemas de construcción que en las posibilidades del diseño arquitectónico.

5.12.4. El caso del polígono de la Mina

El polígono de la Mina, por su tamaño, su aislamiento inicial, el planteamiento de sus edificios y la extracción social de sus habitantes, constituye un ejemplo especialmente significativo de las cuantiosas inversiones que ha sido preciso realizar para adecuar la mala calidad inicial de los edificios y la carencia de infraestructuras de muchos de los polígonos construidos durante la década de los setenta.

El polígono de la Mina es también un laboratorio, no siempre afortunado, de operaciones de rehabilitación. En la actualidad, la rehabilitación de edificios de vivienda colectiva cuenta con un amplio repertorio de soluciones técnicas, plenamente probadas. Están basadas, en buena medida, en las experiencias desarrolladas por los profesionales de la construcción en los últimos años en polígonos de la misma época.

El barrio de la Mina se encuentra en el término municipal de Sant Adrià de Besòs, en el límite con el municipio de Barcelona, en una zona que en los años setenta estaba totalmente desconectada de las estructuras urbanas de ambos municipios.

La construcción del polígono se inició en 1969. En 1975, la Mina tenía ya más de 15.000 habitantes y 2.029 viviendas. Se planteó como el lugar idóneo para realojar diferentes grupos de población con déficits sociales, laborales, culturales o económicos.

La Mina arroja las cifras siguientes: 20 bloques lineales de entre 5 y 12 plantas, con 2.721 viviendas y 181 locales. Ello supone una media de 136 viviendas por bloque. Ocupa una superficie 3,87 km². La densidad actual del barrio supera ampliamente los 500 habitantes/hectárea. Hasta el año 2005, se habían invertido 174 millones de euros en su rehabilitación, que no lograron alterar su marginalidad.

En la fotografía izquierda de la página siguiente se observa el gredado original de los acabados en la parte baja de las fachadas. Debido a su proximidad al mar y a la calidad del hormigón empleado en su confección, pronto empezaron a desprenderse fragmentos del mismo, con el peligro que ello suponía. La solución adoptada para resolver el problema fue revestir con chapa lacada las zonas afectadas, lo cual ocultaba el problema sin corregirlo. El parecido de la chapa colocada con la decoración original no merece comentario (v. fotografías).



Otro de los problemas de los edificios de la Mina era la carencia o la insuficiencia de ascensores. Las operaciones de corrección se realizaron entre 2004 y 2010 y afectaron tanto los bloques de planta baja y cinco plantas piso (v. fotografía inferior izquierda) como los grandes bloques de doce plantas (v. fotografía inferior derecha).



En estos últimos, se realizaron salidas de ascensor en aquellos rellanos del edificio que no las tenían, puesto que, cuando se construyeron a principios de los años setenta, solo se hicieron paradas en siete rellanos. Asimismo, se han dispuesto pasarelas de enlace entre las escaleras para facilitar la evacuación en caso de emergencia. La instalación de los ascensores ha representado una inversión de 5,6 millones de euros, el 20 % de los cuales ha sido aportado por los vecinos y el 80 % restante, por la Administración.

5.12.5. La adaptación de un modelo antiguo a las nuevas necesidades: el bloque lineal con patios interiores

La falta de sintonía entre las primeras versiones de bloque lineal y los automóviles lleva a plantear nuevos modelos.

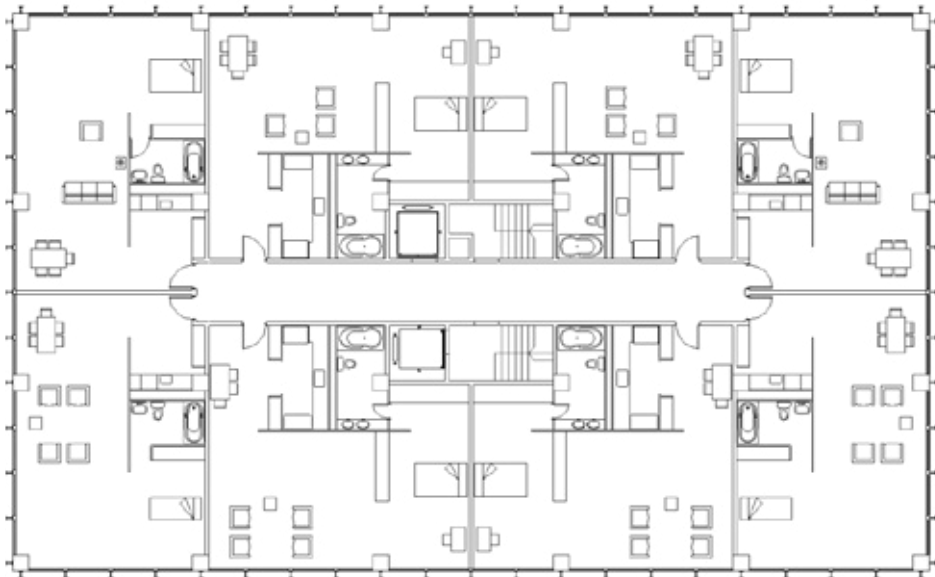
El modelo racionalista original presenta unas ventajas higiénicas indiscutibles en cuanto al asoleo y la disposición de ventilaciones cruzadas; sin embargo, la disposición de una escalera para dos viviendas penaliza su ratio de aprovechamiento. La direccionalidad de la estructura de un bloque lineal tipo afecta su

comportamiento frente a los esfuerzos horizontales. Además, la superficie de fachada que corresponde a cada vivienda es excesiva en relación con su escaso fondo. Ello se traduce en unos costos de mantenimiento potencialmente elevados con respecto a los modelos de edificios más compactos.

Como ejemplo de la evolución de la compactación de una planta habitacional obtenida a partir de un bloque lineal, el gráfico inferior es muy ilustrativo. Corresponde a la planta de los apartamentos Lake Shore Drive, edificio de 26 plantas situado en Chicago. Fue proyectado por el arquitecto Mies van der Rohe en 1948 e inaugurado en 1951.

Con independencia de su estructura de acero y de las fachadas, resueltas mediante un muro cortina, su planta de $19,70 \times 32,50$ m está concebida con una simplicidad y una elegancia extraordinarias. En ella, la regularidad geométrica de la estructura, absolutamente simétrica, se integra perfectamente en el ritmo generado por la distribución modular de los ocho apartamentos que la componen.

Obsérvese que la planta podría crecer, añadiendo dos o cuatro apartamentos más a los cuatro apartamentos centrales. De este modo, la linealidad del edificio quedaría más marcada. Para la prevención de incendios, las escaleras están duplicadas e independizadas del vestíbulo general de la planta.



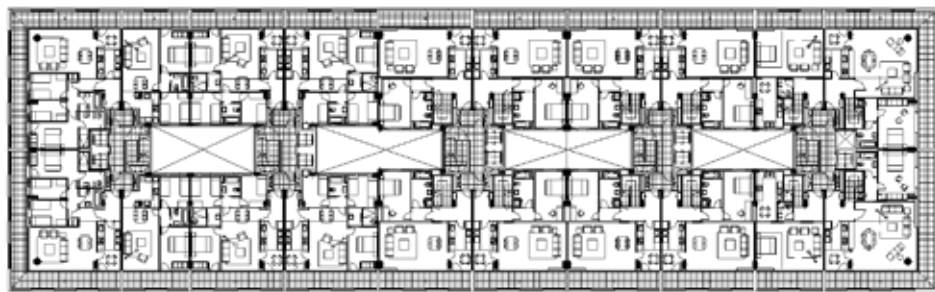
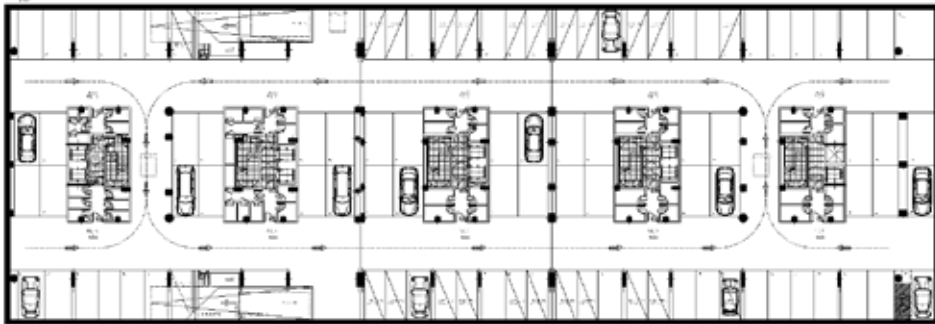
Como aspectos negativos de esta distribución cabe citar la falta de ventilación directa de las escaleras, de los baños y de las cocinas. Obsérvese que se trata de apartamentos, no de viviendas, puesto que su superficie es muy pequeña y solo contienen un dormitorio.



Los apartamentos se plantean como espacios habitacionales de uso temporal, mientras que las viviendas están concebidas para uso familiar, aspecto que justifica, hasta cierto punto, la carencia de ventilaciones directas en los baños y las cocinas.

El ejemplo siguiente, del que se muestra una planta sótano, la planta del cambio de alturas y la sección, corresponde a un edificio terminado en 2007.

Conceptualmente, la planta responde a dos bloques lineales, unidos por escaleras comunes y con los testeros edificando configurando una planta de gran compacidad. Los espacios entre las cinco escaleras son patios de luz y de ventilación.





Cada escalera sirve a cuatro viviendas por rellano, el doble que en un bloque lineal tradicional, con lo cual se mejora su aprovechamiento. Las escaleras están sectorizadas mediante puertas cortafuegos que dan acceso a las viviendas.

Obsérvese que, en el plano, los patios situados a la izquierda son de mayores dimensiones que los de la derecha, porque el edificio dispone de una planta más en dicha zona. Se mantiene así la proporción de 1/7 entre la anchura y la altura. Es evidente que los patios resultan muy forzados y a ellos llegan a ventilar, además de las escaleras, hasta ocho piezas por planta.

Igualmente puede apreciarse que, en las viviendas de la zona derecha, se ha sustituido uno de los dormitorios por una escalera para acceder al espacio bajo cubierta y así se han formado viviendas dúplex.

El edificio, compuesto por un total de 130 viviendas, locales comerciales y aparcamiento, dispone de cinco escaleras. La normativa urbanística imponía un mínimo de 260 plazas de aparcamiento, lo que obligó a construir tres sótanos destinados a tal fin. Cabe considerar un mínimo de 25 m² construidos por plaza de aparcamiento. En este caso, la ratio se sitúa en 27,69 m² por plaza.

Las dimensiones del edificio en planta, 30 × 80 m, están condicionadas por la circulación de los vehículos. En cuanto a la anchura, descontados 90 cm correspondientes al grueso de los muros pantalla, restan 29,10 m. La dimensión mínima para las plazas de aparcamiento es de 4,50 × 2,20 m.

Para obtener el máximo aprovechamiento del espacio resultante, han de disponerse coches a ambos lados de los pasos de circulación. Ello supone restar, de los 29,10 m de luz útil entre las caras interiores de los muros pantalla, un mínimo de 4 × 4,50 m, eso es, 18 m, con lo cual quedan un total de $(29,10 - 18,00) / 2 = 5,55$ m para cada paso.

Si se considera suficiente un paso de 5 m, pueden repartirse los 55 cm restantes entre las cuatro zonas de aparcamiento, de modo que a cada una le corresponderían 13,75 cm más, es decir, 4,637 m.

De acuerdo con los datos anteriores, puede observarse que, desde el urbanismo, se planeó de forma muy ajustada la dimensión de la anchura del bloque.

En cuanto a la longitud, esta resulta más flexible, puesto que en ella intervienen los vestíbulos de escalera y las rampas. Obsérvese que la disposición de los pilares de la estructura se articula, en sentido longitudinal, mediante espacios comprendidos entre dos y tres plazas de aparcamiento, lo que sitúa las luces entre ejes en distancias comprendidas entre los 5 y los 7 m.

Excepcionalmente, en la segunda crujía de ambos testeros, la luz entre pilares abarca cuatro plazas de aparcamiento, por lo que la distancia entre ejes es de



9,30 m, prácticamente en el límite de las posibilidades del sistema estructural. Ello obligó a unificar el canto del forjado a 35 cm, es decir, un casetón de 30 cm más 5 cm de capa de compresión, con un peso propio de 5,35 KN/m².

La necesidad de disponer de espacio para aparcar los coches implica, en el edificio estudiado, efectuar un vaciado de unos 22.800 m³ de tierra, con los sistemas de contención pertinentes. Llevar a cabo esta operación bajo rasante supone, en el mejor de los casos, emerger de la cota cero a los seis meses de iniciados los trabajos.

Es preciso considerar, además, los impactos ambientales derivados de la extracción y del transporte de tierra, del sistema de cimentación y de las contenciones que impone el modelo constructivo estudiado.

Esta situación, común a múltiples promociones, tiene lógica cuando se actúa en zonas consolidadas en que la disponibilidad de espacio es muy reducida; sin embargo, el modelo se extrapola a cualquier circunstancia, en aras de la comodidad de disponer de un acceso directo del vehículo al ascensor, aspecto fácilmente resoluble habilitando un espacio de carga y descarga frente el vestíbulo de acceso de cada escalera.

En el caso que nos ocupa, el edificio de referencia se implantaba en un polígono de nueva creación. Mediante la previsión urbanística de edificios de aparcamiento y servicios sobre rasante, se reducirían tanto los tiempos de ejecución como los costes y los impactos ambientales derivados de construir bajo rasante.

Es preciso considerar, además, que el riesgo de almacenar coches bajo las viviendas ha de combatirse con costosos sistemas de ventilación y de prevención de incendios que, además de constituir una servidumbre para la construcción, tienen elevados costes de mantenimiento.

Los edificios de aparcamiento sobre rasante resuelven gran parte de sus necesidades con luz y ventilación natural, y tienen pocos gastos de mantenimiento, comparados con los de un aparcamiento construido bajo rasante.

Al construirse sin los condicionantes que impone a la estructura la compatibilidad con las viviendas, los aparcamientos sobre rasante pueden edificarse aplicando modelos de eficiencia espacial y estructural. Con ello se lograría racionalizar, en beneficio de todos, la construcción tanto de los bloques de vivienda como de los edificios de aparcamiento.

Aunque la construcción sea "capaz" de hacer edificios complejos, ello no ha de suponer, en modo alguno, renunciar a la racionalidad. Cabe recordar, una vez más, que no todo lo que técnicamente puede construirse ha de construirse.

5.12.6. Las tipologías y las alturas propias de la vivienda colectiva y su relación con la construcción masiva. Bloques lineales y bloques en torre

De acuerdo con lo expuesto, salvo en casos singulares, dos son las tipologías edificatorias que dan respuesta a la vivienda social colectiva: el bloque lineal y el bloque en torre.

Entre los bloques lineales, se encuentran dos subtipos:

- Los formados por adición de módulos de escalera que sirven a dos viviendas por planta, que se desarrollaron inicialmente en Alemania durante el período de la República de Weimar.
- Los que disponen de un corredor de acceso, abierto o cerrado, como en las corralas, los familisterios o los bloques residenciales soviéticos.

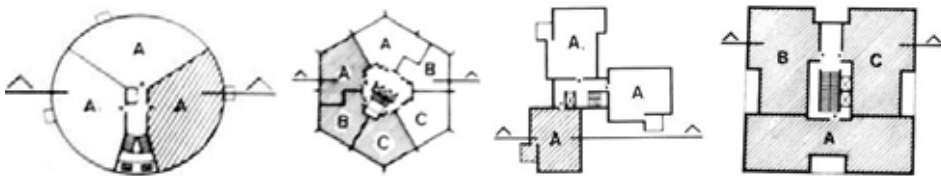
A los mismos, nos hemos referido ampliamente en los apartados anteriores.

Los bloques en torre hacen su irrupción como tipología apta para el desarrollo masivo de viviendas colectivas a partir de los años cincuenta del siglo pasado. Si bien son más versátiles que los bloques lineales, por su composición de planta en torno a un núcleo de enlaces vertical, requieren sistemas constructivos avanzados, puesto que se desarrollan, en general, en altura y para ello precisan disponer de ascensores.

En función de su altura y del número de viviendas que confluyen en una escalera, han de considerarse, con mayor cuidado, los aspectos relativos a su evacuación y a la prevención de incendios.

Los bloques en torre pueden adoptar formas cerradas próximas al cuadrado o circulares, o bien formas abiertas formando retranqueos y cuerpos salientes, tanto simétricos como asimétricos, como se muestra en los cuatro esquemas de planta adjuntos.

Variedad de composición de los edificios en torre



Ambas tipologías, bloque lineal y bloque en torre, se desarrollaron como contenedoras de vivienda colectiva: la primera, en los años veinte y, la segunda, a partir de los años cincuenta del siglo pasado, cuando el automóvil todavía no estaba al alcance de todo el mundo. En aquellos tiempos, el aparcamiento todavía



no era problema y podía efectuarse en superficie; sin embargo, pronto lo sería y había que hacerle frente.

Ninguno de los tipos edificatorios descrito estaba preparado, dimensionalmente, para incorporar vehículos en su interior. Los bloques lineales tienen testeros de menos de 10 m y, además, en la mayoría de los casos, un muro de carga central.

Los bloques en torre típicos rondan, en sus primeras versiones, los 20 m de lado. En los mismos, la disposición central del núcleo vertical anula toda posibilidad de aprovechar los espacios resultantes como aparcamiento.

En zonas de baja densidad, es posible organizar el aparcamiento en superficie aprovechado los espacios entre dos edificios contiguos. Cuando las densidades crecen, es preciso construir sobre rasante edificios destinados a garaje o recurrir a la construcción de aparcamientos subterráneos situados bajo los bloques y los espacios libres. Por ello, a partir de los años setenta, las exigencias dimensionales de las estructuras de los edificios de vivienda colectiva ya no se rigen por la escala humana sino que responden más bien al dictado del automóvil.

Esta servidumbre se traduce en luces mayores, con el consiguiente aumento del canto de los forjados y del peso general de la construcción. Se considera que un edificio convencional de viviendas con luces inferiores a 5 m y muros de carga pesa unos 1.000 kg/m². Si se trata de un edificio con aparcamiento con luces de hasta 8 m, el peso por metro cuadrado construido sobre rasante se incrementa un 30 %.

Las alturas alcanzadas por la edificación constituyen un elemento determinante para escoger la técnica constructiva estructural más apropiada a los fines propuestos.

Se entiende por edificación de baja altura aquella que no supera las cuatro plantas. Es el campo de actuación más favorable para las fábricas tradicionales. Es también el límite para hacer prescindible el ascensor, si bien los criterios actuales de accesibilidad obligan a colocarlo.

Los edificios de media altura se sitúan entre las cuatro y las ocho plantas, entendidas estas últimas como el límite para las fábricas avanzadas. Ante el abandono progresivo de los muros de carga, las alternativas usuales para construir hasta quince plantas son, por este orden, las estructuras de hormigón armado con forjados reticulares o losas macizas y los encofrados de túnel.

La construcción de edificios de viviendas de más de quince plantas requiere emplear tecnología avanzada de hormigón armado, realizada mediante encofrados trepantes o encofrados de túnel.

El empleo de prefabricados convencionales, después del trágico suceso de Ronan Point, en que una simple explosión de gas en la planta 18 tuvo efectos catastróficos está ya totalmente descartado.



El bloque afectado, de 23 plantas de altura y un total de 110 viviendas, que había sido construido en 1960, fue reparado después de la explosión de 1968 y demolido en 1986 (v. fotografías superiores).

El caso de Ronan Point conmovió a la opinión pública inglesa y fue un toque de atención con respecto a la seguridad que ofrecían determinadas formas de construir, así como un ejemplo de la reacción de las autoridades ante una situación de peligro potencial.

El sistema constructivo puesto en cuestión era un mecano de paneles de hormigón armado con el que llegaron a construirse hasta 470.000 viviendas. Todas ellas fueron derribadas antes de finales de los años ochenta. Constituye un ejemplo claro de lo que puede suceder cuando se pretende construir deprisa antes que bien.

5.13. Conclusiones

Este apartado resume las reflexiones y los análisis de los apartados precedentes, y trata de atisbar cómo debería ser y organizarse la construcción de vivienda colectiva a medio plazo. Los aspectos más representativos que lo configuran son:

- Planeamiento
- Racionalidad
- Depuración de modelos y de técnicas constructivas
- Atención al parque residencial edificado



- Respuesta amable del edificio
- La alternativa de los semiprefabricados

5.13.1. Planeamiento

La planificación a gran escala, articulada adecuadamente con el soporte urbanístico y el respeto al lugar urbano en que se sitúan los edificios, resulta esencial para economizar desplazamientos y facilitar una vida más cómoda a los ciudadanos. En otras palabras, tratar de edificar sin resolver adecuadamente las infraestructuras y los servicios es sinónimo de fracaso.

5.13.2. Racionalidad

Los tipos arquitectónicos relacionados con la residencia colectiva presentan pocas variantes frente a su organización en planta: salvo excepciones, los bloques lineales y en torre son los modelos más habituales. La construcción entre medianeras, en manzana cerrada, constituye una tercera opción, heredera de la tradición decimonónica.

Esta escasa variedad de tipos es debida tanto a las funciones propias de las viviendas como a los espacios necesarios para realizarlas, vinculados a la escala humana.

El máximo aprovechamiento del espacio físico en la construcción se logra mediante el uso de triedros trirectangulares. El uso de ángulos agudos, obtusos u otras formas geométricas más complejas puede ofrecer, sin duda, resultados y sensaciones novedosas, pero en modo alguno aporta mayor eficiencia a los espacios resultantes.

Es preciso que los profesionales asuman este hecho y se concentren en lograr una mejora real de la calidad de la construcción mediante la utilización práctica de los avances tecnológicos aplicables a la edificación. Por tanto, es razonable considerar que el margen de mejora tecnológico es mucho más amplio que el que puede ofrecer la arquitectura, desde las perspectivas de la geometría y la funcionalidad.

En un contexto de racionalidad constructiva y de sostenibilidad, resultan vanos los intentos de conseguir monumentos espectaculares en cada obra de arquitectura. En consecuencia, la construcción obscena debe eliminarse de los procesos edificatorios.

5.13.3. Depuración de modelos y de técnicas constructivas

Es preciso efectuar un trabajo de depuración de los modelos y las técnicas constructivas, especialmente en el campo de la vivienda colectiva, pues es el que acapara mayor porcentaje de construcción.



La vivienda colectiva del siglo XXI no puede ni debe construirse conforme a los planteamientos de los edificios surgidos de las NBE y NTE. Asimismo, es preciso considerar las economías de escala y la evolución demográfica de la población y sus necesidades, debidas al aumento de las familias monoparentales, entre otras razones.

Ya sabemos que es posible construir mucho más de lo necesario, incluso con técnicas constructivas obsoletas, puesto que lo estamos viviendo día a día.

En el contexto que hemos descrito, más que construir mucho y de prisa habrá que construir poco pero muy bien y de forma eficiente. Ello se traducirá en una notable reducción del peso de la construcción en el PIB y en una disminución de la mano de obra necesaria para llevarla a cabo.

Los sistemas prefabricados de gran producción no tendrán cabida, a medio plazo, por falta de demanda. Históricamente, se utilizaron para dar respuesta a situaciones excepcionales. Su falta de continuidad y su fracaso han quedado plasmados en las páginas anteriores.

Los laboratorios de construcción de las universidades deberían desempeñar un papel clave, a través de sus estudios científicos, para evitar la dispersión de los modelos y de los sistemas constructivos para realizarlos. Así, los constructores estarían informados sobre los procedimientos óptimos para llevar a cabo su trabajo de forma eficiente, sin necesidad de efectuar complejos análisis, fuera del alcance de sus posibilidades.

La depuración de los modelos y la uniformidad de los sistemas constructivos no han de suponer un adocenamiento formal. Las posibilidades de variación son infinitas, en colores, en texturas, en volúmenes o en la forma y la disposición de los huecos de la fachada.

5.13.4. Atención al parque residencial edificado

La atención al parque residencial edificado ha de girar en torno a dos ejes: la sustitución de los edificios obsoletos, y el mantenimiento y la rehabilitación de aquellos que, por sus características y circunstancias, lo necesiten.

En ambos casos, se requiere una visión de conjunto desde el urbanismo, tanto para agilizar los procesos de renovación como para establecer políticas y acciones orientadas a preservar aquellos edificios o conjuntos edificados de valor patrimonial.

La conservación del parque edificado constituye ya una auténtica especialidad que, sin duda, tiene proyección de futuro. En ella, tendrán cabida solamente los buenos artesanos de los múltiples oficios relacionados con la construcción: albañiles, yeseros, estucadores, carpinteros, fontaneros..., dirigidos por profesionales muy preparados.



5.13.5. Respuesta amable del edificio

Bajo este epígrafe se incluyen diversos aspectos, como la accesibilidad, el confort y la higiene, la facilidad y la economía del mantenimiento, tanto en el interior de la vivienda como en los servicios comunes.

A la hora de valorar la respuesta amable de los edificios, debe considerarse su relación con el medio ambiente, en todas las fases del proceso: diseño, construcción, explotación y deconstrucción.

Los planteamientos de diseño son básicos, puesto que constituyen el cauce por el cual va a discurrir toda la vida del edificio. Es preciso considerar, en el diseño, las opciones que tengan menos impacto ambiental, las soluciones que requieran menos mantenimiento y menos aportación de energía, el aprovechamiento de las energías alternativas o la integración de plantas que contribuyan a la mejora de la estética y a la oxigenación ambiental. Y, por último, valorar la facilidad de deconstrucción y reciclaje de los materiales utilizados en las distintas soluciones constructivas.

En la mayoría de las ocasiones, los resultados son favorables a las técnicas constructivas basadas en el montaje (vía seca), frente a las tradicionales, fundamentadas en la adición (vía húmeda).

5.13.6. La vía de los semiprefabricados

En las sociedades estabilizadas en que la vivienda no es un objeto carencial sino un producto más de consumo, sujeto a leves crecimientos de población e incluso, en algunos casos, con tasas negativas, las soluciones han de centrarse más en la calidad que en la cantidad. Es preciso buscar, en las economías de escala, el equilibrio entre las potencialidades enormes de la tecnificación a ultranza, inasumibles por el mercado, y las formas tradicionales de construir, desechables por ineficientes.

En apartados anteriores se ha hecho referencia a los encofrados de túnel y sus posibilidades de utilización, adecuándolos a los estándares actuales. Sin despreciar sus aspectos positivos, pecan de rigidez dimensional. Cuando se trata de intervenir en un casco urbano, es preciso adaptar la edificación a las dimensiones de un solar situado entre medianeras.

La vía de los semiprefabricados abiertos ha sido estudiada por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB) a través de dos patentes, de las que se da somera información a continuación.

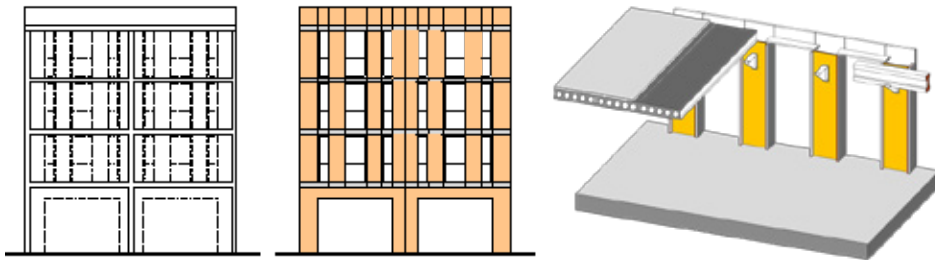
La primera consiste en un sistema de paneles semiprefabricados portantes y de cerramiento, entre cuyas ventajas cabe citar la ligereza durante el transporte, el monolitismo de los nudos, la adaptabilidad dimensional, la compatibilidad con



todo tipo de forjados, la seguridad de ejecución y su rapidez y economía con respecto a los sistemas tradicionales. Además, se reducen los problemas de compatibilidad higrotérmica y de deformaciones diferidas entre los elementos portantes y portados. Igualmente, se reducen la cuantía de las vigas de borde porque el forjado dispone de un apoyo continuo en lugar del puntual que ofrecen los pilares.

El gráfico inferior izquierdo muestra la construcción de una fachada mediante el sistema tradicional. La estructura deja grandes huecos, en los edificios de menos de diez plantas, que no es posible cerrar hasta que se ha terminado la estructura. A su lado, la misma fachada, realizada con paneles semiprefabricados, terminada para cada planta. El ajuste dimensional se realiza en los huecos. Ello permite resolver el plano de una fachada con dos o, a lo sumo, tres tipos de panel.

La perspectiva situada a la derecha muestra que los propios paneles se convierten en portantes para recibir un forjado de placas alveolares. Los soportes provisionales serán retirados una vez fraguados el nudo y la capa de compresión.



Como el grosor final, con acabado y aislamiento incluidos, es de 25 cm, se mejora la ratio superficie útil/superficie construida con respecto a los cerramientos tradicionales de 30 cm. También se evita la aparición de pilares en el interior de las piezas, en el plano de la fachada.

Con el uso de los paneles mencionados, se pueden construir edificios de hasta diez plantas, sin necesidad de adoptar medidas especiales. Los propios paneles, en función de su direccionalidad, constituyen excelentes pantallas para la absorción de los esfuerzos horizontales.

Estos paneles pueden utilizarse en las fachadas, así como en la formación de patios, cajas de escalera o muros medianeros. Se recupera así el concepto del muro de carga, pero multiplicando por diez su módulo de deformación y sus valores de empotramiento.

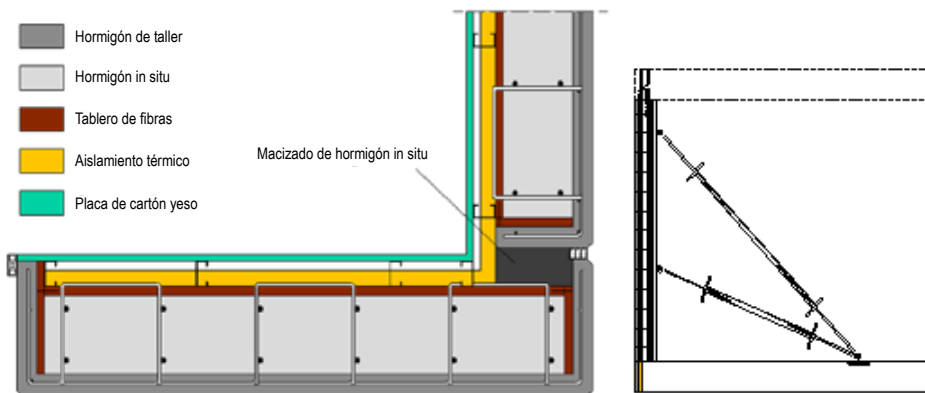
El gráfico inferior izquierdo muestra una solución de esquina en la cual pueden observarse los aspectos siguientes:



El panel está compuesto por una piel exterior de hormigón armado de 4 cm de espesor y un revestimiento interior formado por un tablero de fibras. El tablero está perforado, de modo que a su través se pasan unos estribos en U, a los cuales se fijan las armaduras de flexocompresión del panel. Estas son variables en función de las cargas a soportar y su longitud incorpora las esperas para la planta siguiente. Cuando se vierte hormigón en el molde, las puntas de los estribos quedan incorporadas a su masa. Al endurecerse este, se genera un encofrado perdido, de poco peso, equivalente a la altura total de la planta que se desea construir. A título indicativo, un panel de 1 m de anchura pesa 475 kg. Los paneles disponen de anclajes para su elevación y puesta en obra.

El acabado de los mismos admite todo tipo de texturas y colores, y ofrece un amplio abanico de posibilidades diversas.

RELACIÓN DE MATERIALES



La colocación en obra se realiza fijando los paneles mediante tornapuntas ajustables a un perfil HALFEN soldado a una greca, ambos embebidos en la capa de compresión, como se muestra en el dibujo anterior. El sistema provisional de aplomado y soporte está calculado para resistir vientos de hasta 120 km por hora.

Una vez colocados los paneles, se procede a rellenarlos con hormigón. El grosor del interior de los paneles es de 14 cm. En los edificios de menos de siete plantas de altura, es posible utilizar hormigones de resistencia inferior a la establecida por la EHE, realizados con materiales reciclados, gracias a la protección que la piel del panel proporciona al hormigón de relleno frente a los agentes atmosféricos.

Como puede apreciarse en el gráfico superior derecho, el acabado interior se realiza con tabiques de cartón yeso, en cuya cámara es posible alojar tanto las instalaciones como el aislamiento térmico. La colocación inmediata de premarcos facilita la fijación de las protecciones provisionales de los huecos.



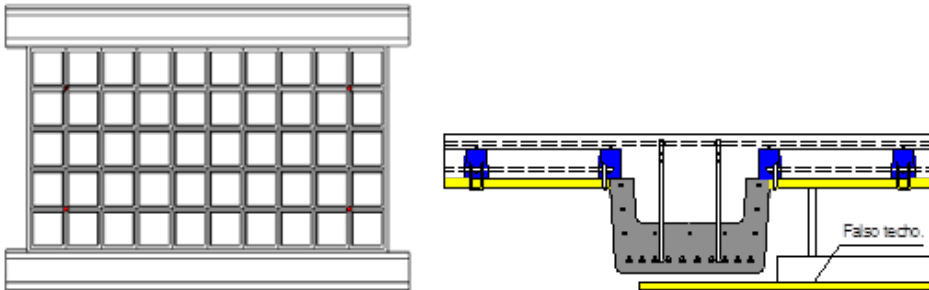
La carpintería exterior se plantea, en general, integrada a toda la altura, incorporando la persiana arrollable. Si se desea, pueden realizarse también antepechos prefabricados.

Otros de los problemas que pueden resolver los semiprefabricados son el peso y la constitución geométrica de los forjados. La compatibilidad entre vivienda y aparcamiento exige luces comprendidas entre los 5 y los 8 m. Ello se traduce, como se ha indicado más arriba, en cantos de forjado de 35 cm y un peso propio $5,35 \text{ KN/m}^2$.

Los forjados tradicionales estaban formados por viguetas y bovedillas, por lo que precisaban de un falso techo, formado habitualmente por cañizo y yeso para ofrecer una superficie plana. El paso siguiente consistió en sustituir las bovedillas por casetones, y así se conseguía una superficie inferior plana que se podía enyesar.

Este mismo concepto se transpuso a los forjados reticulares, cuyo canto y peso se han ido incrementando con el paso del tiempo. En la actualidad, con la aparición de los trasdosados de cartón yeso, un forjado plano por la cara inferior deja de tener sentido, especialmente cuando del mismo hay que colgar aparatos de aire acondicionado, sobre todo en los baños. En estas piezas, las alturas libres quedan reducidas a 2,20 o, en el mejor de los casos, a 2,30 m.

La patente desarrollada en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas II consiste en una parrilla de nervios de hormigón armado de $150 \times 300 \text{ cm}$, cuyos ejes forman una retícula de $30 \times 30 \text{ cm}$, y el fondo está enlazado mecánicamente a un tablero de fibras de celulosa y yeso (v. esquema inferior izquierdo).



Los nervios tienen forma trapezoidal, con 5 cm en la base, 4 cm en la coronación y 6 cm de canto. El armado está constituido por un mallazo de $300 \times 300 \times 6 \text{ mm}$ de acero B-500S.

Dicho entrevigado pesa, en la fase de montaje, menos de 53 kg/m^2 . Suspendido entre dos viguetas autoportantes, soporta el peso de los operarios y las acciones mecánicas derivadas del hormigonado (v. esquema superior derecho). En el mismo, se ha conservado para el nervio un canto de 35 cm, de modo que se



dispone de un espacio para el paso de las instalaciones o, bajando unos pocos centímetros, del falso techo para colocar una máquina de aire acondicionado.

Una vez colocado sobre el mismo, es suficiente extender el mallazo de reparto y hormigonar una capa de compresión de 3 cm de canto. Ello incrementa en 1,67 el brazo mecánico y el peso pasa de 53 a 238 kg/m². Con ello, se consigue, por la ley de la masa, incrementar el aislamiento acústico. En estas condiciones, la capacidad de carga útil del entrevigado es de 642 kg/m², cuando la exigible se situaría en un abanico comprendido entre los 480 y los 500 kg/m².

Se ha optado, para el forjado tipo, por utilizar viguetas prefabricadas autoportantes, debido a su mayor simplicidad de ejecución al no precisar de un tablero de encofrado continuo. En caso de optar por un tablero continuo, mediante la adición de unos faldones en el perímetro de la parrilla, podrían utilizarse los casetones resultantes para formar forjados reticulares ligeros.

5.14. Epílogo

Las páginas anteriores muestran, de modo somero, el duro camino que ha sido preciso recorrer hasta conseguir los niveles de calidad de las viviendas actuales.

Hay que aprovechar las circunstancias actuales de dificultad para reflexionar sobre cómo construir más eficientemente y con mayor respeto al medio ambiente sin renunciar, por ello, a unos parámetros razonables de confort.

→ 6



Tubos, cables y membranas. Construcción y creatividad

6.1. Introducción

Los tubos, los cables y las membranas, si bien son conocidos desde épocas remotas, se han incorporado como elementos constructivos de carácter estructural, de forma espectacular, a partir de los años cincuenta del siglo pasado. Tales elementos son representativos del “menos es más” propugnado por Mies van der Rohe, al ofrecer alternativas competitivas a la construcción tradicional.

Su puesta en escena en el ámbito cotidiano ha requerido el desarrollo tecnológico en los campos de la metalurgia y de la química, que ha permitido producir materiales más resistentes, rígidos e indeformables y, al mismo tiempo, más ligeros. Tubos, cables y membranas representan la construcción tecnológica en su estado más puro.

Superada la necesidad de batir récords de altura o de luz, en esta nueva etapa de la construcción su uso pretende:

- Aportar valores añadidos, derivados de la creación de nuevos modelos estructurales.
- Reducir el impacto ambiental y el costo con respecto a las soluciones convencionales.
- Generar la belleza que emana de la racionalidad.

El desarrollo de muchas de las soluciones constructivas fundamentadas en tubos, cables y membranas se ha producido, como antaño, gracias al método empírico. El procedimiento de ensayo y error se ha empleado en los laboratorios, a pequeña escala, con el propósito de extraer de ellos algoritmos para aplicarlos al cálculo de situaciones reales.



La construcción tecnológica ha incorporado, como propios, procedimientos empleados por las industrias farmacéutica o automovilística. Tal es el caso de los ensayos a pequeña escala para obtener resultados a través de parámetros estadísticos o la aplicación de procedimientos de prueba, hasta la destrucción, con objeto de analizar los puntos débiles de una solución constructiva determinada.

En este apartado, se describen, en primer lugar y de forma separada, los elementos constructivos de base: tubos, cables y membranas, y posteriormente se estudian aplicaciones y soluciones constructivas tanto de carácter monotemático como de integración entre ellos.

6.2. Los tubos, una solución fascinante para conducir fluidos y esfuerzos mecánicos

Los primeros tubos conocidos en la civilización occidental, elaborados con cerámica, se utilizaron para la conducción de aguas en el palacio del rey Minos en Cnosos. Construido hacia el 2000 a. C., fue destruido por un terremoto antes del 1700 a. C. y reconstruido en los años siguientes. Sufrió destrucciones parciales hacia el 1650 a. C. e importantes daños antes del 1400 a. C., cuando fue abandonado. Posteriormente, fue reutilizado por los dorios y los romanos. Los restos más antiguos corresponden a las tuberías cerámicas de abastecimiento. Sus piezas se ensamblaban de un modo casi perfecto mediante juntas cementadas casi impermeables. Admitían pendientes muy reducidas. También se emplearon tubos cerámicos como elementos aligerantes para la construcción como sucede en la cúpula de San Vital en Rávena (siglo VI) y, posteriormente, simples vasijas de alfar para el relleno de bóvedas en el gótico catalán.

Ya los romanos disponían de tubos de plomo para conducir agua, lo que permitió utilizar sifones y evitar los cuantiosos trabajos que, comparativamente, requería la construcción de un acueducto (v. fotografía inferior).

Los tubos fueron también empleados en la construcción de armas de fuego. Se tiene noticia del empleo de pólvora como propulsora de proyectiles alojados en tubos desde el siglo XIII en China y desde el siglo XIV en Europa, durante la Guerra





de los Cien Años. La fotografía superior derecha muestra lo que podría definirse como “el estado del arte” metalúrgico en el siglo xv. Se trata del Cañón de los Dardanelos. Fundido en bronce en 1464 por Munir Alí, tiene un peso de 18,6 toneladas y una longitud de más de 5 m. Disparaba balas de piedra de hasta 63 cm de diámetro.

Sin embargo, la tecnología metalúrgica disponible durante siglos no permitió contar con tubos aplicables a las estructuras de edificación.

6.3. El desarrollo de tubos estructurales y sus aplicaciones en las construcciones arquitectónicas

En el apartado anterior, se ha puesto de manifiesto la diversidad de usos de los tubos como portadores de todo tipo de fluidos y las aplicaciones que pueden derivarse de sus principios físicos.

Este apartado se centra, exclusivamente, en las aplicaciones estructurales y en la exposición del desarrollo de la tecnología de fabricación de los tubos estructurales desde los primeros tiempos hasta nuestros días. El estudio se completa con la presentación de modelos estructurales y ejemplos significativos, con el propósito de ofrecer un panorama de las posibilidades y las aplicaciones constructivas de los tubos de acero.

A finales del siglo xviii, gracias al desarrollo de los sistemas de producción de hierro, los tubos de este material empiezan a formar parte de lo cotidiano. Las fechas históricas y los nombres más significativos en la fabricación y las aplicaciones constructivas de los tubos son los siguientes:

- 1780. Las primeras columnas de fundición de hierro (huecas en su interior) empiezan a sustituir pies derechos de madera en las fábricas de hilado de algodón para dar cabida a máquinas cada vez de mayor peso y tamaño. La fotografía siguiente izquierda muestra el aspecto que tenía el antiguo mercado del Born de Barcelona, conjugado con la nueva intervención de recuperación de la memoria histórica de 1714, donde pueden apreciarse las columnas de fundición. La fotografía de la derecha permite observar el hueco interior propio de este tipo de columnas.
- 1784. El ingeniero James Watt (1736-1819) utilizó por primera vez tubos de fundición de hierro para construir el precedente de la máquina de vapor.
- 1816. John Russell construyó tubos de hierro con los extremos roscados, conocidos como de “rosca gas”. Estos tubos no podían fabricarse, con las técnicas disponibles, con longitudes superiores a 1,20 m (cuatro pies). Con todo, los tubos roscados representaron un paso adelante. Mediante el uso de manguitos y piezas especiales, se podían construir todo tipo de instalaciones a presión, cualquiera que fuera el fluido a conducir. Gracias



a ello, el sistema de alumbrado por gas desarrollado en 1792 por William Murdoch (1754-1839) pudo extenderse ampliamente. La fotografía inferior izquierda muestra una página de publicidad de la empresa Russell y la de la derecha, el catálogo de accesorios roscados.

- 1825. Cornelius Whitehouse, empleado en la forja de Edward Elwell en Wednesbury, consiguió por primera vez fabricar tubos por contacto mediante el calentamiento total de una pletina de acero que se hacía circular entre dos medios cilindros (à la cloche). Se obtenían secciones circulares sin costuras e interior y exteriormente lisas, mediante la unión por soldadura de los bordes de la pletina. El procedimiento fue adquirido, patentado y explotado por la empresa de Russell. Con el método anterior, un

ENTERED AT STATIONERS HALL LONDON 1811

JOHN RUSSELL & CO LIMITED
(ESTABLISHED 1811)

MANUFACTURERS OF

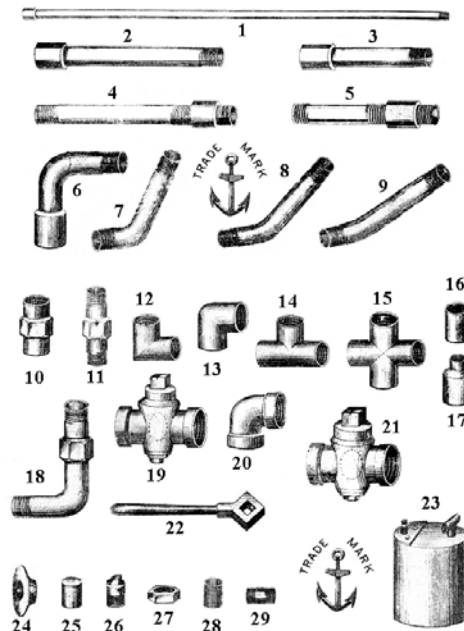
Welded Iron Tubes & Fittings
FOR GAS, STEAM & WATER.
LAPWELDED IRON AND STEEL TUBES
FOR LOCOMOTIVE, MARINE & OTHER BOILERS.
ALSO SOLID DRAWN STEEL TUBES FOR STEAM BOILERS, HYDRAULIC AND CYCLE PURPOSES.

THE ALPHA TUBE WORKS, WALSALL, AND THE OLD PATENT TUBE WORKS, WEDNESBURY, STAFFORDSHIRE.

LONDON WAREHOUSES:
341 QUEEN VICTORIA STREET, E.C. 4. 88 ABERDEEN STREET, A.D.
125 DRINGING CROSS ROAD, W.C. 43 & 45 NEWINGTON BUTTS, S.E.

MANCHESTER WAREHOUSE: LONDON ROAD. LEEDS WAREHOUSES: 16 WELLSINGTON STREET & AINE STREET, BRISTOL, 8 COLTON STREET.

SOLE MANUFACTURERS OF
CHANDLER, BRACKETT, & CO. STRIP, HOOP AND BAR IRON.
101, BRISTOL WORKS, BRISTOL.





hombre podía producir, al día, unas 25 piezas tubulares de cuatro pies de longitud. Con el nuevo sistema, el mismo hombre producía, en el mismo tiempo, 200 tubos de ocho pies de longitud.

- 1845. Albert Poensgen (1818-1880) creó una fábrica en Gemünd (Alemania) cuya producción de tubos era importante para la época, y así evitó la dependencia alemana de los tubos de fabricación inglesa. En la fabricación, utilizó el método *à la cloche*, ya comentado. Posteriormente, en 1860, trasladó la fábrica a Düsseldorf.
- 1854. Henry Bessemer (1813-1898) puso a punto el primer proceso de elaboración industrial de acero, material de base para la construcción de perfiles estructurales.
- 1871. August Thyssen (1842-1926) fundó una fábrica en Mulheim an der Ruhr para fabricar tubos soldados de forma masiva.
- 1885. John Kemp Starley (1854-1901) ideó la “bicicleta de seguridad”, cuyo diseño basado en tubos de hierro soldados, principio de funcionamiento mediante pedales y transmisión por cadena son muy similares a los de la bicicleta actual. A través de las bicicletas, se popularizaron los tubos de hierro, de diámetros aun modestos, para usos estructurales de elementos ligeros.
- 1886. Los hermanos Max (1857-1915) y Reinhardt Mannesmann (1856-1922) pusieron a punto el “mandril oblicuo.” Dicho instrumento permitió fabricar tubos sin soldadura y en cantidades hasta entonces desconocidas. Poco después perfeccionaron el laminador “a paso de peregrino,” que perfeccionaba el desbaste que realizaba el mandril oblicuo. Cari Stiefel, ingeniero suizo, desarrolló el proceso de laminación automática del desbaste que hoy en día sigue llevando su nombre.

Max y Reinhardt Mannesmann lograron desarrollar métodos para producir perfiles circulares con y sin soldadura. Consiguieron paredes de menor grosor y con mayor longitud de las piezas mediante el proceso de punzonado con rodillo oblicuo, método que se combinó con el sistema Pilger. En este último, el proceso de laminación se realiza en frío mediante un mandril cónico.

- 1890. Se construye el puente Firth of Forth en Escocia. Si bien su estructura es tubular, esta se consigue mediante la unión de chapas remachadas. Véase, en el apartado 3.4 “La construcción de grandes luces con hierro y con acero”, el artículo 3.47 denominado “Una solución de corto recorrido. Dos ménsulas soportando el tramo central. El puente Forth Railway de Escocia”
- 1892. August Otto Föppl (1854-1924) publica el libro *Das Fachwerk im Raum*, pionero de las estructuras espaciales. En el mismo, Föppl desa-



rolla la ley de estabilidad de las estructuras espaciales de acuerdo con la expresión:

$$b = 3 \cdot n - 6$$

donde:

b = número de barras

n = número de nudos

En el caso de un triángulo, de acuerdo con la fórmula anterior, se tienen tres nudos y tres barras, y es la forma estable más simple que se puede construir en el plano. En el espacio, la figura estable más simple es el tetraedro, formado por cuatro nudos y seis barras; por ello, se tiene:

$$6 = 3 \cdot 4 - 6$$

Entre los poliedros regulares –tetraedro, hexaedro o cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro–, mediante la ecuación de Föppl se demuestra que tan solo el tetraedro, el octaedro (6 nudos y 12 barras) y el icosaedro (12 nudos y 30 barras) son estructuras completamente estables.

El cubo, con 8 nudos y 12 barras, no la cumple, puesto que:

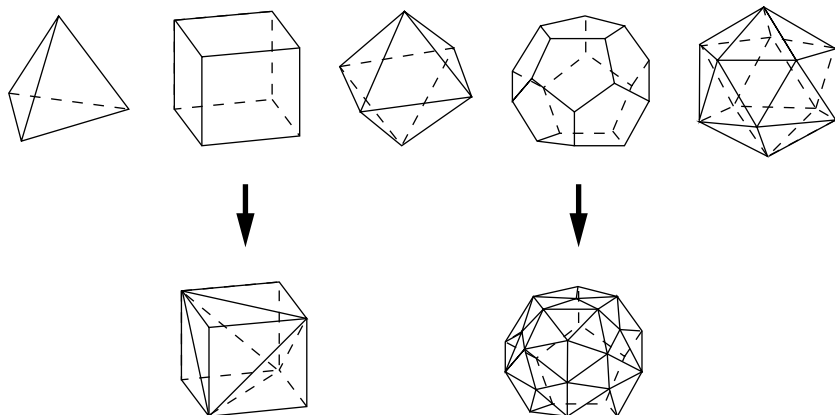
$$12 < 3 \cdot 8 - 6 = 18$$

Lo mismo sucede con el dodecaedro, con 22 nudos y 31 barras:

$$31 < 3 \cdot 22 - 6 = 60$$

Tanto el cubo como el octaedro solo pueden ser estabilizados mediante la división de sus caras en triángulos, como se muestra en la imagen siguiente.

Los estudios de Föppl permitieron el desarrollo posterior de las mallas espaciales y de las cúpulas geodésicas.





- 1922. Walter Bauersfeld (1879-1959) construyó, sobre la azotea de la fábrica, una cúpula geodésica basada en el icosaedro de frecuencia 16, para realizar pruebas para la construcción de un planetario para la empresa Carl Zeiss. Disponía de un total 3.480 nervios y una luz de 16 metros. En la imagen de la izquierda se observa la estructura montada y, en la de la derecha, con el revestimiento de hormigón.

El concepto de frecuencia corresponde al número de veces que las aristas del dodecaedro o del icosaedro de base son divididas para dar lugar a triángulos cuyos vértices han de coincidir todos con una superficie esférica o con un elipsoide.



- 1923. La escuela Bauhaus, dirigida por Walter Gropius (1883-1969) cambia su programa y su lema pasa a ser: "Arte y tecnología, una nueva unidad". Marcel Breuer (1902-1981) era un estudiante de la Bauhaus en la Alemania de 1925 cuando diseñó la primera silla de tubo de acero de la historia. La llamó Wassily (v. foto inferior izquierda), en homenaje a su amigo Kandinsky (1866-1944). Realizó el primer prototipo utilizando tubos de bicicleta. Ello muestra que la posibilidad de emplear tales elementos en estructuras de edificación quedaba lejos de la tecnología de la época. En la fotografía de la derecha se observa un escritorio de la época, diseñado bajo el mismo concepto.





- 1930. Fretz Moon, a partir del método Whitehouse, planteó un sistema continuo de fabricación de tubos y, a tal efecto, construyó una máquina. En lugar de requerir el calentamiento total de la pletina que debía convertirse en tubo para garantizar su soldadura, el calor se aplicaba exclusivamente a la zona de contacto de ambos bordes de la pletina. Los tubos formados así presentaban el inconveniente de la soldadura longitudinal, lo que rebajaba su calidad y reducía sus ámbitos de aplicación.

Posteriormente, se mejoró el proceso de fabricación mediante la soldadura por inducción electromagnética en el tubo. La velocidad y la precisión de la soldadura por inducción la hacen ideal para la soldadura de bordes de tubos y tuberías. En este procedimiento de fabricación, los tubos, previamente conformados a partir de una pletina, pasan a gran velocidad por el interior de una bobina de inducción. Sus bordes se calientan, al tiempo que se presionan para formar un cordón de soldadura longitudinal. La soldadura por inducción es particularmente adecuada para grandes producciones.

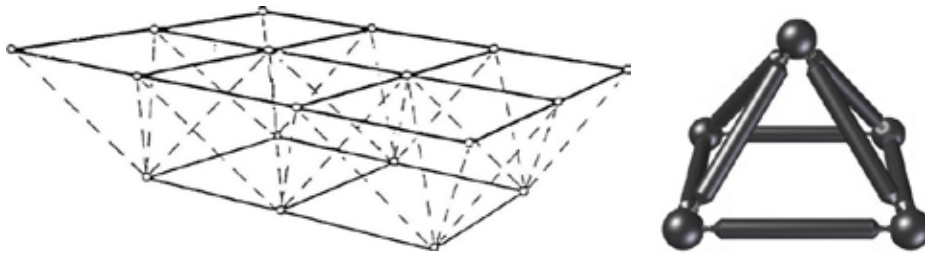
- Primera mitad del siglo xx. La empresa Whitehouse en Inglaterra presenta la soldadura por fusión mediante un arco de perfiles tubulares circulares. La soldadura por arco presenta la ventaja de concentrar mucho más la temperatura en la zona de contacto que la soldadura autógena, con lo cual se evitan deformaciones en las piezas a soldar.
- 1937. Para solventar las uniones espaciales entre tubos no soldados, se idearon unos nudos prefabricados roscados, que facilitaban las operaciones de montaje y desmontaje. El primero modelo (v. foto izquierda en la página siguiente) corresponde al conocido sistema MERO, inventado por el arquitecto Max Mengerlinghausen (1903-1988), formado por 18 perforaciones roscadas, lo que permite efectuar mallas multicapa y realizar tetraedros, hexaedros y octaedros.
- Para llegar al diseño del nudo MERO, Mengerlinghausen desarrolló las teorías de Föppl y concluyó lo siguiente:
 - Las estructuras espaciales son perfectas cuando están formadas por triángulos combinados de manera que, puestos juntos, formen octaedros, tetraedros o cubos trucados, es decir, figuras que cumplan la ecuación de Föppl.
 - Las longitudes de las caras del octaedro, exteriores al cubo, del tetraedro, interno al cubo, del cubo y del cubo truncado forman series geométricas de crecimiento natural del factor raíz de 2.
 - Con la longitud de barra de esta serie y con el uso de un tipo universal de nudo, se pueden formar infinitas derivaciones, además de las formas geométricas descritas.



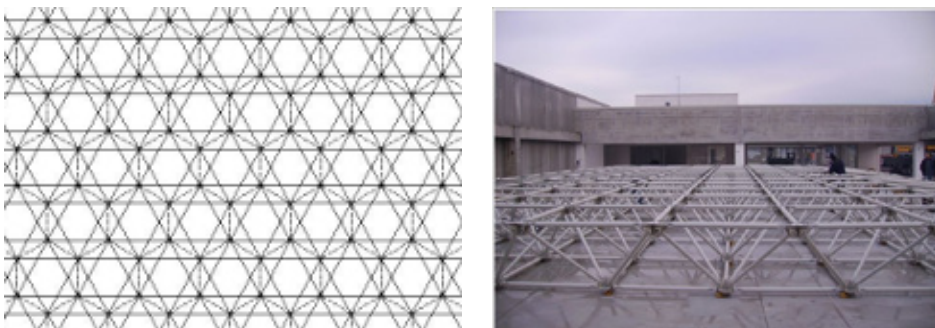
Si se trata de construir mallas de dos capas, superior e inferior, pueden utilizarse nudos más simples, como el de casco (v. fotografía inferior central), o una cruz de pletinas, como elemento de confluencia de las barras (v. foto inferior derecha).



El gráfico y la figura siguientes muestran, respectivamente, una malla realizada con semioctaedros y el detalle de un semioctaedro. Obsérvese que, al disponer de ocho barras y cinco nudos, el semioctaedro no cumple la ecuación de Föppl; sin embargo, es una solución espacial estructural muy común gracias a su rigidez y simplicidad, al estar formada por una matriz de vigas en celosía. En cada nudo tipo, convergen un total de ocho barras.

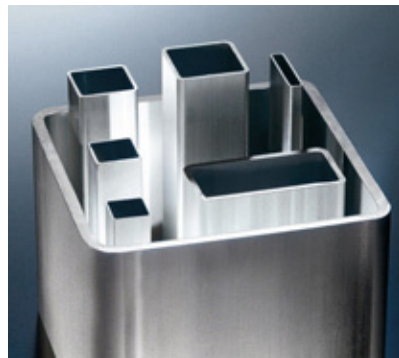
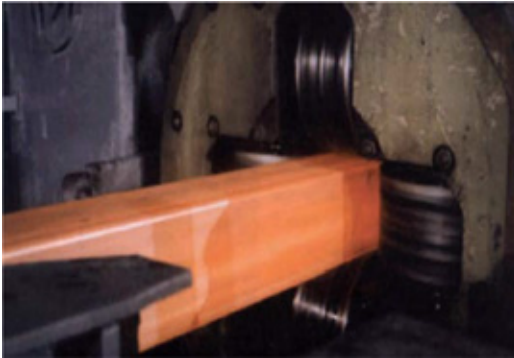


El gráfico inferior responde a una malla de tetraedros. Si bien cumple la ecuación de Föppl, puede apreciarse la mayor complejidad de su construcción, puesto que en cada nudo convergen doce barras. Por ello y por su gran rigidez, estas mallas suelen realizarse suprimiendo barras y formando pirámides de base hexagonal. La fotografía de la derecha muestra una malla de semioctaedros de acero galvanizado.





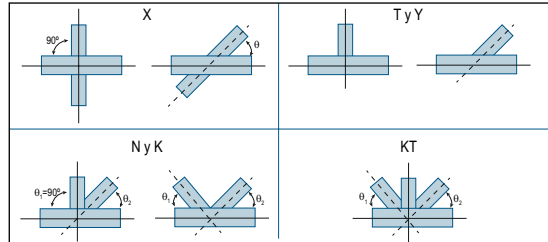
- A partir de la Segunda Guerra Mundial, se perfeccionan los sistemas de soldadura que permiten unir los tubos con facilidad y seguridad.
- 1952. Stewarts & Lloyds desarrolla el sistema para elaborar perfiles estructurales tubulares rectangulares. Presentan la ventaja que sus uniones se realizan mediante cortes planos. La fotografía inferior izquierda muestra una fase de laminación en caliente de un tubo estructural rectangular. A la derecha, distintos formatos de tubos estructurales cuadrados y rectangulares de acero inoxidable.



- La empresa alemana Müller, fundada en 1918, desarrolló en 1954 la primera máquina de tres ejes para preparar, de forma automatizada y precisa, los extremos de los tubos para soldarlos entre sí cuando tienen diámetros diferentes. Téngase en cuenta que el encuentro entre dos cilindros produce, salvo casos excepcionales, una curva de cuarto grado o cuártica. En los casos excepcionales, tubos de igual diámetro cuyos ejes intersecan producen dos elipses o, lo que es lo mismo, dos curvas de segundo grado.
- 1954. Richard Buckminster Fuller (1895-1983) patenta, bajo el nombre de cúpula geodésica, el concepto de construcción de una superficie esférica o elipsoide, basada en la descomposición del dodecaedro o del icosaedro, mediante la unión de elementos tubulares agrupados en nudos.
- Durante los años sesenta, se llevaron a cabo numerosos estudios experimentales hasta la rotura de distintos tipos de uniones soldadas con objeto de establecer los algoritmos de cálculo necesarios para garantizar su funcionamiento correcto.

La fotografía siguiente izquierda muestra una máquina de ensayo, mientras que la de la derecha detalla algunos de los nudos más habituales de las construcciones tubulares.

Las máquinas de ensayo son una reminiscencia de los procedimientos de ensayo y error propios de la construcción empírica. En la construcción tecnológica, este papel es asumido por los ensayos de laboratorio.



- 1967. Construcción, por Buckminster Fuller, de una cúpula geodésica de 76 m de diámetro y 62 m de altura, basada en la frecuencia 16 del icosaedro, en la Expo de Montreal. Entre las barras, se fijaron láminas de material acrílico transparente, y se tomaron precauciones especiales para controlar adecuadamente el ambiente interior (v. fotografía inferior izquierda).



- 1968. Se funda en Würzburg, Alemania, un Centro para la Investigación de Estructuras, bajo la dirección de Max Mengerhausen. Se ocupa del desarrollo teórico y práctico de las estructuras espaciales.
- 1970-1977. El Centro Georges Pompidou, proyectado por los arquitectos Renzo Piano (1937) y Richard Rogers (1933) (v. fotografía superior derecha), es una muestra de madurez en la aplicación de los tubos, no solo como aspecto estructural, sino también como elemento decorativo que integra las instalaciones en la fachada.

6.4. Las construcciones tubulares en la actualidad

A partir de los años setenta, la construcción de estructuras tubulares experimenta un nuevo empuje, que se ha mantenido hasta la actualidad, a través de las construcciones *high-tech* basadas en los aspectos siguientes:

- Disposición de una amplia gama de perfiles estructurales, circulares, cuadrados, rectangulares, elípticos, con capacidades mecánicas muy elevadas.

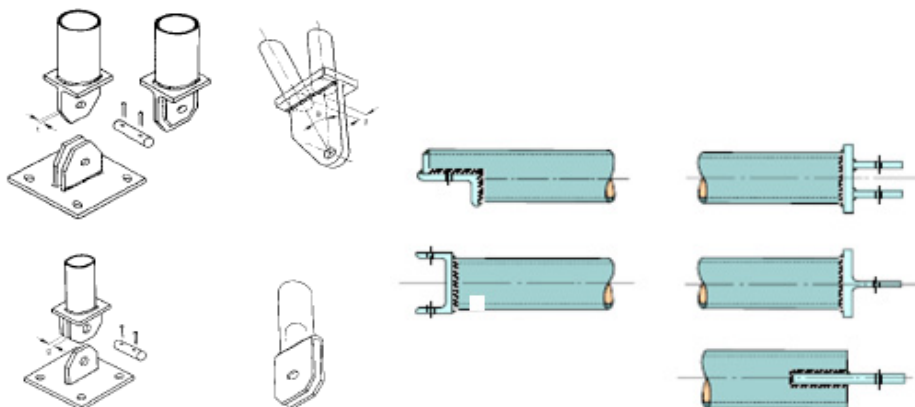


- Sistemas eficientes de soldadura y de preparación de los bordes.
- Amplia variedad de nudos y terminales para enlazar, de manera fiable y fácilmente desmontable, estructuras espaciales complejas, realizadas con barras.
- Desarrollo de algoritmos específicos de cálculo extraídos de pruebas de laboratorio, y aplicación de los mismos a través de programas informáticos.
- Medios auxiliares sofisticados:
 - Que permiten una construcción muy precisa de los elementos en el taller, con un control total de la calidad de los materiales y de las soldaduras.
 - Con sistemas láser que facilitan el replanteo.
 - Con mecanismos de elevación eficientes y de gran capacidad.

Se concluye que las estructuras tubulares, gracias a la amplia variedad de diámetros y espesores de sus perfiles, son susceptibles de adaptarse a todo tipo de necesidades, desde estructuras primarias de gran luz hasta subestructuras de pequeño formato, orientadas a resolver detalles como marquesinas, acristalamientos o pantallas generadoras de sombra.

Parte de las estructuras tubulares se construyen mediante uniones resueltas mediante terminales unidos con bulones o con tornillos. De este modo, pueden desmontarse, trasladarse y volverse a montar fácilmente. Los dibujos inferiores muestran algunas de las soluciones constructivas más comunes para formar terminales de tubos estructurales.

Las características geométricas y mecánicas de los tubos ofrecen interesantes prestaciones ante esfuerzos de torsión y una gran adaptabilidad para resolver estructuras espaciales.





Como ejemplos de lo expuesto, nos referiremos a las estructuras tubulares que conforman:

- La cubierta del estadio de fútbol Cornellà–El Prat
- La cubierta del velódromo de Berlín

6.4.1. Cubierta del estadio de fútbol Cornellà–El Prat

Dicha instalación deportiva fue inaugurada en 2009. Su cubierta está soportada por cuatro vigas cruzadas construidas mediante celosía tubular (v. fotografía inferior izquierda). Dichas vigas se apoyan en ocho pilares de hormigón armado, de 2 m de diámetro. Las dos mayores tienen una longitud de 200 m y un canto de 9 m. Los cuatro tubos principales que conforman su sección miden 600 mm de diámetro.

La fotografía inferior derecha permite apreciar el encuentro entre las vigas tubulares. La gran rigidez y la capacidad portante del modelo estructural adoptado facilitan el desplazamiento de los pilares de apoyo al exterior del estadio, de modo que la visión directa del terreno de juego no queda entorpecida por ningún obstáculo.

La fotografía superior izquierda muestra la utilización del interior de las vigas tubulares como paso de servicio.

La fotografía inferior derecha permite apreciar, en detalle, la complejidad y la precisión con que está resuelto uno de los nudos de la zona de encuentro entre dos de las vigas principales. Obsérvese, en este punto, la presencia de placas de rigidez en las zonas próximas al encuentro de los perfiles.





6.4.2. Cubierta del velódromo de Berlín

La singularidad de la cubierta del velódromo de Berlín, concebida por el arquitecto Dominique Perrault (1953), es un ejemplo de las posibilidades de construcción de las estructuras tubulares. El proyecto y la construcción (1992-1999) de esta obra incluía, además, una piscina olímpica con capacidad para 4.000 espectadores.

La cubierta del velódromo se asemeja a un disco de 140 m de luz (v. fotos inferiores), de modo que los soportes de la estructura, colocados en el perímetro exterior del recinto, no entorpecen la visión de los 5.800 espectadores que disponen de localidad alrededor de la pista.

El interior de la estructura, planteada mediante dieciséis radios formados por vigas de celosía que convergen en un cilindro central (v. foto inferior derecha), es utilizado para albergar, en la zona periférica, dependencias y servicios de la instalación.

En la actualidad, las estructuras tubulares, por su ligereza y elegancia, forman parte de nuestra vida cotidiana como soluciones constructivas de vanguardia. En las dos fotografías siguientes, correspondientes a dos edificios londinenses, se observa una estructura tubular utilizada como soporte de pantallas acristaladas. Estas están concebidas para ahorrar energía, tanto en calefacción como en aire acondicionado.





Las dos fotografías inferiores muestran, en detalle, la sujeción de los cristales mediante sistemas de botones como últimos ejemplos de la utilización de estructuras tubulares en funciones auxiliares.



6.5. Construcción mediante cables de acero

6.5.1. Introducción

Las cuerdas elaboradas con fibras vegetales trenzadas han sido empleadas en la construcción desde la antigüedad más remota, para transportar y elevar materiales y como parte indisoluble de las actividades navales. También formaban parte de los *velaria*, cuya finalidad era proporcionar sombra a los espectadores en los teatros y anfiteatros en época romana.

Con la mejora de las técnicas metalúrgicas, en el primer tercio del siglo XIX se llevaron a cabo los primeros experimentos para crear "cuerdas" de hierro, cuyo desarrollo natural dio lugar a los cables. Estos son capaces de multiplicar por cincuenta, a igualdad de sección, la capacidad resistente de las mejores cuerdas confeccionadas con fibras vegetales. Ello abrió un amplio abanico de posibilidades, tanto para las máquinas de elevación y transporte como para la confección de estructuras de edificación.

Si bien es posible fabricar cables con distintos metales para diversos cometidos, en términos de resistencia mecánica el acero es el material que, en relación con su precio, ofrece las mejores prestaciones. En este apartado, no se consideran otros usos de los cables que no sean los estrictamente estructurales.

El elemento básico de un cable son los alambres, hilos delgados cuyos diámetros pueden oscilar entre décimas de milímetro y los cinco milímetros. Cuanto más delgados son los alambres, más flexible es el cable, aunque también es más fácil que se deteriore por rozamiento o por corrosión; es preciso, por tanto,



elegir el tipo de cable óptimo en función del uso que se pretenda. Para ello, el mercado ofrece una amplia variedad.

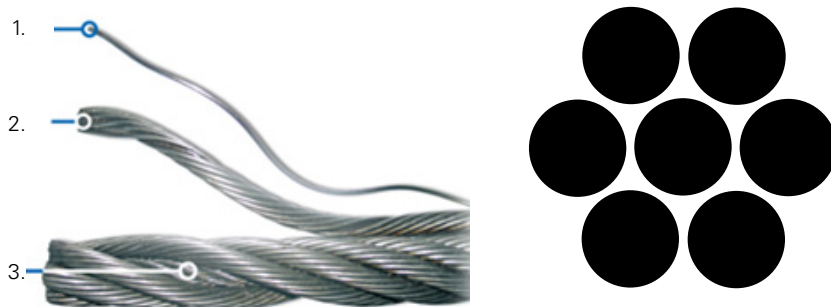
Los alambres se obtienen a través de la ductilidad, propiedad que tienen algunos materiales, como los metales, y que expresa su capacidad de deformarse de forma sostenible, dentro de ciertos límites, sin llegar a romperse.

Un cable de acero está constituido por una agrupación ordenada de alambres, enrollados de forma helicoidal. Con ello, se pretende obtener un nuevo producto que incorpore las propiedades siguientes:

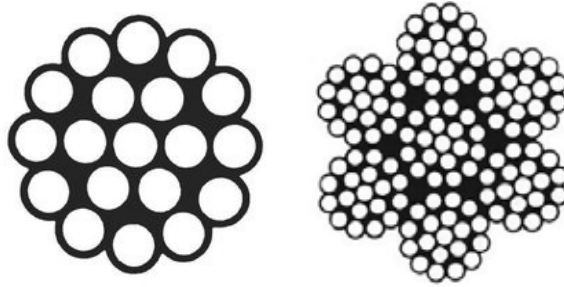
- Formación de un cuerpo único capaz de dar respuesta a los esfuerzos de tracción.
- Flexibilidad suficiente para su arrollamiento, lo cual facilita el transporte y la puesta en obra de grandes longitudes, sin necesidad de efectuar empalmes.

A tal fin, se establecen distintas jerarquías de agrupación según el alambre. Así, un torón es un conjunto de seis alambres enrollados en torno a uno central; a su vez, seis o más torones pueden ser arrollados alrededor de un alma hasta conseguir secciones muy elevadas. La fotografía inferior izquierda muestra los elementos básicos de un cable de acero:

1. Alambre básico
2. Torón. Conjunto formado habitualmente por siete alambres: uno en posición central y seis arrollados a su alrededor (v. fotografía inferior derecha)
3. Cable completo, formado por agrupación de torones

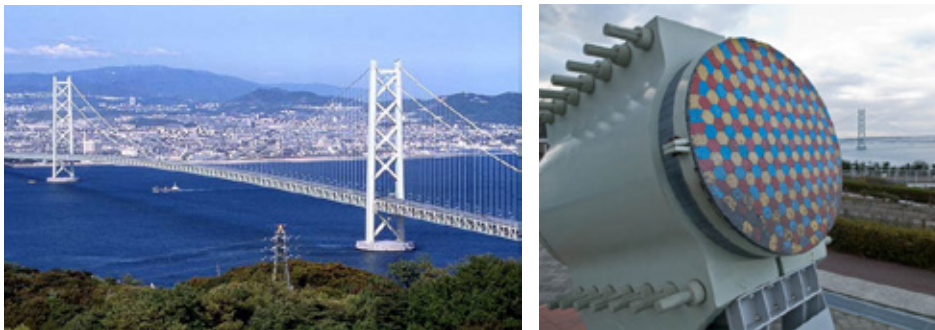


El gráfico siguiente izquierdo muestra la sección de un cable estándar de 1×19 . El gráfico de la derecha detalla un cable formado por un torón compuesto por siete agrupaciones de 19 alambres cada una. Ambos constituyen tan solo una pequeña parte de las secciones que pueden adoptar los cables estructurales en función de su uso y su capacidad resistente.



Un caso extremo de estas agrupaciones son los cables principales de apoyo del puente Akashi, de 1.991 metros de luz, el de mayor luz entre apoyos hasta el momento (v. fotos inferiores). Su diámetro es de 1.122 mm. En su interior, se encuentran 36.830 alambres de acero, de 5,23 mm de diámetro. Dicho puente, cuyas torres alcanzan una altura de 298 metros sobre el nivel del mar, está calculado para soportar vientos de hasta 286 km/h y sismos de hasta 8,5 grados en la escala de Richter. Dispone de sistemas pendulares de amortiguación para evitar entrar en resonancia.

Ello da idea de hasta qué punto la técnica es capaz de ofrecer soluciones fiables y eficientes a problemas estructurales que, de otro modo, resultarían irresolubles.



6.5.2. Particularidades de la construcción mediante cables estructurales

La construcción mediante cables estructurales, en función de las características mecánicas del material de base, presenta una serie de particularidades. Entre los aspectos positivos, cabe señalar:

- Gran capacidad de trabajo a tracción debido a la elevada resistencia de los aceros con que están confeccionados los cables. Se utilizan aceros con límites elásticos del orden de 2.000 N/mm².
- Máximo aprovechamiento de la capacidad resistente del material al no producirse pandeos, puesto que el material está traccionado.



- Facilidad para alcanzar grandes luces debido tanto a la forma de trabajo como a la elevada resistencia unitaria de los cables.
- Posibilidad de combinar las estructuras de cables con otras soluciones constructivas, como muros, mástiles, arcos o pórticos.

Sus inconvenientes más destacados son los siguientes:

- Las estructuras de cables se plantean como isostáticas. Ello supone que el fallo en uno de los cables principales puede provocar la ruina completa de toda la estructura. Para cubrir eventualidades, caben dos caminos: sobredimensionar los cables principales o añadir un mayor número de cables a los estrictamente necesarios para minimizar el efecto de la eventual rotura de uno de ellos.
- Falta de rigidez a causa de la flexibilidad propia de los cables. La flexibilidad es una propiedad buscada durante el proceso de fabricación, puesto que facilita el transporte y la manipulación. Sin embargo, una vez el cable está colocado en obra, se traduce en una gran sensibilidad tanto a los esfuerzos horizontales como a las cargas dinámicas. Para corregir la falta de rigidez, se recurre habitualmente a unos cables auxiliares con función estabilizadora, denominados *vientos*.
- Necesidad de mantenimiento. Los alambres de acero son más susceptibles de sufrir daños por oxidación que una barra del mismo material, de sección equivalente, debido a la mayor superficie de contacto con la atmósfera. Para su conservación, se recurre al galvanizado en caliente de los cables o al engrasado periódico, cuando han de soportar poleas. En la actualidad, se dispone de cables de acero inoxidable. Si bien su coste es más elevado, prácticamente no necesitan mantenimiento.

6.5.3. Algunos hitos en la historia de los cables estructurales

Los primeros cables se emplearon en la minería en Alemania, en 1834, gracias a la iniciativa del ingeniero Wilhelm Albert (1787-1846). Estaban trenzados a mano partiendo de tres alambres de hierro forjado. Debido a su poca flexibilidad y a la complejidad de su elaboración, fueron abandonados hacia 1850.

Entre 1846 y 1888, se desarrollaron la mayoría de las formas básicas de cable de acero que actualmente continúan en uso. En el establecimiento de los procesos iniciales para su fabricación de forma mecánica, intervinieron los ingenieros Andrew Smith (1798-?), que obtuvo la primera patente para fabricar cables de alambres metálicos, y Robert Stirling Newall (1812-1889), que mecanizó el proceso de trenzado de los cables de acero. Después de algunos conflictos, ambos fusionaron sus esfuerzos y crearon la compañía Smith & Newall, pionera en la fabricación de cables de acero.

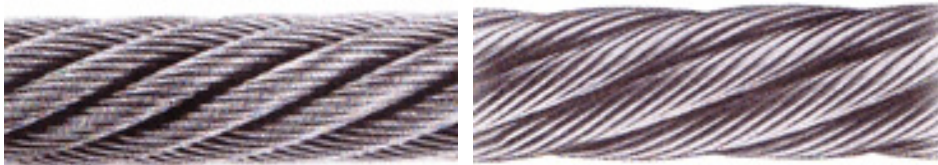


James Horsfall patentó en 1854 el primer proceso térmico “en línea” de los alambres de acero, conocido como *austenización*, que permite mejorar la respuesta mecánica del acero buscando, para cada caso concreto de utilización, el equilibrio entre la dureza y la tenacidad. El mismo Horsfall produjo, en 1867, alambres de acero para cuerdas de piano con una resistencia a tracción de 2.360 N/mm², similar a la de los mejores alambres de acero empleados en la actualidad en la confección de cables.

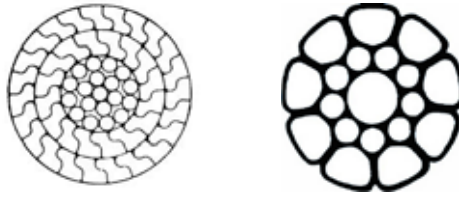
John Lang, gerente de planta en la fábrica de Smith & Newall, patentó en 1879 un cable en que los alambres que constituyen los torones de base y los torones compuestos que conforman el cable están torcidos en el mismo sentido. Esta forma de arrollamiento para confeccionar cables es conocida desde entonces como “torcido Lang”.

En la actualidad, los cables de acero se fabrican tanto en torcido regular como en torcido Lang, en función de los usos a que vayan a ser destinados. En el torcido regular (v. foto inferior izquierda), los alambres de cada torón de base llevan un sentido de giro opuesto al de los torones compuestos. En el torcido Lang (v. foto inferior derecha), los alambres y los torones presentan el mismo sentido de giro. En ambos casos, el torcido de los alambres puede ser hacia la derecha (en sentido horario, que es el más empleado normalmente) o hacia la izquierda.

En general, los cables de torcido regular son más fáciles de manejar pero menos flexibles que los Lang. Estos últimos se muestran más resistentes a la abrasión y a la fatiga. Por el contrario, presentan el inconveniente de que tienden a destorcerse, por lo que su uso idóneo se centra en aquellos casos en que sus extremos están fijos.



En 1884, el fabricante de cables Arthur Latch y el ingeniero y matemático Telford C. Batchelor patentaron los torones espirales con alambres de perfiles especiales, denominados *locked coil ropes* (“cables sellados”), cuya geometría los hace especialmente resistentes al desgaste, puesto que la superficie de contacto, a diferencia de los alambres circulares y los torones, es prácticamente plana (v. fotografía inferior izquierda). La compañía Latch & Batchelor, fundada en 1884, patentó en 1888 cables con torones triangulares y ovalados, conocidos con el nombre comercial de Dyaform (v. foto inferior derecha). Gracias a su geometría, se consigue indeformabilidad, cualidad muy apreciada en la construcción de vigas de cables.



Sin aportar nuevos conceptos, a lo largo de los años se han producido algunas mejoras en el proceso de fabricación de alambres y cables, entre ellas la aplicación, a partir de 1926, de componentes de vidia (carburo de tungsteno), que permiten un perfecto trefilado de alambres con un alto contenido de carbono.

El trefilado consiste en el estirado del alambre en frío, por pasos sucesivos, a través de hileras, dados o trefilas de vidia, de forma troncocónica. Ello es posible merced a la ductilidad del acero. Al disminuir la sección a causa del estiramiento y la compresión contra las paredes, el material mejora sus características mecánicas pero se vuelve más agrio, eso es, resulta menos flexible.

Basándose en los mismos principios, en 1953 la empresa British Ropes Ltd. patentó el proceso de trefilado de torones con la configuración de alambres paralelos que ha sido aceptado mundialmente. Con ello, se consiguen cables muy compactos, lo que mejora su resistencia y durabilidad.

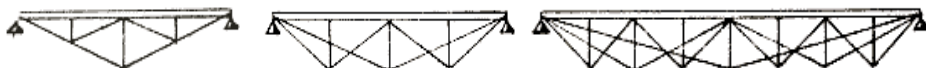
6.5.4. Primeros usos estructurales de los cables, con independencia de los puentes colgantes. Vigas Fink y Bollman, cerchas Pratt y vigas lenticulares

La utilización de cables en puentes colgantes se trata en el capítulo correspondiente a las grandes luces. En el presente, se estudia la incorporación de cables a piezas flectadas.

El conocimiento del comportamiento mecánico de las vigas, desarrollado de acuerdo con los principios de Navier-Bernoulli, permitió elaborar las primeras vigas en que cables o simples tirantes de sección maciza absorben las tracciones generadas por los esfuerzos de flexión a través de barras verticales comprimidas.

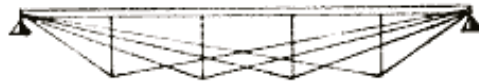
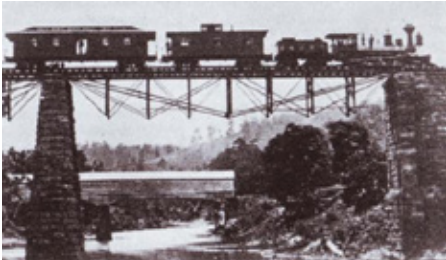
El gráfico inferior izquierdo muestra una viga planteada como una cercha de cubierta invertida, desarrollada por Albert Fink (1827-1897) en 1850. El gráfico central muestra una viga Fink doble y el de la derecha, una viga Fink múltiple.

Estas vigas eran suficientemente sólidas para elaborar con ellas puentes de ferrocarril con una gran economía de medios, si bien su aspecto extraordinariamente ligero tiende a plantear dudas con respecto a su capacidad real, en comparación con los modelos habituales (v. foto izquierda en la página siguiente).





El gráfico inferior derecho muestra una variante de la viga Fink conocida con el nombre de Bollman. Su diseño, un tanto complejo, está planteado para la utilización de cables en los tirantes.



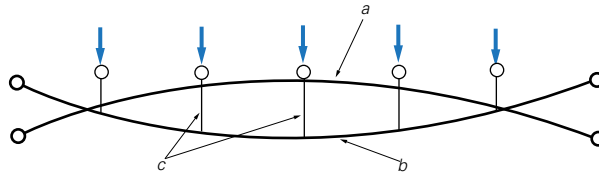
El gráfico inferior izquierdo muestra una cercha de tipo Pratt, con un tirante inferior continuo. La fotografía inferior derecha muestra el montaje de dos cerchas lenticulares de 138 m de luz cada una. Corresponden al Royal Albert Bridge, o puente de Saltash, construido en 1859 por el ingeniero Isambard Kingdom Brunel (1806-1859).

Cada uno de los arcos superiores, contruidos con hierro forjado, tiene una sección elíptica de 5 m de anchura. Pueden apreciarse los montantes que unen los arcos con el tirante inferior, así como el sistema de cables estabilizadores formando cruces de San Andrés. En una estructura lenticular, los empujes del arco se equilibran por las tensiones del tirante, por lo que no se producen esfuerzos horizontales en los apoyos.



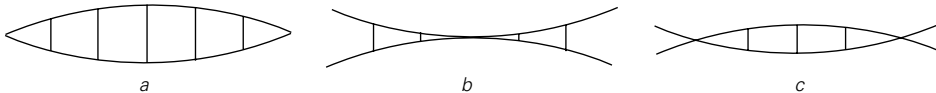
6.5.5. Conceptos básicos para el diseño de vigas de cable

Estas vigas están formadas, normalmente, por dos cables pretensados, unidos mediante unos elementos de conexión (bielas) que los mantienen en la forma deseada. Los cables suelen tenderse en forma parabólica para conseguir un mejor comportamiento estructural, tal como se muestra en el gráfico siguiente.



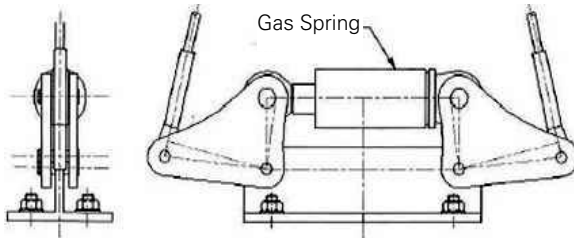
Sobre esta base, se obtienen tres tipologías básicas de vigas de cable, según se detalla en el gráfico siguiente:

- a) Convexa
- b) Cóncava
- c) Cruzada



La geometría de una viga de cable normalmente está condicionada por la situación de los puntos de apoyo de las fijaciones disponibles en el cerramiento a soportar.

Las vigas de cable de gran longitud pueden ver afectado su grado de tensión por los cambios térmicos. Por ello, en su diseño es preciso incorporar, en determinados casos, mecanismos de muelle o de gas comprimido para mantener su estabilidad dimensional de forma precisa (v. fotografía y gráfico siguientes).



En consonancia con los condicionantes expuestos, se fija una geometría parabólica adaptada. Habitualmente, se inicia con una proporción de canto de viga del 10 % de la luz. El canto se puede reducir hasta el 7 o el 9 % de la luz. Cantos más grandes permiten diámetros de cable más reducidos. Los cantos pequeños requieren cables de mayor diámetro, en función de los ángulos de los paralelogramos de fuerza generados.

Para vigas de gran luz, el canto recomendable se puede reducir entre el 4 y el 6 % de la luz. Normalmente, la curvatura, el diámetro y la pretensión de los ca-



bles de suspensión y pretensión suelen ser los mismos, para conseguir que la viga sin carga no tenga flecha.

La rigidez de una viga de cable aumenta cuando aumentan la curvatura de los cables y su sección, y decrece cuando aumenta la flexibilidad de los soportes. La pretensión de los cables tiene poca influencia sobre la rigidez del conjunto. La rigidez también se incrementa al aumentar la flecha de la viga, aunque este efecto solo es significativo cuando la viga soporta cargas no uniformes o puntuales de importancia.

6.5.6. Un caso singular de cubierta circular resuelta mediante cables. El Cilindro Municipal de Montevideo

El Cilindro Municipal de Montevideo destaca por la simplicidad de su construcción y su eficacia probada. Construido en 1956, con carácter efímero, por el calculista y constructor Leonel Viera (1913-1975) para una exposición, por su tamaño y diafanidad pronto fue utilizado para múltiples usos, especialmente los deportivos. Tenía una capacidad de 11.000 espectadores, con una pista de baloncesto ubicada en el centro de la planta.

Su mayor originalidad se encuentra en la cubierta. Esta adopta la forma del tronco de un cono invertido, muy aplanado. Se materializa mediante una sola capa de cables, dispuestos de forma radial. No responde, por tanto, al concepto estructural de una rueda de bicicleta, pues carece de buje y de una segunda capa de radios.

Se mantuvo en servicio hasta que un incendio en 2010 acabó con su singular cubierta y puso fin a 54 años de existencia durante los cuales había tenido un mantenimiento prácticamente nulo. A la vista de lo precario de la construcción, planteada para un uso efímero, y de sus resultados, resulta buena la frase de "nada dura tanto como lo provisional".

Sus datos técnicos son realmente interesantes, pues cubría una planta circular de 95 m de diámetro a 18 m de altura.

En concreto, presentaba las características siguientes:

- Circunferencia: 267 m
- Área: 5.675 m²
- Volumen estimado: 102.141 m³

La cubierta estaba formada por 256 radios de cable galvanizado, de 25 mm de diámetro, por lo que fue preciso emplear unos 13.000 m de cable. Los espacios trapezoidales resultantes entre cables estaban cubiertos con placas de 1 m de longitud, dispuestas en forma de anillos concéntricos. Para ello, tuvieron que fijarse a los cables un total de 12.282 placas.



La fotografía inferior izquierda muestra el aspecto del edificio recién concluido. En la de la derecha, tras el devastador incendio de 2010, se pueden apreciar las dimensiones del aro de compresión.



6.5.7. Las vigas de cable en la actualidad

Las vigas de cable constituyen, en la actualidad, una alternativa eficiente para resolver, de forma elegante y ligera, subestructuras destinadas a soportar una fachada o una cubierta en zonas diáfanas de los edificios, especialmente si estas son acristaladas. Las estructuras de cables también pueden resolver grandes luces, como las cubiertas de los estadios o pabellones deportivos. Sirvan, como ejemplo, el estadio Slaski en Polonia (v. fotografía inferior izquierda) y el Estadio Ciudad de la Plata en Argentina (v. fotografía derecha).



Estas construcciones son posibles gracias no solo a la gran calidad y cantidad de cables disponibles en el mercado, sino también a la presencia de todo tipo de terminales y herrajes, destinados a facilitar su colocación y buen servicio. Sirvan, como ejemplo de ello, los modelos de terminales, guardacabos y tensores de la fotografía siguiente.

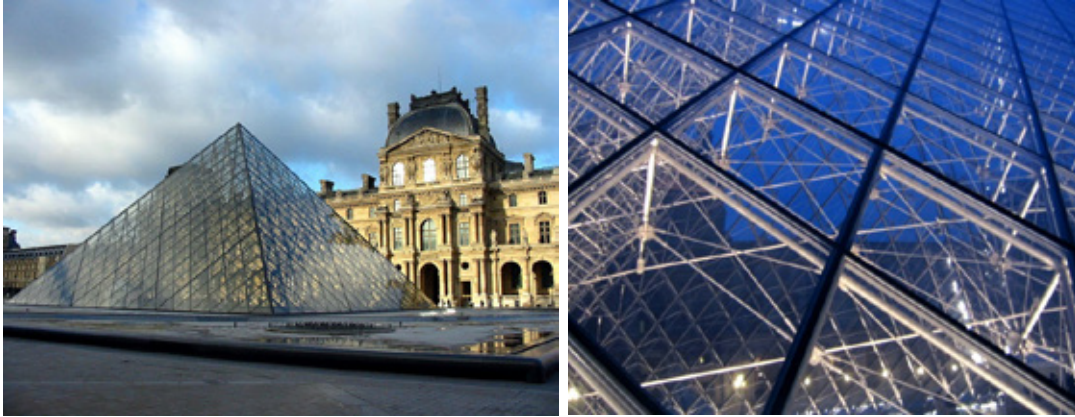


Por lo que respecta a estructuras de menor escala, resueltas con vigas de cables, la fotografía inferior izquierda muestra una cubierta acristalada sujeta mediante un sistema de abotonado, cuyo soporte son las bielas de las vigas de cable que la soportan. La fotografía central, tomada durante el montaje de la cubierta textil denominada “Nuage de la Grande Arche de la Défense”, instalada en 1989, permite apreciar las vigas de cable que la conforman. La fotografía de la izquierda muestra las vigas de cable una vez montada la estructura. Estas son apenas perceptibles en una visión más lejana de la cubierta.



La fotografía inferior izquierda corresponde al edificio de la Cité des Sciences et de l'Industrie, situado en el Parc de la Villette en París, inaugurado en 1986. En la composición de sus fachadas, destacan unos grandes cuerpos acristalados de cuatro plantas de altura. La fotografía de la derecha muestra el detalle de la sujeción abotonada de los cristales, soportados por vigas de cable. La junta entre cristales está sellada con silicona estructural.





La fotografía superior izquierda corresponde a la Pyramide du Louvre (1981-1983), obra del equipo de arquitectos leoh Ming Pei & Partners de Nueva York. Su estructura, de 35 m de base y 21,65 m de altura, está constituida por un entramado de bigas de cables y tubos que soportan 675 rombos de cristal de 3,00 m x 1,80 m, cada uno de los cuales pesa 150 kg, además de los 118 triángulos de la base, como muestra la fotografía inferior derecha. Obsérvese, además, como se rigidizan los 2.100 nudos en ambas direcciones, mediante cruces de San Andrés.

Debido a los condicionantes de la forma y al elevado peso del acristalamiento por metro cuadrado, las ratios de la estructura son los siguientes:

- Superficie cubierta en planta: 1.225 m²
- Superficie acristalada: 1.948,71 m². Ello supone cubrir un 59,07 % de más con respecto a la superficie de la planta
- Peso de la estructura portante: 95.000 kg
- Peso total de la pirámide: 180.000 kg

Con los datos precedentes, se obtiene un valor neto del peso de la estructura portante de 77,55 kg/m². Si se considera el peso unitario de la totalidad de la superficie de las caras de la pirámide, el valor desciende a 48,71 kg/m². Visualmente, el entramado de cables perjudica la lectura del rigor geométrico de la pirámide pretendido en el proyecto, razón por la que cual inicialmente fue muy criticada. En la actualidad, es uno más de los numerosos iconos de París.

6.6.8. La rueda de bicicleta, un modelo estructural interesante poco aplicado en construcción

Las ruedas de bicicleta, por su rigidez y ligereza, constituyen uno de los grandes logros de la ingeniería de finales del siglo XIX. En la fotografía siguiente se pueden apreciar las diferentes partes de una rueda de bicicleta. De exterior a interior, se encuentran:



- **La llanta.** Pieza circular habitualmente construida en acero o aluminio, que se encuentra comprimida a causa de la tensión de los radios.
- **Los radios.** Habitualmente, las ruedas de bicicleta tienen 36 radios, aunque este número puede aumentar o disminuir en función de los usos que se vayan a dar a la rueda.

Los radios están sometidos a cierta tensión para garantizar la estabilidad dimensional de la rueda cuando es sometida a cargas estáticas y dinámicas. A tal efecto, uno de sus extremos está acodado y dispone de un ensanchamiento para garantizar su fijación al buje. El otro extremo está roscado, de modo que puede ajustarse la tensión del radio, mediante una tuerca especial, y así obtener un centrado correcto de la rueda.

- **El buje o carrete.** Es la pieza central de la rueda, a cuyo través discurre el eje de la misma. Los radios se reúnen en el buje, en forma radial o cruzada. Este dispone de dos pequeños platos, separados entre sí unos 10 cm, que actúan como aros de tracción. Cada uno de ellos tiene 18 perforaciones (si se trata de ruedas de 36 radios), en que se insertan los terminales de los distintos radios que configuran la rueda.

Se consigue, de este modo, que la sección diametral de la rueda no sea plana, sino que adopte forma de rombo. Ello, junto con el tensado de los radios, combina geometría y mecánica, y aporta rigidez y resistencia al conjunto, a pesar de su ligereza.

Ello contribuye a la rigidez de la rueda, considerada como una viga sujeta a esfuerzos de gravedad, es decir, con la llanta horizontal o sensiblemente horizontal. En esta situación, la zona con mayor sollicitación, el centro de la rueda, es la que presenta mayor momento de inercia, debido a la separación de masas respecto a la fibra neutra impuesta por el diseño del buje.

En la fotografía inferior derecha se puede apreciar cómo el peso del ciclista es transmitido al buje por las horquillas delantera y posterior. Dicho peso es soportado por la rueda y transmitido al suelo por la tracción ejercida sobre los radios





superiores a través de la llanta. Los radios en contacto con el suelo prácticamente no trabajan, más allá de su contribución al mantenimiento de la geometría de la rueda a través de su tensado. Si los radios estuvieran comprimidos, se doblarían debido a su reducida sección.

6.5.9. Ruedas de bicicleta gigantes

Si bien la capacidad estructural del modelo “rueda de bicicleta” es extraordinaria, la tecnología de la construcción en la época de su invención estaba más centrada en construir en altura que en innovar en la creación de grandes luces.

El “efecto trilito”, es decir, el predominio casi absoluto durante siglos, en el ámbito de la arquitectura, de los esfuerzos de compresión y de flexión, frente a los de tracción, ha seguido pesando en la formación de los profesionales del ramo.

Se ha tendido a calificar de “ingenieriles” aquellas propuestas edificatorias alejadas de los principios de la construcción clásica.

No es de extrañar, pues, que las primeras propuestas de cambio de escala de las ruedas de bicicleta provinieran de ingenieros. Como ejemplos de esta forma de proceder, a continuación se analizan:

- La Noria del Prater de Viena
- El London Eye
- El Singapore Flyer

La Noria del Prater de Viena

La fotografía inferior izquierda corresponde a la *Wiener Riesenrad*, la gran rueda del Prater de Viena, actualmente uno de los iconos de la ciudad. Fue construida entre 1896 y 1897 por el ingeniero inglés Walter B. Bassett (1863-1907). Realizó también las de París y Londres. Ambas fueron destruidas durante la Segunda Guerra Mundial.





Dicha rueda tiene un diámetro de 61 m. Los radios están formados por cables de acero, lo que le confiere una ligereza extraordinaria. Desde el punto de vista mecánico, funciona como una rueda de bicicleta invertida, debido a que se trata de una rueda estática y, por tanto, no puede entrar en contacto con el suelo. La fotografía superior derecha permite apreciar con detalle la estructura del aro exterior de compresión, realizado mediante barras formadas por perfiles abiertos en celosía, cuya rigidez se complementa mediante el empleo de cruces de San Andrés.

El London Eye

La fotografía inferior izquierda corresponde al London Eye, inaugurado en 1999. Fue diseñado por los arquitectos Frank Anatole, David Marks, Julia Barfield, Malcolm Cook, Mark Sparrowhawk, Steve Chilton y Nic Bailey. Dispone de 32 cápsulas climatizadas para los pasajeros. Se desplaza a 0,26 m/s, por lo que tarda treinta minutos en dar una vuelta completa. Ello permite que los pasajeros puedan entrar y salir de sus cápsulas sin que la rueda se detenga.

Se trata de una versión “corregida y aumentada” de la gran rueda del Prater. “Corregida” por el empleo de alta tecnología y de estructuras tubulares en su construcción, y “aumentada” porque alcanza una altura de 135 m, más del doble de su predecesora. Obsérvese que, debido a su reducida sección, los cables que conforman los radios, pasan desapercibidos.

La imagen derecha muestra la viga en celosía, de sección triangular, realizada con perfiles tubulares, que conforma la llanta. Se aprecian también los radios fijados a los nudos y el sistema de suspensión de las cápsulas, que, por gravedad, mantienen en todo momento la posición vertical.



El Singapore Flyer

La fotografía izquierda de la página siguiente reproduce el Singapore Flyer, que con un diámetro de 150 m es la rueda más grande que existe hasta el momento; montada en su pedestal, alcanza los 165 m de altura. Fue construida entre 2005 y 2008.



Si bien su sistema de soporte es menos sofisticado que el del London Eye, en su diseño destaca la ligereza de la llanta. Al igual que este, sus 28 cápsulas, con capacidad para 28 personas y dotadas con aire acondicionado, efectúan un giro cada 30 minutos.



La fotografía central permite apreciar que la estructura primaria de la llanta está realizada mediante dos tubos de gran sección. El arriostramiento entre los tubos principales de la llanta se realiza, también, mediante perfiles tubulares.

La fotografía superior derecha corresponde a una fase del montaje del Singapore Flyer en que se emplearon siete radios provisionales de estructura de celosía, que posteriormente fueron desmontados.

6.5.10.El concepto estructural de las ruedas de bicicleta aplicadas a la arquitectura

Las grandes ruedas que hemos visto hasta el momento, si bien se han convertido en iconos de las ciudades donde están emplazadas, están concebidas como atracciones de masas, no como espacios estáticos para ser habitados o compartidos.

Como tales, dichas ruedas están resueltas como mecanismos en que prevalecen el movimiento y el plano vertical. La adaptación del concepto estructural de las ruedas de bicicleta a la arquitectura requiere estaticidad, en contraposición con el movimiento, y la generación de planos horizontales o próximos a la horizontal. Ello supone girar la estructura 90° con respecto a su eje e incorporar membranas textiles tensadas para cubrir los espacios resultantes.

Aplicando el concepto mecánico de las ruedas de bicicleta y deformando sus proporciones, es posible construir una especie de viga Fink espacial, con interesantes aplicaciones constructivas.



Las fotografías inferiores muestran una rueda de bicicleta atípica, girada 90°. En la misma, el buje es extraordinariamente largo; la llanta, de diámetro muy pequeño, y el número de radios se reduce a cuatro. Con esta disposición espacial, se consigue rigidizar los radios para que soporten las cargas derivadas del efecto del viento de la membrana formada por paraboloides hiperbólicos sujeta a ellos.



De las consideraciones anteriores, puede concluirse que el comportamiento mecánico de una estructura basada en los principios de una rueda de bicicleta se basa en la disposición de:

- Un aro de compresión
- Un número par de radios
- El trabajo a tracción de los radios, que permite reducir sustantivamente su sección al no existir pandeo. (Pueden llegar a ser sustituidos por cables.)
- Un buje traccionado radialmente que, junto con el tensado de los radios y la llanta comprimida, garantiza la rigidez del conjunto.

De los conceptos precedentes, se concluye que el concepto de “rueda de bicicleta” responde a una estructura racional por su rigidez y ligereza. Por ello, es aplicable a la construcción de cubiertas de edificios de planta circular o próxima a la circular.

El material idóneo para su construcción es el acero, si bien el aro de compresión puede sustituirse por hormigón armado. Para salvar grandes luces, los radios tienen, como alternativa, los cables de acero.

La sensibilidad de las grandes estructuras de acero tensado a los cambios térmicos aconseja combinar las basadas en “ruedas de bicicleta” con cerramientos ligeros y flexibles, formando escamas superpuestas o membranas.

Como ejemplos recientes de esta técnica constructiva, se exponen los edificios siguientes:



- El Sony Center de Berlín
- La cubierta del estadio BayArena
- El King Fahd Stadium de Riad

El Sony Center de Berlín

La fotografía inferior izquierda muestra la cubierta de planta elíptica de la plaza interior del Sony Center de Berlín, obra del arquitecto Helmut Jahn (1940), resuelta siguiendo los principios mecánicos de una rueda de bicicleta.

La llanta está formada por una viga en celosía triangulada, construida mediante perfiles estructurales tubulares. Los radios están formados por cables. El buje, proporcionalmente más largo que el de una rueda de bicicleta, dispone, en su parte superior, de un aro de tracción en forma de cono invertido (v. fotografía central). Del aro de tracción emergen los radios que soportan la cubierta, que combina zonas transparentes con otras traslúcidas

El cono del buje está formado por una estructura tubular en celosía, que concluye en un mástil. En el extremo inferior de dicho mástil, confluyen, de forma radial, mediante un herraje especial, los cables de suspensión inferiores (v. fotografía inferior derecha).



Una variante de cubierta realizada conforme a los principios de la rueda de bicicleta consiste en sustituir el buje central por un aro de tracción y generar el efecto viga mediante cables anclados, respectivamente, a la parte superior o inferior del aro de compresión, resuelto con una gran viga triangulada de planta circular. Es el caso de la cubierta del estadio Bayer Arena de Leverkusen.



Cubierta del estadio BayArena

La nueva cubierta del estadio Bayer Arena de Leverkusen, concebida por Henrich-Petschnigg & Partner para proteger a la totalidad de los 30.000 espectadores de los efectos directos de la radiación solar, del viento y de la lluvia, forma parte de las obras de remodelación de dicho estadio, concluidas en 2009 después de veinte meses de trabajo.

De la misma podría decirse que es la versión “corregida y aumentada” del Círculo Municipal de Montevideo, toda vez que está realizada con cables y dispone, como aquel, de aros concéntricos de compresión y de tracción.

“Corregida,” por la disposición de una doble capa de cables que confluyen en el aro de tracción central. El número de radios es de 36 en el nivel inferior y de 72 en los superiores. Ello confiere mayor estabilidad a la cubierta, sea cual sea la dirección del viento, puesto que dispone de un amplio vano central abierto (v. fotografías inferiores).



Y “aumentada,” porque la luz que salva el aro de compresión es de 217 m. Está realizado mediante una estructura tubular triangulada, cubre una superficie de 28.000 m² y se encuentra a 30 m sobre el nivel del suelo. Como puede apreciarse, en la zona cubierta se produce la adaptación de la planta circular del aro de compresión a la planta rectangular del terreno de juego.

El conjunto descansa sobre ocho soportes tubulares en V, cada uno de los cuales descarga 80 toneladas. Están dispuestos en el exterior del estadio, de modo que no interfieren con las estructuras existentes (recuérdese que se trata de una obra de remodelación).

La cubierta está realizada mediante cables de acero cuyo diámetro oscila entre los 70 y los 90 mm. Se precisaron 500 toneladas de cable, lo que supone una ratio de 18 kg/m² de superficie cubierta y una longitud total de cables de 12.800 m. La fotografía siguiente izquierda muestra el proceso de izado del aro de tracción mediante el tensado progresivo de los cables perimetrales; la de la derecha, el aspecto del estadio terminado.



Para salvar la luz de un estadio de fútbol, en la actualidad pueden adoptarse diversos modelos estructurales. Cubrirlo por completo afecta la conservación del césped debido a la falta de luz natural.

En el BayArena, se optó por una situación intermedia: proteger las gradas y dejar libre la zona central. Ello facilita el asoleo y la conservación del césped.

Los paneles de cubierta, de 2,5 cm de espesor, son traslúcidos; el material de base es un policarbonato comercializado por Bayer, desde 1990, con el nombre de Makrolon. Permiten que el césped reciba suficiente luz natural para que no se requieran otros aportes para su conservación.

Una segunda variante de cubierta realizada conforme a los principios de la rueda de bicicleta consiste en sustituir el aro de compresión por mástiles anclados y un aro de tracción central. Es el caso del King Fahd Stadium de Riad, que se detalla a continuación.

El King Fahd Stadium de Riad

Las fotografías siguientes corresponden al King Fahd Stadium de Riad, inaugurado en 1987, cuya estructura responde al modelo descrito de rueda de bicicleta. Su diámetro total es de 247 m. La cubierta tensotextil, soportada por 24 mástiles, tiene una superficie de 47.000 m² y cubre la totalidad del aforo del estadio, previsto para 68.000 espectadores.





La originalidad y las interesantes prestaciones del modelo estructural y sus variantes, derivadas de la racionalidad de su geometría y del uso de cables traccionados, ofrecen un futuro prometedor a las estructuras arquitectónicas, de gran luz, basadas en los principios de las ruedas de bicicleta. Pero, para ello, es preciso que los profesionales conozcan mejor y difundan los procesos constructivos y de cálculo que permiten convertir los diseños más avanzados en realidades eficientes.

6.6. Arquitectura tensotextil. Algunas tipologías constructivas realizadas con tubos, cables y membranas

Elementos estructurales muy simples, tubos cables y membranas constituyen la base compositiva de algunas de las realizaciones más brillantes de la construcción actual, basada en el desarrollo tecnológico y que es conocida con el nombre genérico de arquitectura tensotextil.

En dichas obras, el “menos es más” de Mies van der Rohe alcanza las cotas más altas de creatividad e innovación en los ámbitos de la arquitectura y la construcción, a base de combinar la simplicidad y la eficiencia estructural con la belleza y la funcionalidad.

Algunas de las tecnológicas y constructivas de las membranas se exponen en el capítulo “Analizando la construcción,” en el apartado relativo a los modelos estructurales en la construcción de edificios y, en concreto, al “modelo tienda”.

En el presente apartado se amplían el contenido del precedente y se muestran algunas de las posibilidades de la arquitectura tensotextil, mediante la generación de superficies anticlásticas. Estas son formas geométricas aptas para aplicar pretensión en dos direcciones ortogonales. De este modo, se consigue un reparto uniforme de las tensiones y se evitan arrugas en las membranas que alterarían la calidad de su superficie.

Las superficies anticlásticas más comúnmente empleadas por la arquitectura tensotextil son los paraboloides hiperbólicos, los hiperboloides de revolución, los conoides y las secciones de toro de revolución, así como sus variantes y combinaciones. Ello ofrece un amplio abanico de formas y posibilidades compositivas.

Como en la confección de las membranas se parte de telas planas, es preciso que cada elemento modular coincida con la superficie anticlástica prevista en el diseño.

Ello requiere efectuar un patronaje y un corte de piezas esmerados con programas de ordenador creados a tal efecto.



Es preciso disponer de procedimientos para unir los diferentes sectores mediante un cosido o una termosoldadura, en función del tipo de tela empleado. Por último, han de integrarse en la membrana los elementos de anclaje necesarios para garantizar la transmisión correcta de las tensiones, cuya función es garantizar la estabilidad estructural y la forma de la membrana.

Habitualmente, el peso propio de las telas es inferior a 1 kp/m^2 . Dependiendo de las luces, el peso propio total de una cubierta realizada según los principios de la arquitectura tensotextil oscila entre 5 y 10 kp/m^2 . Es preciso considerar que una tela de calidad soporta una tensión de 200 kp en una banda de 5 cm de anchura. Esta elevada relación resistencia-peso permite desarrollar grandes luces.

Los materiales comúnmente utilizados en la confección de las membranas reflejan más del 75 % de la energía solar incidente, lo cual hace que sean muy eficaces como cubiertas en las zonas templadas, tropicales y áridas.

Desde el punto de vista lumínico, las membranas absorben, por término medio, el 17 % de la luz solar y transmiten al interior del orden del 13 % de la luz incidente. Ello permite aprovechar la iluminación natural. Esta llega agradablemente matizada al interior de los recintos.

También resulta interesante considerar, durante las fases de elección del sistema estructural, que en la arquitectura tensotextil la puesta en obra se realiza mediante el montaje de elementos prefabricados, lo que facilita su nomadismo o, en su defecto, el reciclaje de los materiales derivados de la deconstrucción. A continuación, se exponen algunos ejemplos tipológicos significativos de arquitectura tensotextil en función de su estructura de soporte:

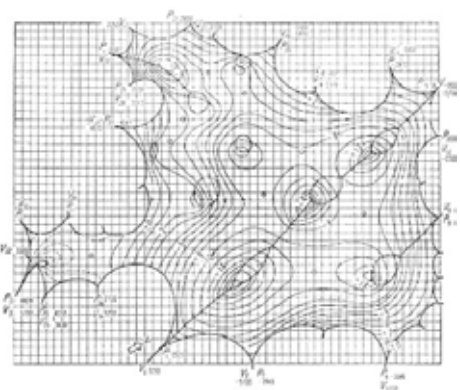
- Mástiles y cables
- Pórticos
- Voladizos invertidos
- Cúpulas geodésicas
- Sistemas mixtos

Esta selección muestra solo una porción reducida de las posibilidades plásticas y tecnológicas de la arquitectura tensotextil.

Mástiles y cables

El Pabellón Alemán de la Expo de Montreal fue construido en 1967 por Frei Otto (1925) y Rolf Gutbrod (1910-1999). En la fotografía izquierda de la página siguiente se aprecia el tendido de la red de cables previo a la colocación de la membrana. Dicha red está soportada por siete mástiles cuyas alturas oscilan entre los 14 y los 38 metros.

La red de cables venía impuesta, porque en la época no se disponía de una tela suficientemente fuerte para soportar las tensiones derivadas de una cubierta



de tales dimensiones. Por ello, una vez realizada la red de cables, se procedió a suspender de la misma la membrana. En la fotografía inferior derecha, que muestra el pabellón terminado, es posible apreciar la red de cables por encima de la membrana.

Este trabajo supuso el punto de partida para la aplicación tanto de aspectos teóricos de *cálculo* matricial como de soluciones constructivas para estructuras tensionadas que posteriormente han adquirido carácter de repertorio.

La fotografía superior izquierda muestra el agradable ambiente lumínico conseguido en el interior del recinto mediante la luz natural filtrada a través de los 10.000 m² de tela de poliéster recubierta de PVC. La fotografía superior derecha muestra la planta modulada del pabellón, cuyas dimensiones máximas eran de 130×105 m y una superficie de 8.000 m².

Las dos fotografías siguientes corresponden al estadio y al recinto olímpico de Múnich, inaugurado en 1972, obra de los arquitectos Günter Behnisch (1922-2010) y Frei Otto (1925).

Este trabajo, por sus dimensiones colosales y por el reconocimiento internacional que obtuvo, supuso la mayoría de edad de la arquitectura tensotextil. Algunos



datos numéricos así lo corroboran: el estadio tiene una capacidad para 80.000 espectadores; los postes tubulares que soportan la red de cables alcanzan los 80 m de altura, y la superficie cubierta del parque olímpico es de 74.800 m², de los que 33.750 corresponden al estadio.

El funcionamiento mecánico de la cubierta es similar al del Pabellón Alemán de la Expo de Montreal. Los mástiles se mantienen en posición gracias a la tensión de los cables principales. Una vez estabilizados, se dispone del soporte preciso para instalar la red de cables encargada de sostener las superficies de la carpa. El enlace entre los cables de la red se realizó mediante un nudo de fundición de acero que permitía el anclaje, el atornillado y el tensado.

La cubierta presenta zonas semitransparentes para los espacios abiertos y zonas translúcidas en los espacios cerrados. Las primeras están realizadas con placas de Plexiglás (nombre comercial de la resina sintética, transparente y flexible, que se obtiene por polimerización del metacrilato de metilo) de 75×75 cm, que se adaptan a la forma de la membrana. Las zonas translúcidas están resueltas con una lámina de poliéster revestida de PVC de 4 mm de espesor total, presentada en bobinas de 2,90×29 m.

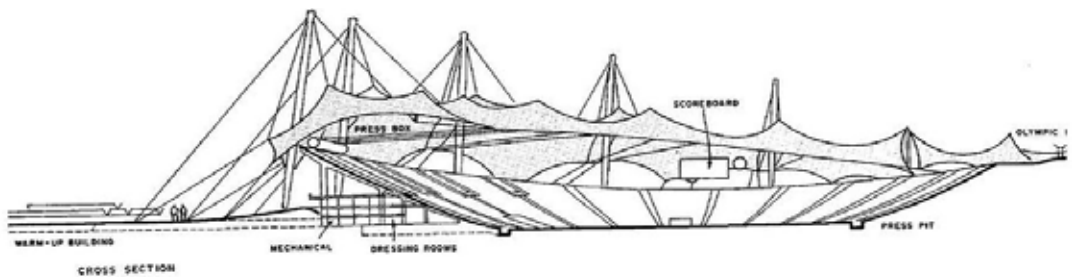
El problema de las eventuales deformaciones de la membrana debidas a oscilaciones térmicas se resolvió apoyándola sobre tacos de neopreno.

El defecto fundamental de las zonas cubiertas del Parque Olímpico de Múnich es la falta de aislamiento térmico inherente al modelo constructivo. En la actualidad, no tiene otra solución que compensar los diferenciales de temperatura mediante aportaciones energéticas. Es posible que, en el futuro, se generen láminas de doble capa con aislamientos térmicos ligeros y de alta eficiencia que permitan un mejor control ambiental de las zonas cubiertas mediante sistemas tenso textiles.

La fotografía siguiente permite apreciar el tamaño de un fragmento de la cubierta en relación con la escala humana.



La sección representada en el gráfico inferior muestra el diseño hábil del estadio, de inspiración romana. En buena parte del mismo, se aprovecha y se acondiciona el terreno natural para la colocación de las gradas.



Transcurridos más de cuarenta años desde su inauguración, el Parque Olímpico de Múnich sigue siendo una de las obras de mayor significación estética y tecnológica del siglo xx y una referencia de la arquitectura tensotextil.

En la línea de emplear mástiles y cables como elementos de anclaje de membranas, destaca la estructura de siete brazos, inspirada en sogas y velas marineras, realizada en 1992 por el arquitecto Renzo Piano (1937) dentro de los trabajos de remodelación del puerto de Génova (v. fotografías inferiores).





Pórticos

Los pórticos permiten modular un espacio mediante su repetición. Por ello, constituyen un tipo de soporte útil para cubrir plantas rectangulares y permiten ampliaciones por adición, si es preciso.

La estructura de los pórticos se realiza con materiales ligeros. El aluminio, los tubos de acero y la madera laminada encolada son los materiales empleados con más frecuencia.

Las dos fotografías inferiores corresponden a pabellones realizados mediante pórticos de directriz recta, resueltos a dos aguas, que soportan la correspondiente membrana de cerramiento. Si bien se trata de arquitectura textil, estos modelos no figuran en la categoría de la arquitectura tensotextil al no disponer de superficies anticlásticas que establezcan su forma a través del tensado.

Obsérvese, en la fotografía interior izquierda, la colocación de lastres en las bases de los pórticos para garantizar la estabilidad estructural frente a esfuerzos debidos al viento. Se trata de una solución frecuente cuando este tipo de carpas se instalan durante un corto período de tiempo. De este modo, se evita dañar los pavimentos existentes, al no ser precisos los anclajes mecánicos.

Los dos ejemplos de las fotografías de final de página corresponden a cubiertas de arquitectura tensotextil resueltas mediante pórticos de estructura tubular de acero. En el modelo de la izquierda, realizado en celosía, la membrana se encuentra suspendida de la estructura, mientras que, en el de la derecha, esta se apoya directamente sobre los pórticos.





Las fotografías inferiores corresponden a unos pórticos arqueados realizados con madera laminada encolada. La curvatura ortogonal se logra mediante arcos de perfil tubular de acero. El arriostramiento longitudinal está realizado con tres correas de madera laminada y el transversal, con diagonales tubulares que triangulan el encuentro del arco con el pilar.



Voladizos invertidos

El uso más habitual de la arquitectura tensotextil es como cubierta, una de cuyas funciones es proteger del sol y de la lluvia. A efectos de evacuación de las aguas, los modelos más racionales son aquellos que tienen las zonas centrales elevadas con respecto al perímetro. Sin embargo, ello puede propiciar la formación de una cortina de agua en los bordes; por ello, no es de extrañar la construcción de voladizos circulares, semejantes a paraguas invertidos de tamaños diversos. En ellos, el agua de la lluvia es evacuada a través del mástil, sin que se produzcan concentraciones en los bordes.

La fotografía de la página siguiente izquierda corresponde al Bulevar de Sabana Grande de Caracas, Venezuela. En el mismo se instalaron, en el año 2010, un total de seis paraguas de 85 m² cada uno, en forma de conoide invertido de planta ochavada, realizados según los principios de la arquitectura tensotextil.

La fotografía permite apreciar el modelo estructural, en que los ocho radios suspendidos del mástil central, junto con los radios inferiores y la tensión de la tela fijada a dicho mástil, confieren a la estructura la rigidez necesaria para mantener su forma inalterable.

Estructuralmente, se trata de una aproximación a una rueda de bicicleta en que la llanta ha sido sustituida por los ocho radios, y la membrana, con su tensión, hace el efecto de los radios inferiores.

La fotografía derecha muestra las posibilidades de difusión lumínica al incidir sobre la membrana la luz emitida por las luminarias fijadas en el mástil por la parte inferior de la misma. También es posible colocar luminarias en el interior y lograr interesantes efectos utilizando luminarias LED.



Las fotografías siguientes corresponden a dos soluciones aparentemente similares, si bien la de la izquierda está resuelta mediante múltiples radios formados por cables traccionados, mientras que la de la derecha se sustenta mediante cuatro radios flectados.



Las dos fotografías siguientes muestran a la tribuna del circuito de Sepang, en Kuala Lumpur, inaugurado en 1999. Puede apreciarse el cambio de escala con respecto a los ejemplos precedentes. La estructura está formada por un sistema radial de 16 voladizos tubulares, enlazados entre sí mediante arcos. Una disposición lineal del mismo concepto estructural permite resolver la cubierta de las tribunas.

Por su singularidad, destaca también el Pabellón de Venezuela de la Expo de Hannover 2000, obra del arquitecto Fruto Vivas (1928) (v. fotos en página siguiente), denominado "Una flor para el mundo." Su cubierta, formada por dieciséis





pétalos móviles mediante un sistema de pistones hidráulicos, imita la forma de una orquídea, que es la flor nacional de este país. Cuando está completamente abierta, alcanza un diámetro de 39 m.

La fotografía inferior izquierda muestra el aspecto del pabellón con la cubierta cerrada. La fotografía de la derecha, con la cubierta abierta, permite apreciar la estructura de los pétalos y el efecto plástico de la iluminación reflejada en la membrana.



Cúpulas geodésicas

Por su geometría de doble curvatura, las cúpulas geodésicas constituyen una estructura excelente para soportar membranas, tanto suspendidas de sus nudos (v. foto inferior derecha) como apoyadas sobre ellos (v. fotografía inferior izquierda).



Sistemas mixtos

Los sistemas mixtos para la fijación estructural de elementos tenso-textiles aprovechan las estructuras preexistentes como elementos de soporte a los cuales se fijan cables u otros elementos estructurales.

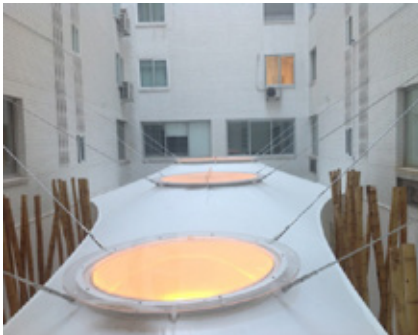


Ello ofrece la posibilidad de integrar dichas soluciones en edificios construidos, sin necesidad de realizar estructuras específicas para su soporte, gracias a su ligereza y a la disposición de sistemas de anclaje eficientes, desarrollados gracias a la conjunción de esfuerzos entre las industrias metalúrgica y química.

El ejemplo de la fotografía inferior izquierda corresponde a una pantalla planteada para crear una cierta independencia, sin sacrificar luz, entre la planta baja de un patio y las restantes plantas que dan al mismo.

El anclaje de la membrana al edificio se produce mediante tres anclajes lineales, situados a la altura del forjado de la planta primera. Los dos conoides trucados que incorporan los lucernarios se sustentan, cada uno de ellos, mediante cuatro cables de acero inoxidable anclados, mediante placas, a la altura del forjado de la planta segunda.

La fotografía inferior derecha corresponde a la cubierta de un patio longitudinal que se pretende cubrir parcialmente. Para el soporte de la membrana, se utilizan dos muros enfrentados, sobre los cuales se fija un arco tubular y anclajes puntuales que recogen los cables de borde de la estructura tensotextil.



De todo lo expuesto, es razonable concluir que la arquitectura tensotextil, que combina tubos, cables y membranas, se inició a mediados de los años sesenta, se consolidó durante los Juegos Olímpicos de Múnich y adquirió la madurez a partir de los años noventa.

La arquitectura tensotextil es un ejemplo claro de construcción tecnológica. Si bien el modelo "tienda" es coetáneo a los denominados "cueva" y "cabaña", como se expone en el apartado 1.3 "Los modelos estructurales en la construcción de edificios", resultan evidentes las limitaciones mecánicas y de durabilidad de las fibras naturales, por lo que su desarrollo solo pudo producirse en el marco temporal de la construcción tecnológica, es decir, desde los años cincuenta hasta nuestros días.



6.7. Elementos y condiciones necesarios para el desarrollo de la arquitectura tensotextil

Como argumentos para validar lo expuesto en el párrafo anterior, con respecto a los elementos y a las condiciones necesarios para el desarrollo de la arquitectura tensotextil, se exponen y analizan algunos aspectos sobre la temporalidad y las circunstancias de los conceptos siguientes.

- Cables de acero de alta resistencia
 - Perfiles laminados tubulares de acero
 - Membranas resistentes y durables
 - Procedimientos eficientes para su cálculo
 - Disposición de sistemas de patronaje y corte mediante control numérico
 - Sociedad avanzada y dinámica que requiere soluciones constructivas eficientes y sostenibles
- **Cables de acero de alta resistencia.** No se desarrollaron plenamente hasta finales del siglo XIX. Sus usos principales fueron copados por la industria, especialmente la minera, con la excepción de los puentes colgantes, que eran realizaciones más ingenieriles que arquitectónicas.
 - **Perfiles laminados tubulares de acero.** Los perfiles tubulares mejoran las prestaciones y la estética de las estructuras de soporte de las realizaciones propias de la arquitectura tensotextil por la idoneidad geométrica de la sección, con independencia de su orientación.

A efectos temporales, es preciso considerar que la empresa alemana Müller no desarrolló hasta 1954 la primera máquina de tres ejes para preparar, de forma automatizada y precisa, los extremos de los tubos para soldarlos entre sí cuando estos tienen diámetros diferentes.

- **Membranas resistentes y durables.** Las condiciones indicadas de resistencia y durabilidad no se daban en las lonas que se habían empleado durante siglos para confeccionar las velas de los barcos. En consecuencia, la arquitectura textil a gran escala resultaba inviable por falta de materia prima.

Las membranas que se emplean actualmente en la arquitectura tensotextil han de cumplir, además, otros requerimientos: escasa deformabilidad, insensibilidad a los cambios térmicos, impermeabilidad y resistencia al fuego.

Hasta mediados los años noventa, las membranas más comunes estaban formadas por fibras de poliéster revestidas de PVC. Si bien el PVC inició su etapa comercial en 1926, el poliéster en fibras no se produjo, de forma industrial, hasta principios de los años cincuenta.



La asociación entre ambos productos, con capacidad para fabricar membranas susceptibles de ser aplicadas en la arquitectura tensotextil, se produjo a principios de los sesenta.

- **Procedimientos eficientes para su cálculo.** El desarrollo de los conceptos teóricos del cálculo matricial, imprescindible para determinar las necesidades resistentes en cada punto de una membrana de arquitectura tensotextil, requiere disponer de ordenadores y del software adecuado.

La generación y disponibilidad de tales condiciones, en especial del software, no se produjeron hasta 1972, por parte del equipo dirigido por Frei Otto, con motivo de las Olimpiadas de Múnich.

- **Disposición de sistemas de patronaje y corte mediante control numérico.** El paso de la actividad artesana a la industrialización de los procesos de diseño, mediante la ayuda de ordenadores y de programas de software, permite multiplicar la oferta de los modelos disponibles.

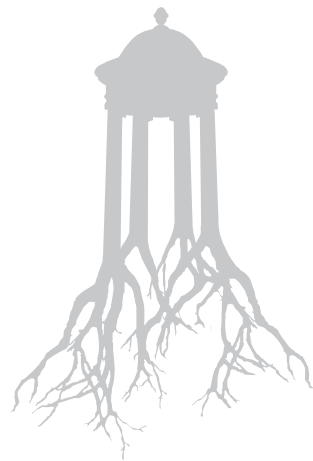
El mercado se hace así más amplio y puede llegar a un mayor número de clientes potenciales, al posibilitar una mejor adecuación a las necesidades de cada caso. En la misma línea de mejora tecnológica cabe situar los procesos de ensamblado de los distintos sectores que conforman una membrana mediante termosoldadura o cosido.

- **Sociedad avanzada y dinámica que requiere soluciones constructivas eficientes y sostenibles.** La construcción tiene su razón de ser como un servicio para cubrir las necesidades sociales, de cobijo, de trabajo, de reunión o de ocio. En la medida en que sus realizaciones se adapten a los requerimientos de cada proyecto, cumplirá mejor con su función.

A modo de conclusión final del capítulo, cabe señalar que la arquitectura tensotextil, por su ligereza, versatilidad, valores estéticos y escaso impacto ambiental, constituye una alternativa a considerar cuando se plantea la necesidad de cubrir amplios espacios.

En la actualidad, ya ha adquirido la mayoría de edad y constituye una especialidad más de la arquitectura y, en consecuencia, de las construcciones arquitectónicas.

En un futuro próximo, la arquitectura tensotextil adquirirá, sin duda, una nueva dimensión gracias al desarrollo de membranas que ofrezcan un buen aislamiento térmico, uno de los pocos puntos débiles de un sistema recién incorporado a una actividad milenaria, como es la construcción, y que, en un brevísimo espacio de tiempo, ha conseguido situarse en los primeros puestos, de la mano de los arquitectos contemporáneos más relevantes y con mayor capacidad tecnológica.







Bibliografía

Historia de la arquitectura

- Kaufmann, Emil. *De Ledoux a Le Corbusier: origen y desarrollo de la arquitectura autónoma*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982. ISBN: 8425211336
- Kostof, Spiro. *Historia de la arquitectura*. Madrid: Alianza, 1988. ISBN: 8420679968
- Pevsner, Nikolaus. *Esquema de la arquitectura europea*. Buenos Aires: 1988.

Construcción con hierro y cristal

- Kottas, Dimitris. *Vidrio: Arquitectura y construcción*. Barcelona: Links, 2012. ISBN 9788415123859
- Vásquez Zaldívar, Claudio. *El Vidrio : arquitectura y técnica*. Santiago de Chile: Ediciones ARQ, 2006. ISBN: 9561409070
- Hix, John. *The Glasshouse*. London: Phaidon, 1996. ISBN: 9780714845258
- Feliu Torras, Assumpció. *La Barcelona de ferro : a propòsit de Joan Torras Guardiola*. Barcelona: Ajuntament de Barcelona, Museu d'Història de la Ciutat de Barcelona, 2011. ISBN: 9788498503418

Construcción con hormigón

- Peck, Martin. *Concrete: design, construction, examples*. Basel: Birkhäuser Detail, cop. 2006. ISBN: 9783764376314



- Roth, Manuela. *Concrete : architecture & design*. Salenstein]: Braun, 2012. ISBN: 9783037681077
- Petricone, Pina. *Concrete ideas : material to shape a city*. London: Thames & Hudson; 2012. ISBN: 9780500342817

Construcción co madera laminada encolada

- Steurer, Anton. *Developments in timber engineering : the swiss contribution*. Basel: Birkhäuser, cop. 2006. ISBN: 3764371633
- Gauthier, Paul. *La Construcción con madera laminada: manual técnico*. Pamplona: Paul Gauthier, 2003. ISBN: 8460770796
- Vignote Peña, Santiago. *Tecnología de la madera*. Madrid: Mundi-Prensa, 2006. ISBN: 9788484762638
- *Il Manuale del legno strutturale*. Roma: Mancosu, cop. 2001
- Peralta Sánchez, J.E. *Guía de la madera*. Madrid: AITIM, 2010. ISBN: 9788487381409
- Sánchez Mazaira, Antonio. *La Madera laminada encolada*. Madrid: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid. Fundación Escuela de Edificación, 1992. ISBN: 8486957443

Mallas espaciales

- Escrig Pallarés, Félix. *Modular, ligero, transformable : un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, 2012. ISBN: 9788447214273
- Perles, Pedro. *Temas de estructuras especiales*. Buenos Aires: Nobuko, 2003. ISBN: 9879474155
- Robbin, Tony. *Engineering a new architecture*. New Haven: Yale University Press, cop. 1996. ISBN: 0300061161
- Koch, Klaus-Michael; Habermann, Karl J. *Membrane structures : innovative building with film and fabric*. Munich [etc.] : Prestel, cop. 2004. ISBN: 3791330497

Estructuras

- Johnson, R. P. *Composite structures of steel and concrete*. Oxford : Blackwell, cop. 2004. ISBN: 1405100354

- McCormac, Jack C. *Análisis de estructuras : métodos clásico y matricial*. Barcelona: Marcombo ; México : Alfaomega, 2011. ISBN: 9788426717092
- Urbán Brotóns, Pascual. *Construcción de estructuras metálicas*. San Vicente (Alicante), 2009. ISBN: 978-84-8454-824-9

Arquitectura textil

- Forster, Brian / Mollaert, M. *Arquitectura textil: guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas*. Munillalera, 2009 ISBN 9788489150829
- Frei Otto; Rudolf Trostel; Friedrich Karl Schleyer. *Tensile structures; design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and membranes*. Vol I & II. 1ª Edición. (1973). Cambridge :The MIT Press ISBN: 0262650053
- Scheuermann, Rudi; Boxer, Keith. *Tensile architecture in the urban context*. 1ª Edición. 1996. Butterworth Architecture. ISBN: 9780750604383.
- Motro, René. *Flexible Composite Materials in Architecture, Construction and Interiors*. Basilea: Birkhäuser Verlag GmbH., 2012 ISBN: 376438972.

Edificios en altura

- Araujo, Ramón. *Construir en altura: sistemas, tipos y estructuras*. Barcelona: Reverté, 2012. ISBN: 9788429131031
- Cobreros Vime, Miguel Ángel. *Tipologías estructurales de edificios en altura. Structural typologies for tall buildings*. Sevilla : Universidad de Sevilla, Grupo de Investigación Tecnología Arquitectónica, 2002
- Eduardo González Fraile. *La Comprensión de la arquitectura moderna : edificios de viviendas en altura*. Valladolid: Universidad de Valladolid. Departamento de Teoría y Proyectos Arquitectónicos, 2003. ISBN: 8460787591.

Gestión de proyectos

- Leceta Rey, Alfredo. *Manual de dirección y control de obra*. Guadalajara: Gabinete Técnico, Aparejadores Guadalajara. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Guadalajara, 2012
- Fewings, Peter. *Construction project management*. London: Taylor & Francis, 2005. ISBN: 0415359066
- Drudis, Antonio. *Gestión de proyectos : cómo planificarlos, organizarlos y dirigirlos*. Barcelona : Gestión 2000 cop., 2002. ISBN: 8480887222



Vivienda colectiva-masiva.

- Martí Arís, Carlos. *Las Formas de la residencia en la ciudad moderna : vivienda y ciudad en la Europa de entreguerras*. Barcelona: Edicions UPC, 2000. ISBN: 8483013835
- Sambricio, Carlos, et al. *Un Siglo de vivienda social : 1903-2003*. Hondarribia: Nerea, cop., 2003. ISBN: 8489569916
- French, Hilary. *Vivienda colectiva paradigmática del siglo XX : plantas, secciones y alzados*. Barcelona : Gustavo Gili, 2009. ISBN: 9788425222986