Tema 1

LA CONSTRUCCIÓN Y LOS MATERIALES

Esquema de contenidos

1. Construcción, materiales y condiciones ambientales.
   - 1.1. La construcción en piedra.
     - 1.1.1. Conglomerantes de la piedra.
     - 1.1.2. Mampostería y sillería.
   - 1.2. La construcción en barro.
     - 1.2.1. Adobe y tapial.
     - 1.2.2. Ladrillo.
   - 1.3. El hormigón romano.
   - 1.4. La construcción en madera.
     - 1.4.1. El entramado.
2. La construcción preindustrial.
   - 2.1. La arquitectura adintelada.
   - 2.2. La arquitectura abovedada.
3. Nuevos materiales y renovación arquitectónica.
   - 3.1. El hierro.
   - 3.2. El vidrio y el cristal.
   - 3.3. El acero.
   - 3.4. El hormigón.

Las técnicas de la arquitectura se tratarán aquí como los métodos mediante los cuales se construyen las estructuras con unos determinados materiales. Estos métodos están condicionados no solo por la disponibilidad y el carácter de estos materiales, sino también por el grado de desarrollo tecnológico conseguido por una sociedad. La arquitectura depende de un trabajo perfectamente estructurado, de la existencia de las herramientas y las técnicas precisas, de las manufacturas, del transporte y de la durabilidad de los materiales.

La evolución de estas técnicas está condicionada por dos fuerzas. Una es económica, la búsqueda de una mayor estabilidad y persistencia en la construcción con un mínimo de componentes; la otra es estética, el deseo de configurar un espacio concreto. A lo largo de la historia, las técnicas de la arquitectura han sufrido una rápida progresión atendiendo a dos hechos: que los condicionantes económicos sugieran la adopción de una determinada estética, y que la aparición de nuevas estéticas y estilos favorezcan la aplicación de técnicas concretas.

El último propósito es construir una estructura estable. Las fuerzas que actúan sobre un edificio y lo pueden desestabilizar son, en primer lugar, su propio peso, y en segundo, otras cargas. Estas fuerzas pueden ser activas espacialmente en todas las dimensiones y, para mantener la estabilidad, deben ser equilibradas; para conseguir tal fin existen una serie de elementos arquitectónicos que comentamos más adelante.

Las técnicas constructivas se comprenden atendiendo a las características de los materiales de construcción y a los métodos por los que son utilizadas.

1. Construcción, materiales y condiciones ambientales

Por construcción se entiende no sólo los materiales y los elementos arquitectónicos utilizados en la fabricación de edificios, sino también las técnicas y los procedimientos estudiados, adoptados y desarrollados por el hombre con el



Figura 1. *Constructores egipcios. Pinturas de la tumba de Rehkmira en Tebas (siglo XVI-XV a.C. Britis Museum, Londres).*

fin de aplicar soluciones edificatorias para protegerse, para organizarse socialmente y para llevar a cabo sus actividades. Vamos a considerar la construcción como un conjunto de conocimientos sobre materiales, técnicas y medios para la ejecución del edificio ideado.

La construcción de arquitecturas siempre ha estado mediatizada por las posibilidades de extracción y de transporte, y por las técnicas de colocación, de los distintos materiales, según su propia estructura y cualidades funcionales.

Estos materiales, por su comportamiento, se pueden agrupar en dos grandes conjuntos, que van a condicionar básicamente el desarrollo de las técnicas constructivas: aquéllos que trabajan a *compresión* (aplastamiento), y aquéllos que trabajan a *flexión*. Toda la historia de la construcción tiene como referente la evolución de las técnicas de uso y de combinación de estos dos grandes grupos de materiales.

Cada elemento de una estructura tiene que resistir diversas fuerzas sin deformarse ni romperse: los tres tipos de fuerzas más importantes que actúan



Figura 2. *Miniatura gótica que representa a constructores góticos*.

sobre las estructuras son la de compresión, la de tracción y la de flexión. Las cualidades técnicas y morfológicas de cada material favorecerán un uso u otro en la arquitectura. Para sufrir una fuerza por "aplastamiento" (compresión), se elegirán materiales adecuados como son la piedra, el barro en sus diferentes formas, los conglomerados y los hormigones; estos materiales se convierten, en el proceso constructivo, en elementos o en partes concretas del edificio, que de forma frecuente son los muros, las columnas y los pilares, elementos sustentantes mayoritariamente verticales. Por tanto, un esfuerzo de compresión es simplemente el que ejerce un peso sobre una pieza, por ejemplo, el que soporta una columna en la dirección de su fuste.

Por otra parte, hay elementos estructurales que soportan fuerzas a flexión (fuerzas que tienden a doblarlos). Un material trabaja bien a flexión si es capaz de soportar adecuadamente esfuerzos de ese tipo. Se disponen horizontalmente. El ejemplo más representativo son las vigas, que suelen ser de madera. Una madera apoyada en sus dos extremos es capaz de aguantar un empuje en su centro doblándose, pero sin romperse (flexionándose). Lo mismo sucede con una barra de acero. Cuando se produce una fuerza a flexión siempre hay compresión y tracción también.

Por tanto, los materiales que trabajan a flexión principalmente son la madera y el acero y tienden a aparecer en estructuras horizontales, aunque el acero debido a su ductilidad aparece en estructuras adaptadas a la forma como los cables que soportan las estructuras de los grandes puentes. Estos elementos soportan principalmente fuerzas de tracción, que tienden a estíralos, aunque también soportan en algunas situaciones fuerzas de compresión. Los elementos estructurales que soportan fuerzas atracción se llaman tensores o tirantes.

Dentro de la evolución histórica se deben separar, para su mejor comprensión, la construcción anterior a la etapa industrial o construcción tradicional, y la posterior, definida por la aparición de nuevos materiales, como hierro fundido, cristal, acero y hormigones con base en combinados de cemento, que han revolucionado las técnicas y las posibilidades de la arquitectura.

Dentro de las construcciones anteriores a la etapa industrial, los materiales utilizados son fundamentalmente de origen vegetal, pétreos y terrosos (madera, adobe, tapial, ladrillo, mampostería o sillería) o mixtos de ambos (entramados de madera y barro o piedra, de madera y yeso, estructuras de cubierta y forjados de tabla sobre vigas de madera, etc.).

La forma más sencilla de alojamiento humano fue en forma de tienda, construcción derivada de colgar sobre un mástil las pieles con que se cubrían los pastores trashumantes o los cazadores nómadas. En los pueblos más sedentarios, aparecen las primeras chozas con ramas y barro. Asimismo, y continuando con el tipo de cobijo protohistórico de hombres y animales en cuevas naturales, surgen alojamientos, a menudo de una gran complejidad funcional, tallados por el hombre en rocas compactas, como los *conos* de Capadocia.



Figura 3. *Maqueta de una vivienda egipcia con jardín. (Metropolitan Museum, Nueva York)*

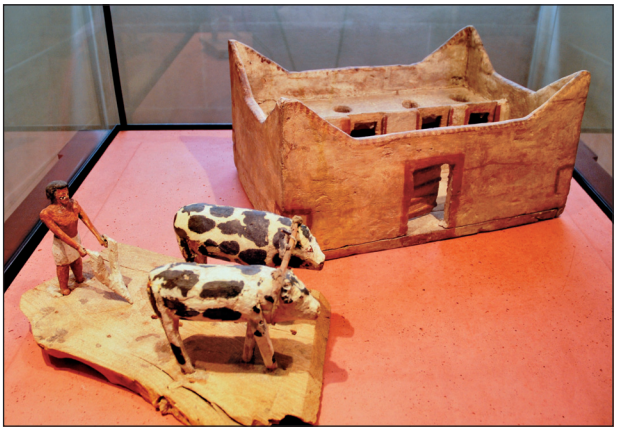


Figura 4. *Maqueta de una pequeña casa egipcia. (Museo del Louvre, París)*



Figura 5. *Urna funeraria etrusca que reproduce una cabaña de pieles. (Museo de Villa Giulia, Roma)*

1.1. *La construcción en piedra*

La piedra, tanto por sus variedades, por sus posibilidades y por su abundancia, ha sido en la historia de la construcción uno de los materiales más utilizados.

Las rocas naturales se clasifican en *eruptivas*, *sedimentarias* y *metamórficas*. Dentro del primer grupo, el de las rocas eruptivas, se encuentran dos grandes divisiones; plutónicas y volcánicas. Por su interés para la construcción destaca, dentro de las rocas plutónicas, *el granito* (Fig. 6), el más abundante. Su magnífico aspecto, natural o pulido, la variedad de tonos y coloraciones que presenta, y su excelente comportamiento para esfuerzos a compresión, le han convertido en un material fundamental para la construcción de grandes obras de arquitectura y de ingeniería. Dentro de las rocas volcánicas están los *pórfidos, traquitas y diabasas*, muy útiles como pavimentaciones o como componentes de los morteros y aglomerados, y los *basaltos*, utilizados fundamentalmente en construcciones masivas de fábrica.

En el segundo grupo, el de las rocas sedimentarias, se citan solamente aquellas que se utilizan en construcción como tales rocas. En primer lugar, las *areniscas* (Figs. 8 y 54), rocas formadas por granos de cuarzo cohesionados conglomerados por cementos naturales. Son fáciles de labrar y tallar y, por lo tanto, muy utilizadas como sillerías y en la ejecución de las zonas donde se concentra la decoración, como las portadas, aleros y canecillos, elementos decorativos de los edificios medievales. En segundo lugar, las *calizas* (Figs. 17, 18 y 55), muy empleadas en construcción y en la ejecución de elementos decorativos.

Por último hay que citar, dentro del grupo de rocas metamórficas, el *gneis*, granito metamorfoseado con todas sus variedades y aplicaciones, la *serpentina*, excelente para la construcción de detalles ornamentales, las *pizarras* (Figs. 14 y 61), excepcionales como material de cubierta, las *cuarcitas* procedentes de la metamorfosis de las areniscas y muy utilizadas en sillerías y mamposterías de la arquitectura tradicional y, por último, el *mármol* (Figs. 7 y 11), material fundamental, por su belleza, en las mejores obras de arquitectura de la historia.

Todos estos materiales, en su estado natural o con distintos grados de elaboración, han sido utilizados por el hombre desde el comienzo de los tiempos. La excavación de las cuevas naturales en rocas blandas pudo sugerir a los primeros constructores el levantamiento de muros de piedra y las cubriciones con losas. La construcción de los *dólmenes*, una gran roca horizontal apoyada sobre otras dos verticales, fue el primer paso, aunque para darlo hizo falta una elaborada técnica y unas herramientas y sistemas de transporte muy precisos, que permitieron las grandes construcciones megalíticas posteriores.

Las primeras construcciones en piedra para uso doméstico fueron muy elementales: casas y cercas para encerrar ganado hechas con la piedra recolectada directamente de los campos. Inicialmente, los muros levantados se ejecu-



Figura 6. *Columna egipcia de piedra de granito (Britis Museum, Londres).*



Figura 7. *Palacio de muros de piedra caliza y columna de mármol (Peñaranda de Duero).*



Figura 8. *Fachada de iglesia románica de piedra arenisca rojiza (Soria).*

taban sin morteros intermedios, colocando las piedras *a hueso* (Figs. 10 y 14). Ejemplo de construcciones masivas de piedra de enormes dimensiones colocadas a hueso y con unas juntas mínimas y perfectas lo encontramos en las construcciones prehispánicas americanas (Fig. 9).

1.1.1. *Conglomerantes de la piedra*

Junto a estas construcciones en seco o a hueso, se utilizaron los primeros morteros conglomerantes de la piedra; los más primitivos y simples son las mezclas de *barro*, ricas en arcilla grasa que, al mezclarse con agua, se coloidizan y adquieren cohesión al secar. El resultado es un material muy estable, buen aislante, muy adherente a la madera y materiales vegetales y con la propiedad de que su dureza y cohesión aumentan con el tiempo. No es de extrañar que, dada la abundancia de este material y sus cualidades, se convirtiera en el más universal y que su uso se haya mantenido hasta la actualidad.

Dentro de los conglomerantes aéreos, además del ya citado barro, en Egipto se utilizaban los limos del Nilo como elemento de unión (Fig. 13), están los yesos y las cales grasas. El primero de ellos, el *yeso común*, es un conglomerante natural obtenido por deshidratación del *aljez* –roca sedimentaria–; los sillares de las pirámides están trabados con un mortero de yeso y cal. El segundo material, la *cal aérea*, utilizada por los griegos en morteros de cal y arena para sus construcciones, se obtiene por calcinación de *cal viva* o *cal apagada*, que se endurecen y resultan de un poder conglomerante extraordinario.

Los conglomerantes hidráulicos son aquellos que, además de endurecer en el aire como los anteriormente citados, lo hacen también en medios húmedos e incluso sumergidos en agua. En 1796 se obtuvieron los primeros *cementos naturales* que suponen la mezcla natural de arcilla y caliza, a comienzos del siglo XIX se producen los primeros *cementos artificiales* que terminan con los conglomerantes naturales utilizados a lo largo de toda la historia preindustrial.

1.1.2. *Mampostería y sillería*

Las primeras construcciones de piedra se ejecutan, *a hueso* o *en seco* o unidas con los conglomerantes descritos anteriormente. A estas piedras naturales, colocadas sin elaboración previa (Figs. 10 y 14), de forma irregular, de tamaño que permite su colocación a mano, se les conoce con el nombre de *mampuesto* (Fig. 61), dando lugar a las fábricas de mampostería. El mampuesto pequeño, utilizado para calzar aquellos de mayor tamaño, se llamó *ripio* (Fig. 15). Si se trabaja una cara del mampuesto, la que va a quedar vista, se denomina *mampostería careada* (Fig. 16), y si se trabajan de una forma sencilla las juntas para su mejor encaje, la fábrica resultante se conoce como *mampostería concertada*. El *sillar* es una pieza de piedra de grandes dimensiones,

tallada en todas sus caras y con, por lo menos, dos dimensiones mayores de 50 cm. La fábrica de sillería (Figs. 12, 17 y 18) no es otra cosa que la realizada con sillares. El *sillarejo* (Fig. 15) es una piedra intermedia, en todos los órdenes, entre el mampuesto y el sillar.

Si para la construcción de fábricas de mampostería basta la recopilación de los mampuestos y un conglomerante, para el resto de las piezas mayores es



Figura 9. *Piedras colocadas a hueso en Tiahuanaco (Cuzco, Perú).*



Figura 10. *Grandes piedras colocadas a hueso en un poblado megalítico (Malta).*



Figura 11. *Columnas de mármol de colores en la fachada de la Basílica de San Marcos (Venecia).*



Figura 12. *Conglomerante de barro en una construcción de perfecta sillería.*



Figura 13. *Conglomerante de limo en la pirámide escalonada de Zoser (Egipto).*



Figura 14. *Muro de piedras naturales colocadas sin elaboración previa.*



Figura 15. *Sillarejo con ripio de piedra.*



Figura 16. *Muro de mampostería careada de la torre del homenaje del castillo de Berlanga de Duero (Soria).*



Figura 17. *Muros románicos de sillería con marcas de los canteros.*



Figura 18. *Muro de sillería con inscripciones y marcas de cantero. Iglesia de Santa María del Azogue (Benavente, Zamora).*

necesario el desarrollo de técnicas de extracción de grandes bloques en canteras, que al principio se llevaba a cabo a *cielo abierto* y, para determinadas rocas, en trinchera o en mina. Una vez abierto el frente de cantera se efectua el arranque *a pecho* o de frente, introduciendo en grietas de las rocas cuñas de madera que, al mojarse y aumentar de volumen, hacían saltar los bloques, o *a tumbo*, con la excavación en la base de la roca de cavidades que provoca, por su propio peso, el desprendimiento de grandes masas de piedra. Las operaciones siguientes, realizadas en la propia cantera para ahorrar costes de transporte, son: *corte* o división en bloques, labor que se realizaba con cuñas introducidas por golpeo en pequeñas cajas o agujeros preparadas al efecto hasta conseguir el agrietamiento, y el *desbaste*, dar una primera forma a la piedra; para esta operación se utilizaba la *almadena,* la *escoda* y las *picas de desbaste*. Por último, la *talla*, servía para conseguir tanto la textura como la dimensión y la forma exigidas por la obra de arquitectura, se realizaba con el *puntero*, *el cincel*, la *gubia* o la *bujarda*.

1.2. *La construcción en barro*

La evolución de las primitivas chozas construidas con ramas y tierra ha llegado a producir un gran conjunto de construcciones de barro que se ha extendido por todo el mundo. De los materiales vegetales originales, el hombre creó, entretejiéndolos, estructuras rígidas que le permitieron cubrir los espacios de los alojamientos. Estas cubiertas vegetales ya no se apoyan en el suelo, sino que lo hacen sobre estructuras verticales, paredes formadas por entramados de postes de madera recubiertos de barro (Fig. 19). La forma de construcción es sencilla: se fija una empalizada de palos sobre el suelo y sobre ella, las vigas de soporte de la cubierta, que pueden apoyar o no en un mástil central. A continuación se coloca el material de cubierta, ramas, paja, heno, hojas de palma, brezo, bambú, etc., entretejidos sobre las vigas portantes. Por último, se macizan las paredes con barro y se enlucen con una mezcla de arcilla y agua para conseguir un muro impermeable.

Posteriormente, el barro se mezcla con paja, que lo arma consiguiendo una mayor cohesión y resistencia, o se mezcla con estiércol de caballo o de vaca, o con turba.

1.2.1. *Adobe y tapial*

De forma inmediata toda la estructura vertical de las construcciones se realizará con este material, que se prepara mediante mezclas de tierra, arcilla y arena con agua. Las formas más comunes son el adobe y el tapial. El *adobe* (Fig. 21)



Figura 19. *Palomar de tapial típico de Tierra de Campos (España).*



Figura 20. *Mezquita construida en tapial de Djenne (Mali).*



Figura 21. *Construcciones de viviendas de barro típicas de Yemen.*

puede considerarse como un ladrillo crudo oreado y secado al sol; la tierra, humedecida y adicionada de paja, acícula de pino o crines diversas que la aligeran y traban, es apisonada a mano en *gradillas* o *maseras*. El *tapial* (Fig. 20) es un conglomerado monolítico compuesto por tierras arenosas, arcilla y agua, construido sobre un zócalo estable y aislante, normalmente de piedra, empleando moldes o encofrados paralelos dentro de los cuales se apisona el barro por tongadas o capas.

La arquitectura construida de barro, adobe y tapial se extiende por todo el mundo a lo largo de la historia. Plinio habla de las excelencias de un tapial bien compactado, mientras que Vitrubio, en sus *Diez libros de arquitectura,* expone las técnicas de la construcción con adobe informándonos de que con este material están construidos palacios, templos, ciudades y murallas. Juan de Villanueva en el *Arte de Albañilería* (1827) escribe:

> *"...con la tierra arcillosa bien remojada y batida se forman dentro de unos marcos o gradillas unos cuerpos regulares llamados adobes, que sirven para construir paredes y tabiques á poca costa, ya sea uniéndolos con mezcla de cal y arena o con barro sólo, que es lo más común. Para hacer estos adobes, se debe buscar tierra muy pegajosa y grasosa, y se debe amasar muy bien, mezclándola con un poco de estiércol o paja para que tengan más unión..."*.

Concentraciones fantásticas de construcciones de barro se encuentran en el sur de Marruecos, en el Anti-Atlas, donde tribus bereberes levantaron conjuntos fortificados, las *Ksars,* a base de tapial sobre cimentación de piedra. El adobe es un material de construcción básico en toda Hispanoamérica y llega hasta California y Nuevo México; destacan los magníficos recintos amurallados prehispanos: ciudades íntegramente construidas de adobe incluidas en recintos protegidos por muros construidos en el mismo material, como Cajamarquilla, El Purgatorio, Pachacamac o Chan Chan en la costa del Perú. En España se extiende de casi uniformemente, aunque es en la meseta castellana, y concretamente en la *Tierra de Campos* (Fig. 19), donde se generaliza.

1.2.2. *Ladrillo*

El último paso en la evolución de los materiales de construcción procedentes del barro se produce por endurecimiento de mezclas arcillosas a través de su cocción, dando lugar a los materiales cerámicos, de una importancia fundamental en la historia de la construcción. Este hallazgo tiene un origen remoto; existen muestras ya desde el Neolítico. Mesopotamia, Asiria, Egipto o Grecia extienden por el mundo antiguo las técnicas de la fabricación de la cerámica. Las arcillas son rocas disgregadas con una gran variedad de minerales como el sílice, la caliza, óxidos de metales, etc. Esta heterogeneidad de componentes produce una gran variedad de composiciones químicas de la arci-



Figura 22. *Ábside de ladrillo de una iglesia medieval (Guadalajara).*



Figura 23. *Vivienda de ladrillo de principios del siglo XX (Benavente, Zamora).*



Figura 24. *Torre campanario construida en ladrillo sobre una iglesia románica (Almazán, Soria).*

lla y de sus propiedades; consecuentemente, los productos cerámicos resultantes de su cocción son muy variados.

En la fabricación de las piezas cerámicas primero se limpia la arcilla de restos vegetales, piedras, compuestos solubles y materia orgánica; luego, se humedece añadiéndole agua, mezclando y homogeneizando las tierras en *artesas* de poco fondo; los materiales de construcción, ladrillos (Fig. 64), tejas, baldosas etc., utilizan cajas sin fondo llamadas *gradillas*, dentro de las cuales se coloca la mezcla que se apisona y se enrasa; extraída la pieza cruda así conformada, se coloca en rejillas y se lleva al secadero, normalmente al aire libre; por último, el material ya seco se cuece en hornos. Naturalmente, el proceso descrito es el tradicional; en la actualidad existen desbastadoras y molturadoras, prensas llamadas *galleteras* para el moldeo y hornos de varios tipos.

De entre los materiales cerámicos descritos el *ladrillo* es el que más se ha utilizado en construcción y el que ha dado lugar, incluso, a un estilo arquitectónico tan singular como el *mudéjar*. El ladrillo, prisma de arcilla cocida que presenta una infinita variedad de colores y de formas, el más usual es el paralelepípedo recto, *macizo* o *hueco*; y el *aplantillado*, utilizado para arcos, bóvedas o piezas especiales con formas molduradas, curvilíneas, etc. Las características esenciales del ladrillo son su gran densidad, su resistencia, su aislamiento térmico y acústico, su durabilidad, su facilidad de manejo, su adaptabilidad a cualquier forma constructiva y su bajo coste de fabricación, que han hecho de él un material universal y fundamental en la historia de la construcción (Figs. 22, 23 y 24).

1.3. *El hormigón romano*

Los romanos descubrieron o inventaron, en el siglo III a.C. o tal vez antes, un moderno material, no natural sino fabricado, que revolucionó la forma de construir, alentó la innovación en otros materiales como el ladrillo y permitió el desarrollo de elementos constructivos como el arco y la bóveda hasta sus últimas consecuencias. Este material fue la argamasa romana, *opus caementicium* (Fig. 25), también denominado hormigón o cemento, aunque estrictamente no era ni cemento ni hormigón en el sentido actual de los términos. Se trataba de un material compuesto de mortero de cal cuya arena era volcánica y de elementos pétreos, *caementa*, que al fraguar adquiría una resistencia tal que podía utilizarse no sólo como relleno inerte, sino también como material de construcción por sí mismo. Las *caementa* podían constituirse con trozos de cualquier material disponible o estar cuidadosamente seleccionadas, como ocurre por ejemplo en el Panteón, donde hay una gradación cuidadosa de las *caementa* para ir reduciendo el peso de la bóveda, desde el basalto volcánico de las zarpas, hasta la piedra pómez de la clave de la cúpula.



Figura 25. *Boveda de cañón del frigidarium de las termas de Pompeya, construida con* opus caementicium.



Figura 26. *Opus incertum y Opus reticulatum. Templo de Jupiter Anxur (Terracina, Italia).*

Como revestimiento del núcleo interno de hormigón, *opus caementicium*, en un primer momento se utilizaron grandes bloques de piedra, creando un muro falso de *opus quadratum*, pero posteriormente, buscando soluciones más ligeras, se utilizaron piezas irregulares o mampostería de sillarejo (*opus incertum*), mampostería de ladrillo (*opus testaceum* o *lateritium*), y mampostería regular reticulada (*opus reticulatum*) (Fig. 26), formada por bloques de piedra con forma piramidal cuya punta se hundía en la argamasa; cuando el *opus reticulatum* se combinaba con ladrillo se denominaba *opus mixtum*.

Esta argamasa tomó forma casi por casualidad en los obradores de los albañiles, quienes lo emplearon como sustituto barato y eficaz de la piedra. Entre otras cosas, hallaron que servía para reemplazar los costosos techos planos de madera por sencillas bóvedas. En un principio, ya como material constructivo y no como simple relleno, la argamasa romana se aplicó a los edificios de carácter utilitario o a las nuevas tipologías –teatros, termas, anfiteatros (Figs. 98 y 100)– de las que no había precedentes anteriores, así como a obras de ingeniería como puentes o acueductos; posteriormente se aplicó a todo tipo de edificios.

1.4. *La construcción en madera*

Uno de los materiales más primitivos y fundamentales en el mundo de la construcción es la madera, debido a sus excelentes cualidades, su facilidad de transformación o de talla, su resistencia y sus propiedades aislantes térmicas y acústicas, aparte de su belleza y de que es uno de los pocos materiales naturales que pueden trabajar a flexión y, por lo tanto, básico para las estructuras horizontales tradicionales. La condición de dureza es determinante, maderas muy duras son: el boj, la encina y el roble; duras, el ébano, el haya y el olivo; medias: la acacia, alerce, aliso, caoba, castaño, cedro, cerezo, fresno, nogal, olmo, peral y pino; y blandas: el abedul, el abeto, el avellano, el ciprés, el pino o el chopo, entre otras.

Además, para su empleo en construcción deben tenerse en cuenta otros factores: es un material higroscópico, es decir, propenso a absorber y ceder humedad y, como consecuencia, a sufrir deformaciones morfológicas y volumétricas. Es un material muy poco sensible a las variaciones térmicas, con unos coeficientes de dilatación muy pequeños; además es un excelente aislante térmico debido a su estructura celular con burbujas de aire. Es un material orgánico, por tanto su durabilidad depende de su conservación en ambientes homogéneos y de su resistencia a los ataques de hongos, insectos, crustáceos y moluscos. No obstante, hay especies muy longevas como el alerce, el cedro, el ciprés o el enebro por ser sus resinas larvicidas, o la encina, el roble y la teka, cuya abundancia de tanino favorece su conservación.



Figura 27. *Cubierta adintelada de vigas y tabla de la mezquita de Kiva (Uzbequistan).*



Figura 28. *Armadura popular de doble pendolón (El Espinar, Guadalajara).*

En conjunto, la madera representa uno de los materiales más formidables utilizados en la construcción; gracias a ella ha sido posible la ejecución de la mayoría de los edificios clásicos que conocemos utilizada: como elemento provisional destinado a posibilitar la construcción con otros materiales (andamios, apeos y cimbras o encofrados para la ejecución de bóvedas y arcos); como estructura horizontal (Fig. 31) (vigas de forjados); como estructura de cubiertas (Fig. 30) (correas y cabios sobre cerchas o formas compuestas por pares y tirantes unidos por péndolas y tornapuntas); como zuncho o atado de muros; conformando propiamente la estructura (Fig. 131) (pilares, zapatas y vigas); conformando elementos tan importantes como los vuelos, aleros, balcones, cargaderos, jabalcones, etc., o formando parte de los muros portantes o de carga (entramado de madera con los huecos rellenos de barro, adobe, ladrillo o mampostería). En resumen, la madera ha posibilitado la construcción de la mayoría de las tipologías constructivas existentes.

Las construcciones en madera más primitivas eran simplemente de troncos adosados inclinados, unidos en la parte superior y apoyados en el suelo sobre grandes piedras, formando una edificación sin paredes verticales cubierta a dos aguas, o colocando troncos horizontales, entrelazados a *caja y espiga* en las esquinas, que formaban las paredes sobre las que se apoyaba una estructura más ligera de vigas inclinadas para la formación del tejado.

Con el tiempo, el desarrollo de las técnicas de construcción posibilitó levantar una estructura vertical compuesta de pies derechos de madera sobre los que apoyaban vigas horizontales; sobre esta estructura principal se montaba la cubierta a base de pares inclinados recogidos en la parte superior por una madera que hacía de cumbrera, solución que se conoce como de *parhilera*. No obstante, las construcciones con troncos perduraron y ya en tiempos modernos estas técnicas se trasladan desde Europa al recién descubierto continente americano.

La aparición de los metales aumentó sus posibilidades al facilitar su labra y sus ensamblajes. Es en Grecia donde aparece la *carpintería de armar* y las primeras herramientas especializadas, que permite el tratamiento y ensamblaje de las piezas necesarias para la estructura sustentante del edificio: los entramados de vigas y pilares verticales, los entramados horizontales o forjados y, sobre todo, las formas estructurales de cubierta que permiten salvar distancias considerables entre apoyos sin necesidad de utilizar escuadrías importantes de madera. En orden de complejidad, la más elemental es la cubierta a *la molinera* (Fig. 31), utilizada para pequeñas luces, y que se forma con palos o correas, en dirección perpendicular a la pendiente, apoyadas en muros piñones sobre una pieza continuada de madera o *durmiente*. Como paso siguiente, se puede considerar la cubierta de *par y picadero* (Fig. 28), que consiste en que la cumbrera es el elemento de apoyo; la cumbrera o picadero es una viga de madera apoyada en sus extremos y sobre la que descansan las vigas inclinadas o pares. En la cubierta de *par e hilera parhilera* se da el caso



Figura 29. *Detalle. Ensamblaje de vigas.*



Figura 30. *Tradicional armadura de par y nudillo.*



Figura 31. *Simples estructuras de vigas de madera permiten la elevación de un segundo piso y la cubierta (Fuentelencina, Guadalajara).*

contrario; ahora es la cumbrera o hilera la que está soportada por los pares inclinados que se unen a ella a *tope o a espera*; los empujes horizontales de estos pares deben absorberlos los muros portantes o tirantes horizontales anclados en la cabeza del muro.

El paso siguiente son las *cerchas o cuchillos* (Fig. 97), elemento estructural completo formado por dos piezas inclinadas, los pares, y otra horizontal, el tirante, que completa la triangulación del conjunto y garantiza su indeformabilidad. Cuando las luces que es necesario salvar aumentan, se pasa a formas más complejas, como es el cuchillo de *par y pendolón* (Fig. 28), compuesto por los pares, el tirante y una pieza vertical que se une a espera en la confluencia de los pares y el tirante, mediante el *cuchillero o estribo*. Versión para luces mayores es el conocido como *cuchillo a la española* o, en América, *montante maestro*, cercha de par y pendolón complementada con piezas inclinadas o *tornapuntas*. En todos estos tipos la estructura se completa con correas sobre los pares y, sobre éstas, la tabla, *lata, ripia o chilla* como apoyo de la cobertura de barro, teja, piedra, pizarra, etc.

Las construcciones griegas adoptan y desarrollan en su plenitud este tipo de estructura de cuchillos de armadura vertical. La cubierta es, por lo general, vista desde el interior; está, pues, ventilada y expuesta a incendios. La cobertura es de piezas cerámicas o de piedra y se completa por cornisas decoradas.



Figura 32. *Iglesia construida enteramente en madera conocida como Pogost de Kizhi (Rusia).*



Figura 33. *Detalle del ensamblaje chino conocido como dougong.*

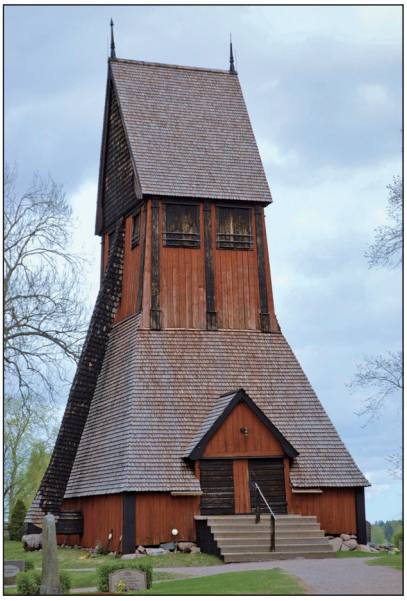


Figura 34. *Campanario tradicional en madera, Iglesia de Upsala (Suecia).*



Figura 35. *Cubierta medieval de madera, de estructura compleja, en el comedor de la universidad de Oxford (Inglaterra).*

Los espacios triangulares de fachada que proporcionan los cuchillos van a dar lugar a los frontones clásicos, y las puntas de las vigas y tirantes horizontales inicialmente vistas en fachada y talladas, a imitaciones en piedra que conformarán las series de triglifos y metopas.

En Roma hubo soluciones más complejas de estas estructuras de madera, al incorporar las correas y al utilizar el bronce como material en los tirantes. Para cubrir menores luces, se utilizan vigas inclinadas, sin tirantes, apuntaladas por tornapuntas sobre los muros de carga. Los forjados planos se realizaran sobre viguería de madera, a veces dos planos de vigas cruzadas, sobre los que se clavaba un tablero de madera de roble y, sobre él, elementos vegetales y barro, morteros con piedra, fragmentos de tejas mezcladas con cal y, finalmente, el pavimento cerámico o de piedra.

Las características fundamentales de estas soluciones constructivas clásicas definen todas las tipologías que después se mantendrán en la historia de la construcción.

En la Edad Media se producen menos variantes de las estructuras de madera; el problema más importante lo constituye el tipo de uniones, sin clavos, en general resueltos con los clásicos sistemas de *media madera, cola de milano* y *cajas* y *espigas*, soluciones constructivas en las que el carpintero medieval llega a una gran perfección. No existían cerchas trianguladas, como en las construcciones clásicas. Las grandes estructuras descansan sus elementos sobre manguetas y piezas en voladizo que les permiten ir construyendo una estructura escalonada, reforzada por tornapuntas verticales e inclinados y por arcos también de madera (Fig. 35). La inclusión de estos refuerzos en arco se debía a la intención de conseguir soluciones abovedadas, complejas y de una riqueza visual extraordinaria, con que cubrir los espacios.

La técnica de las construcciones con troncos, aprendida por los constructores noruegos en el este de Europa, se aplicó ya en el siglo XI en las extraordinarias iglesias de madera de las que todavía hoy podemos admirar algunos ejemplos. Tienen estructura de troncos completados con entramados verticales, se cubren y se decoran con madera, consiguiendo unos efectos asombrosos. Asombrosas son también las construcciones que nos han quedado en el norte de Rusia, casas, graneros o iglesias.

Por su parte, las formas características de la arquitectura china provienen de las estructuras de madera. Aunque igualmente se utiliza como material constructivo la piedra, el ladrillo y los materiales cerámicos, es la estructura de madera la dominante. Sigue un método constructivo denominado *dougong* (Figs. 33 y 34), que consiste en el ensamblaje de piezas de este material, que dan como resultado techumbres con forma de pirámide invertida apoyadas en pilares, con aleros muy pronunciados donde las puntas se elevan hacía el cielo. Estas techumbres se cubrían con teja cerámica que en ocasiones se pintaba con colores simbólicos alusivos a la función del edificio.



Figura 36. *Típicas casas construidas con la técnica del entramado (Stratford, Inglaterra).*



Figura 37. *Entramado con relleno de ladrillo (Berlanga de Duero, Soria).*

1.4.1. *El entramado*

El uso del entramado supuso una gran evolución técnica. El conjunto de pilares verticales, en varias plantas, combinados con vigas horizontales, pares de cubierta inclinadas y, todo ello, arriostrado por elementos horizontales e inclinados, rectos o con formas, constituyeron unas estructuras espaciales estables que permitían una gran diversidad formal, unido a la gran variedad de los materiales utilizados tanto en el relleno de los espacios entre maderas en las fachadas (barro, adobe, ladrillo o entablados), como en los materiales de cubrición (madera, piedra, pizarra o elementos vegetales como turba o brezo). Estas construcciones, que todavía hoy, restauradas, pueden admirarse, conformaron el paisaje europeo hasta los tiempos modernos. Ejemplos de casas y de construcciones agrícolas de entramados de madera se utilizan todavía en todo el norte de Europa; podemos encontrar magníficos ejemplos diseminados por Inglaterra, o aquí en España, zonas como la Alcarria o núcleos de la meseta castellana (Figs. 36 y 37), constituyen conjuntos de gran valor con esta técnica constructiva.

2. La construcción preindustrial

Las técnicas constructivas desarrolladas a partir de estos materiales tradicionales darán lugar a los estilos históricos preindustriales. La utilización de forma intuitiva, según las características de trabajo de cada uno de estos materiales con el objeto de conseguir los espacios internos necesarios como habitación, como relación o como producción, condicionará los sistemas constructivos de estas arquitecturas que se pueden dividir en dos grandes grupos: los sistemas estáticos basados en piezas rectas de gran formato, *dinteles y arquitrabes,* trabajando a flexión con grandes limitaciones por su propia composición y apoyados en estructuras masivas de muros y pilares, o los sistemas dinámicos que transforman los esfuerzos a flexión de las piezas, a través del diseño en *arco, bóveda* o *cúpula,* en esfuerzos a compresión que se transmiten hasta las estructuras portantes a través de componentes verticales que absorben muros o pilares y esfuerzos horizontales que se recogen por medio de contrafuertes de distinto diseño. Es decir, la arquitectura adintelada y la abovedada.

La construcción arquitrabada o la abovedada conforma un elemento esencial de la arquitectura: el espacio interior, el vacío que queda envuelto y definido por ella. Al ordenarse los elementos formales, espacio y masa, mediante la composición, se crea un dominio enteramente humano y finito dentro del ambiente infinito de la naturaleza. En este sentido, podemos definir el espacio en arquitectura como la ausencia de masa; los elementos de un edificio, el suelo, las paredes, el techo, todo es tangible, concreto y definido, mientras que el espacio, es el vacío.

2.1. *La arquitectura adintelada*

Las primeras arquitecturas, producidas en el Egipto faraónico (Fig. 38), en la Grecia clásica (Fig. 39), en Persia e India antes de la conquista musulmana, o en gran parte de la América precolombina, se realizan fundamentalmente con el sistema adintelado o arquitrabado. Es una arquitectura cerrada y sólida, una arquitectura de volúmenes dominada por la masa y no por el espacio.

Los primeros ejemplos de arquitectura adintelada los hallamos en las colosales formaciones megalíticas, durante el tercer milenio antes de Cristo, construidos en España, Inglaterra, Malta o Dinamarca. Menhires, dólmenes y alineaciones, se construyen testificando ideas religiosas comunes. Es en Stonehenge, en Inglaterra, donde encontramos el conjunto más singular; se trata de enormes piedras verticales coronadas por inmensos dinteles cuidadosamente ensamblados. La arquitectura religiosa o funeraria egipcia utiliza este mismo sistema: inmensas salas hipóstilas, bosques de enormes columnas



Figura 38. *Arquitectura adintelada egipcia. Templo de la Gran Fiesta del complejo de Karnak (Egipto).*

macizan el espacio, encerrado entre masivos muros e inmensos bloques de piedra, como dinteles (Fig. 138).

Los mesopotámicos construían templos con muros exteriores de ladrillo y tejados planos sobre vigas o dinteles de madera. Cuando los edificios dejan de ser estructuras masivas, no por ello dejan de ser sólidas y cerradas, carentes de un espacio interior definido; en este sentido, las mezquitas musulmanas (Figs. 27 y 85) o los palacios persas, se caracterizan por el desarrollo de una compacta arquitectura adintelada, en la que el muro y un bosque de columnas de piedra –salas hipóstilas cubiertas por viguería plana de madera y fachadas adinteladas– dominan sobre el espacio vacío.

En la arquitectura griega el espacio interior se va a resolver como una gran sala rectangular con un techo plano sostenido por líneas de columnas regularmente dispuestas (Figs. 90 y 91); su gran preocupación es conseguir la organización racional y armoniosa del cerramiento. Aunque no llevaron a cabo una arquitectura masiva, ésta siguió siendo una arquitectura que trabaja a compresión y que obvia el problema del espacio interior. Magníficas columnatas de los distintos órdenes, *dórico, jónico* o *corintio*, superpuestas perimetralmente a los reducidos espacios interiores conforman las fachadas y sustentan grandes dinteles de piedra bajo otros decorados, *triglifos y metopas,* y sobre ellos, cornisas o frontones esculpidos.



Figura 39. *Templo dórico de Paestum (Italia).*

2.2. *La arquitectura abovedada*

Pero es durante el Imperio Romano cuando llegan a unos niveles sorprendentes las nuevas fórmulas para cubrir los espacios. Novedosas soluciones basadas en el arco, la bóveda y la cúpula, nos hacen olvidar las limitaciones de las estructuras horizontales de madera o de piedra hasta entonces utilizadas, y hacen posible la construcción de edificios de proporciones colosales. Los romanos crean espacios interiores diáfanos, cada vez más grandiosos, liberados de los gruesos paramentos por la apertura de grandes vanos de iluminación y cubiertos con superficies cóncavas situadas a gran altura, bóvedas y cúpulas, se convierten en amplios volúmenes centrados y vacíos, cuyo punto focal se encuentra en el interior de la misma estructura, y no en el exterior (Figs. 25, 98 y 100).

Asimismo, universalizan la construcción con sillares, ladrillo u hormigones a base de morteros. En las cúpulas alcanzan una increíble destreza; sirva como ejemplo el Panteón en Roma (Fig. 135), construido en tiempos del emperador Adriano, con un diámetro de 43,50 metros y la misma altura. Se trata de un gran recinto circular con gruesos muros de ladrillo diseñados para soportar los empujes horizontales, sobre el que se levanta la inmensa cúpula construida por vuelos sucesivos de placas de hormigones aligerados con árido de piedra pómez. Por otra parte, la construcción de bóvedas paralelas permite la elevación de varias plantas sobre arquerías con un reparto de esfuerzos en pirámide, como sucede en el Coliseo de Roma o, el caso más significativo, la basílica de Constantino, también en Roma, que consta de una gran nave central cubierta por bóveda semicircular y naves laterales con bóvedas perpendiculares a la principal para absorber los empujes horizontales, lo que permite que la gran bóveda central sólo necesite como apoyos verticales unas columnas adosadas a reducidas pilastras para consiguir un espacio abierto y despejado. Principio constructivo que se recoge en toda la arquitectura medieval.

Por último, el desarrollo del arco o de los conjuntos de arcos, la arquería, posibilita equilibrar los empujes horizontales reduciendo los esfuerzos a verticales en las fachadas o en los espacios interiores, casi libres de estructura vertical, con enormes superficies donde el hueco o el vacío domina al paramento macizo. Espacios interiores de gran diafanidad y fachadas ciertamente ligeras. Además permiten salvar grandes luces con unas estructuras conformadas por elementos portantes de secciones reducidas, como sucede en los acueductos, estructuras caladas construidas con varios pisos de arcadas para salvar desniveles que posibilitan el transporte del agua, como sucede en el de Nimes, en Francia, o el excepcional acueducto de Segovia, en España, ligerísima estructura de sillares formando dos series de arcos superpuestas.

Los romanos, con el avance de las técnicas de la construcción de arcos, bóvedas y cúpulas en las que fueron maestros, abrieron nuevas posibilidades



Figura 40. *Cubierta de bóveda de arista de gruesos nervios del scriptorio del monasterio de Fontenay (Francia).*



Figura 41. *Interior de la catedral gótica de Laón (Francia).*

espaciales y constructivas que permitieron la evolución de la arquitectura y la construcción durante la Edad Media.

En el período románico se universaliza la sustitución de las armaduras de madera por bóvedas corridas, semicirculares o de *medio cañón* sobre las naves, y por la adopción del arco semicircular o de *medio punto* para la realización de las arquerías y huecos en las fachadas. La construcción románica se caracteriza, fundamentalmente, por el uso masivo de elementos que trabajan a compresión. La utilización de bóvedas para salvar los espacios interiores, construidas con piedras ligeras por ejemplo tobas, que apoyan sobre anchos muros de sillería o de mamposterías con remates de sillar en las zonas más nobles, dará como resultado unos ejemplares constructivos de gran robustez, además de los espacios interiores, recogidos y aislados, que definen su arquitectura.

El estilo gótico no hace sino utilizar y desarrollar todas las soluciones ensayadas anteriormente. La estructura de esta arquitectura se basa en la concentración de los esfuerzos de las cubiertas en puntos concretos, al contrario de como se hacía en el románico, en que el peso de los abovedamientos se repartía a lo largo de los muros portantes. Este tipo de solución estructural se consigue con las *bóvedas nervadas* que permiten liberar los muros y que se horaden con grandes ventanales (Figs. 41, 101 y 102).

Con el Renacimiento se redescubre la esencia de la arquitectura romana, al estudiar los restos construidos y las reglas contenidas en el tratado de Vitrubio. El Renacimiento enfatizó las ideas modulares, las ideas de proporción y de simetría y resucitó los órdenes clásicos, bases todas ellas de sus sistemas constructivos, teorizadas por Alberti, Serlio, Vignola o Palladio (Figs. 122 y 123). Sus métodos constructivos nos retraen a lo comentado sobre el mundo clásico. Arquitecturas horizontales, centradas y simétricas, se resuelven con sistemas constructivos arquitrabados o adintelados, con superposición de arquerías de los distintos órdenes y con cubriciones planas de madera. Las cúpulas se siguen utilizando ahora para cubrir los lugares centrales de las plantas o los cruceros de las iglesias. En Santa María de las Flores, construida en Florencia entre los años 1417 y 1446, Brunelleschi diseña una inmensa cúpula de 43 metros de diámetro y 115 metros de altura, con sección elíptica y resuelta con dos láminas estructurales paralelas (Fig. 110).

El Barroco, desde el punto de vista constructivo, utiliza los mismos elementos y el lenguaje básico descrito para las épocas renacentista y clásica antigua. El desarrollo de la decoración llevó a límites increíbles las técnicas del tratamiento de los yesos, los estucos, las pinturas, la azulejería o los trabajos de labra de la piedra y de las sillerías. A parte son estos sistemas constructivos, muros de carga, arquerías o sucesiones de pilares, resueltos con lenguajes clásicos, que soportan techos planos de madera o cúpulas, los que perviven hasta la aparición de los modernos materiales de construcción, el acero y los hormigones, ya en la época de la arquitectura moderna.

3. Nuevos materiales y renovación arquitectónica

En arquitectura, los efectos de la revolución industrial se dejan sentir en dos aspectos, por una parte la utilización de nuevos materiales de construcción como el hierro fundido o más tarde el hormigón, y por otra el desarrollo de nuevas edificaciones que pretenden dar salida a las nuevas necesidades de una población cada vez más numerosa y que requería un mayor número de servicios. La aparición de nuevas tipologías de edificios como fábricas, estaciones de ferrocarril, bibliotecas públicas, museos, etc., o la evolución de antiguas tipologías, como escuelas, hospitales, cárceles, manicomios, mercados, galerías comerciales, pasajes etc. marcan una importante evolución.

No es hasta el siglo XIX, con la aparición de los altos hornos, cuando se produce un desarrollo total de un material básico en la renovación, el *hierro fundido*; la aparición de la fundición y los aceros ha hecho posible el cambio radical en el diseño de las estructuras portantes de los edificios, al posibilitar el salvar grandes vanos con piezas rectas, hecho que ha permitido el desarrollo del racionalismo constructivo y, por tanto, de la arquitectura moderna. Pero es el descubrimiento y desarrollo de los cementos artificiales, unido al de los aceros, lo que impulsa definitivamente la modernización de las técnicas históricas de la construcción. Ya no existen limitaciones en el diseño de estructuras. Tanto en el sentido vertical como en el horizontal, es posible salvar grandes vanos con luces rectas, con lo que se consigue unos espacios interiores de grandes dimensiones, libres de estructura, con unos procedimientos técnicos de gran simplicidad y con unos montajes, en comparación con las complejas bóvedas utilizadas para cubrir estos espacios en los edificios antiguos, de una rapidez extraordinaria.

3.1. *El hierro*

En el siglo XVIII aparece el *hierro fundido*, aunque el hierro no es un material nuevo, se conocía desde la prehistoria y su uso por el hombre había supuesto uno de los grandes avances de este período. Sin embargo, apenas se había utilizado en la arquitectura; en la antigüedad, tanto griegos como romanos aplicaron con una mayor frecuencia a la arquitectura el bronce por su mayor resistencia a los cambios atmosféricos, aunque únicamente como elemento de trabazón. Esta función se mantendrá en épocas medievales e incluso en el propio renacimiento, donde un teórico como Leon Battista Alberti, recomendaba en su tratado el uso de materiales que se apliquen en su estado natural, como la piedra, frente a materiales como el barro que tienen que estar preparados por el hombre. Miguel Ángel utilizó zunchos de hierro para ensamblar la gran cúpula de San Pedro del Vaticano (Fig. 111) pero, pese a su novedad, estos elementos metálicos sólo se pueden considerar como de trabazón, no conformadores de la estructura del edificio.



Figura 42. *Estructura de cerchas de hierro fundido con construcción en piedra. Museo de Ciencias de Londres (Inglaterra).*



Figura 43. *Estructura interior de hierro y cristal del mercado de Covent Garden de Londres (1830-1833) (Inglaterra).*



Figura 44. *Cubierta exterior de hierro fundido y cristal del* Hall Central *de París (Francia).*

El hecho de que el hierro, durante tantos siglos, apenas esté presente en la construcción se debe a dos cuestiones fundamentales: en primer lugar, se podía extraer en pequeñas cantidades, cualquier intento de construir con él hubiera resultado tremendamente costoso; en segundo lugar, su preparación le hacía poco resistente a los cambios atmosféricos frente a materiales como la piedra. Por tanto, no es hasta que el hierro adquiere una producción industrializada cuando toma una importancia, casi revolucionaria, dentro de los materiales de construcción. Este momento se produce en Inglaterra con el desarrollo de la revolución industrial. El progreso tecnológico consiguió dar al traste con procesos y sistemas que habían sido válidos a lo largo de los siglos y que en pocos años se manifestaron totalmente obsoletos.

El primer efecto de la industrialización sobre la construcción fue la extensión del uso del ladrillo. Pero realmente fue el hierro el que provocó una auténtica revolución y el que trajo nuevas formas constructivas y nuevas tipologías arquitectónicas. Los beneficios de esta construcción eran grandes y rápidamente se manifestaron como satisfactorios. Por una parte, el hierro aplicado a las estructuras de los edificios resultaba un material relativamente económico, más resistente al fuego que la madera y permitía una construcción rápida.

Las primeras estructuras metálicas complejas en los edificios comienzan a montarse a mediados del siglo XIX. El hierro se entiende como un material que puede sustituir a otros más débiles como la madera; así tras el incendio de las cubiertas del teatro *Francés* de París, Víctor Louis, en 1786, realiza una estructura de hierro fundido sobre la que asentar la nueva cubierta. Las cualidades del material y su gran resistencia determinaron que rápidamente fuera utilizado para las estructuras de cubiertas de edificios públicos como teatros o grandes almacenes. En 1818 se aplicará a una construcción real y por tanto altamente representativa, el *Royal Pavilion* de Brighton; allí el arquitecto John Nash proyecta, con un amplio derroche de imaginación y conocimiento técnico, una creación fantástica de estilo indio rematada con una cúpula en forma de bulbo en la sección central, sostenida por una estructura de columnas de hierro. Entre 1840 y 1857 se realizan estructuras tan brillantes como las de el *Hall Central* de París (Fig. 44), o el *Palacio de Cristal* de Paxton (Fig. 125) en la exposición de Londres de 1851, ambos construidos con hierro y cristal. El *Palacio de Cristal* marca un hito en la arquitectura moderna; con él se establece una nueva relación entre los medios técnicos y las finalidades representativas y expresivas del edificio. El *Palacio de Cristal* crea un nuevo espacio arquitectónico, rompiendo con la opacidad que había sido propia de toda la arquitectura durante siglos; los muros opacos, sólo translúcidos en el arte gótico de las catedrales se hacen ahora transparentes, desarrollando una permeabilidad entre interior y exterior, y terminando con la clásica ruptura entre ambos espacios propia de la arquitectura anterior.

Posteriormente, las bibliotecas Nacional y la de Sainte-Genevieve (Fig. 136), la cúpula del auditorio de la Ópera de París formada por cerchas de hierro,



Figura 45. *Palacio de cristal de El Retiro (Velázquez Bosco, Madrid).*



Figura 46. *Pirámide del museo del Louvre (París).*

construida por Garnier entre 1862 y 1875; el extraordinario museo de la Universidad de Oxford de Deane y Woodward, y las estaciones de Saint Pancras en Londres o de Atocha en Madrid, estructuras que más tarde alcanzarán su máximo nivel técnico con la torre Eiffel construida para la exposición universal de París en 1889. Ejemplos incuestionables de la nueva construcción y de las inmensas posibilidades del diseño de la arquitectura con hierro en los comienzos de la era industrial.

3.2. *El vidrio y el cristal*

El vidrio es una sustancia mineral que se obtiene por la fusión a altas temperaturas de una mezcla de arena y carbonato sódico o potásico. Desde el siglo XV se llamó cristal al producto más transparente y puro de la industria vidriera (ver Vidrio). Desde su descubrimiento, en la construcción arquitectónica hasta el siglo XIX solo se ha utilizado como cerramiento de los vanos.

Las diferentes mejoras técnicas acaecidas en su fabricación han permitido, en arquitectura, una clara evolución: el aumento del vano sobre el macizo, es decir, mayor proporción de la superficie de ventanas en relación con el muro hasta llegar a la construcción con muros de cristal.

El siglo XIII, pese a su limitación técnica, el uso de vidrieras permitió en la época gótica desarrollar una nueva arquitectura y un novedoso sistema constructivo en el que los elementos arquitectónicos están ordenados para permitir la apertura de grandes vanos cubiertos de vidrieras coloreadas, siendo la luz el elemento compositivo y simbólico fundamental.

En el siglo XVII se desarrolló una nueva técnica en la elaboración del vidrio que pudo incrementar el tamaño de las piezas y controlar el grosor que se hizo uniforme. Su uso en arquitectura fue decisivo ya que posibilitó el desarrollo de los huecos en las fachadas y la mejora, tanto en edificios singulares como en la arquitectura doméstica, de los sistemas de aireación, aislamiento y luminosidad de interiores.

En el siglo XIX, los procesos industriales de fabricación aumentan su calidad, su transparencia y sus dimensiones. En su aplicación constructiva van a ser decisivas las creaciones de Paxton y Turner, y sus invernaderos de cristal que permiten, por una parte, el desarrollo de este concepto *invernadero*, un lugar acotado donde se produce un control climático y de iluminación ideal para el crecimiento de las plantas, un ambiente natural artificialmente construido. Mientras que por otra, ratifica y refuerza las ideas higienistas que dominan la arquitectura del momento, higiene se asocia a luminosidad y ventilación; como las de confort, control de la temperatura, de la iluminación y de los ruidos.

La sistemática construcción de pabellones de cristal en las diferentes Exposiciones Universales o el desarrollo de los rascacielos, permitió afianzar la téc-

nica, mientra que las tesis de Paul Scheerbart esgrimidas en *Arquitectura de cristal* (Colonia, 1914), establecen las bases teóricas de lo que sería un nuevo lenguaje en la arquitectura contemporánea. El cristal juega un papel decisivo, hasta convertirse en uno de los materiales más usados para el cerramiento de paramentos, ahora *muros-cortina*, es decir superficies traslúcidas, transparentes y aislantes que se apoyan sobre estructuras de hierro y hormigón armado (Fig. 47).



Figura 47. *Muro de cristal, edificio de la City de Londres (Inglaterra).*



Figura 48. *Cubierta de acero y cristal del Britis Museum de Londres (Inglaterra).*



Figura 49. *Cubierta de hierro y cristal del museo de Orsay, antigua estación de París (Francia).*

El uso del cristal ha cambiado el concepto de espacio arquitectónico, donde los problemas visuales y las relaciones exterior-interior a través de muros transparentes dominan la composición, al tiempo que la sensación de amplitud impacta notablemente sobre el concepto de confort espacial.

3.3. *El acero*

Los avances tecnológicos continúan de forma ininterrumpida; el hierro fundido conoce a partir de mediados de siglo un creciente desarrollo, pero la evolución tecnológica continua imparable y a finales del siglo XIX se produce un hecho trascendental, el acero, un producto muy elástico y muy resistente, puede ser fabricado en cantidad y calidad importante para ser utilizado en la construcción, y se convierte en un material imprescindible. Esas cualidades tan superiores a las del hierro fundido hicieron que éste rápidamente fuera desapareciendo. Finalmente aparecerá el hormigón moderno, descubierto en 1849 por Monnier, aunque sin aplicación en arquitectura hasta 1883; más tarde se generalizaría la utilización de los hormigones pretensado y postensado. Con estos nuevos materiales se abre una nueva forma de construir y de entender la arquitectura que se desarrolla a partir de 1890 a lo largo del siglo XX.

Ya no existen limitaciones en el diseño de estructuras, tanto en el sentido vertical como en el horizontal, pudiéndose alcanzar en los edificios alturas insospechadas hasta el siglo XIX, y es posible salvar grandes vanos con luces rectas, con lo que se consigue unos espacios interiores de grandes dimensiones, libres de estructura (Fig. 48), con unos procedimientos técnicos de gran simplicidad y con unos montajes, en comparación con las complejas bóvedas utilizadas para salvar estos espacios en los edificios antiguos, de una rapidez extraordinaria.

El excelente comportamiento de los aceros a todo tipo de tensiones no es la única característica que ha universalizado su uso; a ésto se une la amplia gama de perfiles que existen y que propician todas las combinaciones estructurales imaginables, además de las técnicas de unión entre los distintos elementos que se han desarrollado continuamente (Figs. 45 y 46).

3.4. *El hormigón*

Ya se ha mencionado la utilización en la construcción antigua de conglomerantes basados en las cales, de conglomerantes hidráulicos y de cementos naturales obtenidos por calcinación de margas. Pero es el descubrimiento y desarrollo de los cementos artificiales, unido al de los aceros, el hecho que impulsará la modernización de las técnicas históricas de la construcción.

Cemento artificial es el obtenido por calcinación hasta el punto de fusión de mezclas estrictamente dosificadas y controladas de caliza y arcilla con producción del *clinker*, compuesto vitrificado de silicatos, aluminatos, ferritos, cal, magnesia, etc. Estos cementos conservan el nombre de Portland, el lugar donde en 1824 fueron preparados por primera vez. El tiempo de fraguado de estos cementos, es decir, el endurecimiento del mortero resultante al mezclarlo con agua, varía entre 1 y 12 horas; los usos principales de los cementos Portland son la consecución de morteros, pastas o la fabricación de los hormigones en masa o armados, entendiendo por *pasta* la mezcla del cemento con agua, *mortero* la mezcla con arena y agua, y *hormigón* la mezcla de cemento con áridos, grava, arena, y agua. Para la preparación de estos conglomerantes es necesaria una correcta dosificación de cada uno de los componentes ya que sus distintas proporciones producen resultados muy distintos en sus propiedades.

Los morteros y las pastas de cemento artificiales han sustituído a los conglomerantes históricos que hemos mencionado. Pero es el hormigón el compuesto que ha hecho posible el desarrollo sin límites de la construcción.

El comportamiento del hormigón después de su fraguado es similar al de las piedras naturales. Dentro de los hormigones se distinguen dos grandes grupos: los *hormigones en masa* y los *hormigones armados*. Los primeros reúnen los componentes usuales del hormigón, cemento, áridos y agua, y se conocen con el nombre de *normales* cuando el árido tiene una granulometría continua, *ciclópeos* cuando, además, se le mezcla con mampuestos de gran tamaño, y *aligerados,* cuando se obtienen con áridos como la piedra pómez, arcillas cocidas, escorias, compuestos plásticos, o con la inclusión en la masa de burbujas de aire, dando hormigones *celulares* de bajísima densidad. La segunda característica es su docilidad a adaptarse a moldes y tomar cualquier forma que el diseño arquitectónico pueda requerir.

A partir de estos hormigones, se obtienen los *hormigones armados* o estructurales formados por la inclusión de armaduras metálicas de aceros. Este nuevo material, que se diseña partiendo de la base de la adherencia entre el acero y el hormigón, consigue que las secciones de hormigón, que por moldeo adquieren cualquier forma requerida, trabajen a compresión y las de acero a tracción, dando como resultado unas piezas de una gran resistencia, lo que lo convierte en un material universalmente utilizado tanto para elementos verticales, pilares, como horizontales, vigas, conformando estructuras completas de una infinita variedad formal y de una gran estabilidad.

El descubrimiento del hormigón armado, con sus inmensas posibilidades de aportar nuevas soluciones, dio lugar a una imparable cantidad de investigaciones arquitectónicas; la primera son los rascacielos que, desde finales del siglo XIX, se estaban construyendo en ciudades como Chicago o Nueva York (Figs. 50 y 51). La disponibilidad de perfiles de acero y la invención del ascensor eléctrico permitió el nacimiento y desarrollo de estos rascacielos. Estos



Figura 50. Empire State Building *de Nueva York, en su construcción (1931) se utilizaron bloques prefabricados.*

edificios, no solo suponen una investigación en las estructuras de las nuevas arquitecturas, sino que a la larga cambian el concepto tradicional de vivienda, imponiendo la vivienda de masas, en el cual los individuos o las familias viven en un espacio que es a la vez una casa múltiple con unidades simples producidas en cantidad, concepto que se impone de forma definitiva en el siglo XX.

La renovación de fin de siglo la produjo la denominada *Escuela de Chicago* que aportó el desarrollo de esta nueva tipología de edificio, consiguiendo una combinación perfecta entre la mampostería de piedra en la fachada y la estructura interior de hierro. El acero, material que se empezó a utilizar entonces en la construcción, se trasformó en el esqueleto de los edificios. Gracias a este sistema constructivo, el esqueleto se levanta rápidamente y sobre él se dispone el cerramiento, resolviendo dos de los mayores problemas que planteaba la ciudad moderna: la escasez de terreno y la escasez de tiempo. La calefacción central, los ascensores, los cimientos de hormigón (indispensables en el pantanoso Chicago) fueron factores que posibilitaron las innovaciones técnicas y arquitectónicas.



Figura 51. *Conjunto de rascacielos y edicio Chrysler (1930) de Nueva York.*

Tras estas primeras experiencias renovadoras, la arquitectura del siglo XX imprime las líneas definitivas sobre las que se va a sustentar su largo, complejo y, en algunos momentos, contradictorio desarrollo. Por una parte establece el desarrollo sin límites de la potencia estructural de las edificaciones, hecho que provoca eliminar motivos ornamentales superfluos, se entiende que el hormigón armado, el cristal y el acero son suficientes por sus propias propiedades y texturas para decorar una estructura arquitectónica, con lo que se consolida la tendencia hacia el racionalismo arquitectónico. Por otra parte, se establece la vía de una permanente experimentación y aplicación de nuevos materiales en la construcción.



Figura 52. *Ciudad de las Artes y de las Ciencias (Valencia) de Santiago Calatrava (1998).*