

1

El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario

Carles Romea

Resumen La ingeniería civil, desde la revolución industrial hasta nuestros días, se ha basado en dos materiales básicos: el acero, que llena todo el siglo XIX con sus estructuras deslumbrantes cuyo paradigma es la torre Eiffel, y más modernamente el hormigón armado. Fue en el siglo XVIII, cuando se sentaron las bases teóricas de la revolución industrial, que muchos ingenieros civiles pusieron su interés en el hormigón romano, cuyas glorias, aun hoy en día se tienen en pie. Tiene pues el hormigón un antecedente romano, lo cual lo inscribe dentro de la tradición constructiva Mediterránea, que a su vez bebe sin solución de continuidad de las construcciones cohesivas de la antigüedad, teniendo como antecedente el yeso, que en la península Ibérica ya explotaron las civilizaciones Íberas y Celtas. Modernamente, la combinación del acero con el hormigón ha generado un nuevo material compuesto que conocemos por hormigón armado. El hormigón armado, visto desde el punto de vista contemporáneo, pasa por ser, pues, un precursor de los materiales compuestos, que nos abre el camino a las combinaciones, tecnológicamente más avanzadas, actuales, y que nos permiten vislumbrar, con esperanza, un gran futuro a los nuevos materiales. Un breve resumen histórico nos permitirá conocer mejor su trayectoria.

1.1. El yeso, un antecedente Mediterráneo

De acuerdo con las teorías de la antigua Grecia, según Empédocles de Agrigento (c. 495/490 - c. 435/430 a.C.), todos los materiales de la naturaleza están compuestos por cuatro elementos básicos juntando el agua de Tales de Mileto, el fuego de Heráclito de Éfeso,

Carles Romea

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria
Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, Colon 11, TR45, Terrassa, 08222 Barcelona, España
e-mail: carles.romea@upc.edu

DOI: [10.3926/oms.199](https://doi.org/10.3926/oms.199) • Omnia Publisher, 2014

el aire de Anaxímenes de Mileto y la tierra de Jenófanes de Colofón, los cuales se mezclan en los distintos entes sobre la Tierra.

Nos llega noticia del geógrafo e historiador griego Estrabón (c. 64/63 a.C. - c. 19/24 d.C.) de que en la península Ibérica, mucho antes de la llegada de los romanos, las civilizaciones anteriores ya conocían la utilización de los materiales aglomerantes¹. Así, la fabricación de yeso era una práctica corriente y la gran cantidad de restos hallados así lo corroboran. Las piedras de origen calcáreo tienen la propiedad notable de que al ser calcinadas, es decir, cocidas a gran temperatura durante largo tiempo, se deshidratan por completo, dando lugar a un nuevo material, que, una vez reducido a polvo, presenta unas nuevas propiedades. Es dable señalar que las piedras calcáreas no son otra cosa que la tierra de Jenófanes, que una vez calcinada con el fuego de Heráclito i el aire de Anaxímenes, es tratada con el agua de Tales de Mileto. Este material purulento de color blanco es conocido por yeso común y procede del sulfato cálcico CaSO_4 . Una vez rehidratada con agua se convierte en sulfato cálcico hemihidrato $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ [20].

Este material cohesivo que tiene la propiedad de endurecerse con el tiempo y actuar como agente aglutinador de los áridos, grava y arena, y que, por ser amorfo, puede modelarse a voluntad, ha sido ampliamente utilizado en la construcción. Antiguamente se utilizaba la cal apagada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que se obtenía hidratando en exceso el óxido de calcio (cal viva). Según el testimonio de Gayo Plinio Segundo² (23-79 d.C.), conocido como Plinio el Viejo, esta tradición venía de los egipcios, que la traspasaron a los griegos, y éstos la legaron a los romanos quienes aportarían la arena a la mezcla, proporcionando una consistencia y resistencia mucho mayor al conjunto formado [4, 20].

1.2. La romanización

Con la expansión de la romanización, los modos constructivos evolucionan y llegan las nuevas técnicas que, con gran fortuna, los romanos –excelentes ingenieros y mejores administradores– nos legaron. Los hornos de cal se perfeccionaron, y Roma, con un gran sentido práctico, introdujo el principio de agregación allí donde las culturas anteriores, más primitivas, como Grecia, Persia o Egipto, sólo acertaron a mover inmensas moles pétreas. Los grandes volúmenes de sus templos y de sus construcciones civiles y militares demandaban gran cantidad de fuerza animal. Las moles de piedra eran extraídas de canteras, conformadas y trasladadas penosamente, hasta llegar al lugar de la construcción. Elevarlas y colocarlas en su lugar correcto era obra de titanes.

Cabe distinguir –como nos han enseñado los historiadores– tres períodos claramente diferenciadas en la historia de Roma: la Monarquía (753-509 a.C.), el período Republicano que en el año 27 a.C. dio paso al Imperio Romano (27 a.C. - 476 d.C.). Y es en el segundo período en el que aparece uno de los materiales más revolucionarios –por su importancia– en la historia de la construcción. El *opus caementicium*³ u hormigón romano, aún lejos de nuestros

¹*Geographiké*. Libro III.

²Historia Natural. Libro V.

³Tal y como lo entendemos a día de hoy, el *opus caementitium* es el hormigón, constituido de grava mezclada con cal, arena y agua.

hormigones modernos, presentaba unas características notables: si se añadía la tierra volcánica de la zona de Pozzuoli, en las faldas del Vesubio, en proporciones adecuadas, juntamente con la arena y las piedras, y se amasaba con la cal, se obtenía una mezcla que endurecía incluso bajo el agua y confería características hidráulicas al producto obtenido, pudiéndose utilizar en la construcción de depósitos, obras portuarias, cimentaciones en zonas húmedas y revestimiento de acueductos. Que la mezcla era de excelente calidad lo prueba el hecho que más de dos mil años después muchas de sus construcciones siguen en pie. Es notable, a título de ejemplo, el Panteón de Agripa (véase Figura 1.1) [4, 18, 20].

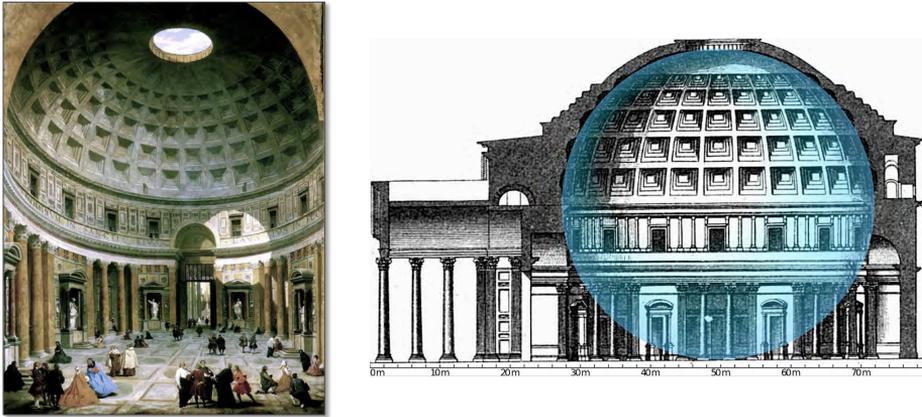


Figura 1.1: Interior del Panteón de Agripa por Giovanni Paolo Panini (1691-1765) (izquierda). Sección transversal del Panteón en la que se haya superpuesta una esfera de 43,3 metros de diámetro (derecha).

La documentación más antigua que se ha encontrado del *opus caementicium*⁴ se debe a una cita de Marco Porcio Catón (234-149 a.C.). Aunque la técnica de utilización del mortero no se conoce con exactitud, ya a finales de la época Republicana (siglo II y I a.C.) el *opus caementicium* sustituyó otras formas de construir, como el *opus quadratum* hecho con bloques de piedra seca, o el *opus latericium* y *crudus* hecho con material cerámico en seco. Pero es con Julio César (100-44 a.C.) cuando se puede empezar a hablar de auténticos hormigones. Los escritos de Marco Vitruvio Polión (c. 80/70 - c. 15 a.C.) son la principal fuente de información sobre la construcción romana [18, 20].

La capacidad del hormigón romano de cal puzolana de ser resistente a la entrada de aire, pero sobre todo de ser resistente al agua, era bien conocida por Vitruvio. Según indica en uno de sus diez libros *De architectura*, el polvo de Puzol convertía en sobresaliente cualquier tipo de construcciones, pero particularmente aquellas que se hacen en el mar bajo el agua⁵ [20]. De las correctas proporciones de la mezcla del mortero, Vitruvio, sugería lo siguiente:

Una vez que la cal esté apagada, se mezclará con arena, poniendo tres partes de arena por una de cal. Si fuera arena marina o fluvial, con dos partes será suficiente y se mezclará con ladrillos molidos, obteniendo un material aún mejor por su uso⁶.

⁴*Ex calce et caementis.*

⁵Capítulo VI del segundo libro.

⁶Capítulo V del segundo libro.

1 | El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario

El descubrimiento del comportamiento hidráulico que proporciona la mezcla de cal y el polvo de Puzol, dio lugar a la construcción a gran escala del hormigón propiamente dicho, mezclando cal, arena, puzolana, agua, trozos de ladrillo⁷ o más frecuentemente piedra. Con una visión moderna, se puede decir que el hormigón es el primer material compuesto hecho con técnicas industriales.

Queda claro que Roma tuvo una gran preocupación por construir bien, y el éxito del hormigón puzolánico permitió construcciones con cotas cada vez mayores. De acuerdo siempre con lo que nos expone el ingeniero e historiador François Auguste Choisy (1841-1909) en su cuidado y acertado estudio de la construcción romana, el uso del hormigón les llevó a ejecutar todo tipo de arcos y bóvedas [4]. De hecho, el sistema constructivo romano se basa en la profusión de la utilización del arco y la bóveda de medio punto. En contraposición con las arquitecturas griegas o egipcias, basadas en la utilización del dintel recto y donde las bóvedas siempre eran aproximaciones a partir de falsas estructuras en voladizos sucesivos, los romanos supieron resolver de forma magnífica el cubrimiento de grandes espacios con materiales sólidos y duraderos [4, 20].

Con la caída del Imperio Romano de Occidente (476 d.C.), sobre todo lejos de la capital, se inició un lento pero inexorable declive de la calidad de la construcción, y se discutió mucho –hasta finales del siglo XIX– cuál era el secreto que tenían los romanos para asegurar la durabilidad de su hormigón. En realidad, el supuesto secreto queda bien explicado en las reglas constructivas que recoge Vitruvio. Ya ha quedado manifestada la importancia que tenía la utilización de la puzolana, pero vale la pena citar otros apartados extraídos de sus libros, dedicado a las características de los materiales para tener éxito en la construcción. A propósito de la arena escribe [20]:

En las construcciones hechas con hormigón, lo primero que hay que hacer es encontrar una arena que sea apta para la mezcla, y que no tenga restos de tierra [...] Será óptima aquella que frotada con las manos, se escurre, aquella que a pesar de tener tierra no es áspera. La arena marina además, después de hecho el muro y colocado el enlucido, exuda sacando el salitre y se disuelve⁸.

En referencia a la cal escribe:

[...] habiendo explicado los diversos tipos de arena, tendremos que poner toda la atención en el tipo de cal proveniente de la cocción de piedra blanca, aquella que provenga de una roca más compacta y más dura será útil para la fabricación del hormigón, aquella que sea más porosa se utilizará para los enlucidos⁹.

Véase pues que, éstos y no otros eran los procedimientos que aseguraban la durabilidad de las construcciones romanas, más allá de los secretos que otros han querido ver, donde sólo había sentido común y un excelente conocimiento de los materiales empleados.

⁷Según la tradición latina, Marco Tulio Cicerón (106-43 a.C.) y Tito Livio (59-17 d.C.) llamaban *caementum* a las piedras que utilizaban para hacer el hormigón romano, palabra que derivaba del verbo latino *caedo*, que significa cortar en pequeñas piezas.

⁸Capítulo IV del segundo libro.

⁹Capítulo V del segundo libro.

1.3. El declive medieval

La caída del Imperio Romano Occidental conlleva un inexorable cambio del sistema social y consecuentemente un cambio radical en las necesidades estructurales entre el imperialismo romano y la posterior ruralización del territorio. El sistema de construcción heredado se nutría por un lado de un dominio de la técnica, y por otro de la mano de obra esclava. El alejamiento de las pautas y la tradición romana, deriva en un empobrecimiento de la calidad de los cementos¹⁰ en comparación con la época imperial, y por ende en un paulatino decaimiento de las construcciones de tipo cohesivas, que son substituidas en los edificios emblemáticos por la antigua piedra [19].

La construcción de la cúpula (1420-1436) de la Basílica de Santa Maria del Fiore (Catedral de Florencia Il Duomo) por parte del arquitecto renacentista Filippo Brunelleschi (1377-1446), supone un hito en la historia de la construcción. La concepción original del autor de utilizar material cerámico, requería de un material cohesivo como el empleado por los romanos. Así pues, el autor toma conciencia del legado técnico y constructivo de la época romana. No obstante, a pesar del éxito y reconocimiento por la esplendorosa demostración de su técnica, más de un siglo después, el polifacético artista renacentista Michelangelo Buonarroti (1475-1564), encargado de la construcción de la cúpula central de la Basílica papal de San Pedro del Vaticano, inspirada en la del Panteón de Agripa y en la planta ortogonal de la Catedral de Florencia, optó por la piedra [16].

1.4. El cemento Portland entra en acción

Es a partir de finales del siglo XVIII cuando se entra en el período definitivo en la recuperación del hormigón, con el descubrimiento de lo que se conocen como los aglomerantes modernos. La influencia de la tradición romana pesó muy probablemente en el descubrimiento de los nuevos aglomerantes, ya que se insistía mucho –de acuerdo con los escritos de Vitruvio– en la pureza de la cal.

El ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792) descubrió en la obra de reconstrucción del faro de Eddystone (Inglaterra), el buen comportamiento hidráulico de una mezcla de cal y arcilla que resistía la acción del agua del mar. Este faro (véase Figura 1.2), construido en un accidente rocoso en el canal de la Manga, es uno de los más famosos. El primer faro fue construido por Henry Winstanley (1664-1703), y fue trágicamente arrastrado cinco años después. Fue reemplazado por la torre de John Ruyard (1650- c.1718), construida en roble y devorada por un incendio en 1755 [16].

¹⁰Vale la pena señalar la curiosa etimología de la palabra "cemento", que se ha convertido en *caementum* al pasar del latín clásico al vulgar, conservando originalmente el significado de piedra pequeña para asumir más adelante por el típico proceso de sinécdoque, el sentido de todo conglomerado formado por agua, ligante y piedras. En la Edad Media, cemento era sinónimo de hormigón. Sólo a finales del siglo XVIII empieza a hacerse la diferenciación, pasando el cemento a ser el ligante y hormigón el conglomerado resultante. En italiano, por ejemplo, el hormigón se conoce como *calcestruzzo*, que deriva directamente del latín de *calces structio*, esto es, estructura hecha de cal. Aún así el inglés llama *concret* al hormigón, apropiándose del latín la palabra *concretum*. Cicerón escribía en latín: *concretum corpus ex elementis*, es decir, cuerpo compuesto de elementos diversos, que incluye el concepto de conglomerado, bien propio del hormigón.

1 | El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario

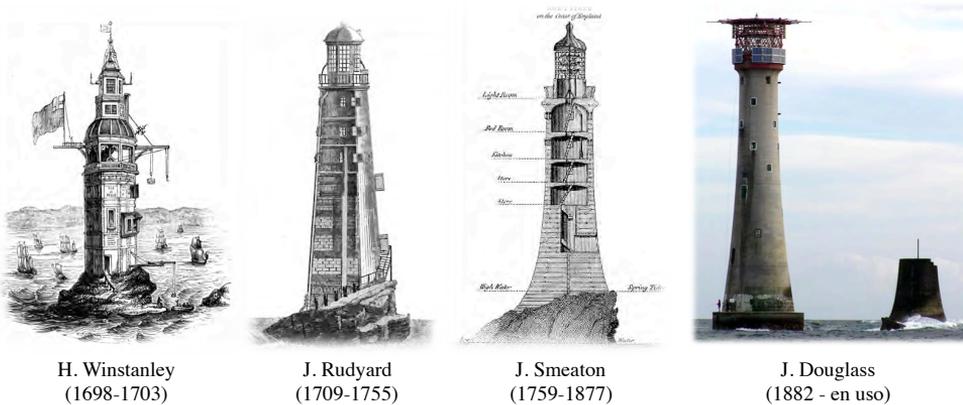


Figura 1.2: Ilustraciones e imagen de los cuatro faros de Eddystone, Reino Unido, ordenados de izquierda a derecha indicando el autor de la construcción y el período de servicio del faro. Las alturas no son representativas.

Fue entonces cuando Smeaton emprendió uno de sus más destacados trabajos: la construcción en piedra del faro, y que puede considerarse una de las obras precursoras de la moderna ingeniería de la construcción. No sólo estudió la geología de la roca sobre la que debía asentarse y de la cantera donde debía obtener la piedra, sino que, además, estudió muy cuidadosamente la historia de la ingeniería romana. Copió la práctica de los romanos del uso de cuñas de madera para asegurar el correcto asentamiento con que se conectaban las sucesivas hiladas de bloques de piedra y, posiblemente más significativo en la historia que nos ocupa, el uso del hormigón puzolánico. Smeaton se hizo traer de Italia los ingredientes del cemento para asegurarse de que utilizaba el mismo material que tan buen resultado dio a los antiguos romanos. Comenzada en 1756, la torre se incendió por primera vez en 1759 y permaneció en servicio hasta el 1882 cuando fue reemplazada por el faro actual. Éste fue construido por James N. Douglass (1826-1898) y se sitúa a 36 m al sudeste de la torre de Smeaton. La razón para cambiarla de lugar fue que la base de la construcción de la de Smeaton había sido socavada por el mar. Los análisis químicos demostraron que la presencia, precisamente de arcilla en la cal, era determinante para darle –a la mezcla obtenida– su capacidad hidráulica [2].

El científico francés Louis Vicat (1786-1861) es considerado el inventor del cemento artificial. Comenzó su carrera buscando un material capaz de endurecerse bajo el agua para sustituir el mortero de fraguado lento. Fue un gran admirador del cemento romano, viendo que era un material que desafiaba el paso del tiempo con una durabilidad a toda prueba. Estudió en profundidad el comportamiento de las mezclas de piedra caliza con arcilla, demostrando de forma definitiva que el carácter hidráulico provenía del resultado de cocer la cal arcilla. Los primeros aglomerantes así elaborados se parecían a los cementos conocidos como rápidos, muy ricos en aglutinantes y de rápida compactación. Vicat estudió con detalle todas las reacciones químicas y estableció, con gran rigor científico, las reglas de fabricación y utilización de la cal hidráulica. En 1818 publicó el tratado sobre la fabricación del cemento: *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*. En él explica cómo obtener cal hidráulica a partir de cualquier piedra caliza; el procedimiento consistía en apagar la cal y mezclarla con arcilla pura y agua, convirtiéndola en una masa

pegajosa de la que se formaban unas bolas, que, una vez secadas al sol, se introducían en un horno obteniéndose un nuevo material de cualidades completamente diferentes [3, 16, 18].

El albañil inglés Joseph Aspdin (1778-1855), patentó en 1824 un cemento que él mismo producía, cemento que afirmaba era tan duro como la piedra de Portland. Lo que más tarde se conoció como cemento Portland, era una mezcla de clinker molido obtenido por calcinación entre 1350-1450 °C con una cierta adición de yeso. Esta mezcla de materia calcárea-arcillosa convenientemente tratada se conoce como clinker, y su proceso como "clinkerización", que no es más que la cristalización del cemento. Este clinker se obtiene con una mezcla química de 80 % de material calcáreo y un 20 % de material arcilloso. Las operaciones de trituración de las materias primas en crudo, la mezcla y homogeneización, su cocción, y el enfriamiento del clinker, son las operaciones habituales de la fabricación del cemento artificial. Para Aspdin, era pues una masa sólida que no era ya necesario cocer más y que una vez reducida a polvo y mezclada con agua se convertía en el cemento conocido como Portland. Este término es pues sinónimo desde que se fabrica por vía artificial [2, 3].

Aunque ahora los cementos artificiales son de uso corriente, no son más que una adaptación de materiales naturales que imitan un material preexistente en la naturaleza. Si una piedra caliza contiene una proporción de arcilla y alguna otra impureza, puede dar un cemento natural si se calcina a una temperatura superior que la utilizada para fabricar la cal. Los cementos naturales se adormecen más rápidamente que el Portland, pero suelen tener una resistencia más baja. Por ello se les conocía impropriamente como "cementos romanos". El cemento Portland, ya desde su aparición, se extiende y generaliza su uso convirtiéndose en poco años en un material indispensable para todo tipo de construcciones [3, 18].

1.5. El hormigón armado comienza su marcha

Durante todo el siglo XIX, sobre todo en Inglaterra y Francia, se dan varios estudios encaminados a descubrir el secreto de los hormigones romanos. Alemania, aunque se incorpora de forma más tardía, entra en la época pionera del hormigón aportando –ya a finales de siglo– un gran contenido teórico y técnico. Para fijar los límites de este período temprano propio de los pioneros, se establece el año 1910 como el final de la época a partir de la cual se entra de pleno derecho en la denominada etapa clásica del hormigón armado [18].

El hormigón, según se ha visto, puede asimilarse a una piedra, aunque de origen artificial. Como ella, es capaz de soportar grandes cargas de compresión; pero si bien tiene esta remarkable virtud, su resistencia a la tracción es en cambio muy limitada. Los valores y las direcciones de las tensiones son hoy previsible por su diseño y cálculo. No obstante, es necesario compensar los esfuerzos destructores colocando –allí donde hay– piezas de un material que sea resistente a la tracción. Este es el caso del hierro que se utilizó desde hacía tiempo en las construcciones de mampostería (p.e. cúpulas bizantinas, arquitectura gótica, pasadores en los muros Griegos, piedra armada) y para la realización de elementos de enlace (encadenado y anclaje de edificios, tirantes de las vueltas, etc.). La unión del hormigón y el hierro, además de permitir la puesta en común de las características específicas de los dos materiales, beneficia a las ventajas ligadas a sus propiedades físicas respectivas. El hormigón y el acero tienen

—casualmente y por fortuna— un coeficiente de dilatación similar en el rango de las temperaturas ordinarias de trabajo. Además, el hormigón liga muy bien con el acero y lo protege de la oxidación [6, 12].

La primera utilización del hormigón armado (ferrocemento) se atribuye al ingeniero francés Joseph-Louis Lambot (1814-1887) quien en 1848 fabricó una barca que navegó largamente por el lago de Miraval. En 1849 el jardinero e "inventor del hormigón armado" Joseph Monier (1823-1906) —como él mismo se atribuye—, construye las no menos famosas macetas (sistema móvil de hierro y cemento aplicable en la horticultura) utilizando, como Lambot, una malla metálica. En 1853 François Coignet (1814-1888) edificó el primer inmueble con estructura de hormigón reforzada con varillas de hierro. En años posteriores patentó sus métodos de: hormigón económico, hormigón hidráulico y hormigón plástico; construye más de 300 km de alcantarillas y promueve el tipo de construcción conocida como monolítica, colaborando, a su vez, con muchos arquitectos [3, 6, 18].

Es cierto que todas estas innovaciones tienen un principio ciertamente empírico, pero tienen como punto de partida una fe inquebrantable en el futuro del "hierro con cemento" como así lo conocían sus pioneros. Prueba de ello son las diversas patentes, que sentaron las bases del hormigón armado. El estado de conocimientos en los países desarrollados hizo que iniciativas como las anteriormente comentadas fueran muy frecuentes. La importancia que este material ha tenido posteriormente hace que su invención, su descubrimiento, sea casi una cuestión de estado. Si bien parece indiscutible que fueron ciudadanos franceses quienes iniciaron la nueva era del hormigón armado.

Monier, tras patentar varios de sus sistemas, fue quien definitivamente explicó con detalle cuál era el papel de los "hierros" que se dejaban dentro de la masa del hormigón. Así, en una viga armada, el hierro que se coloca en su interior sirve para resistir las tracciones que aparecen por efecto de la flexión, pero por contra no soporta bien los esfuerzos cortantes que se manifiestan en los extremos de la pieza cerca de los puntos de apoyo. También comprobó que las zonas que están fuertemente comprimidas resisten con dificultad. Se da cuenta, por tanto, que hay que conformar el hierro siguiendo la distribución de los esfuerzos, y adapta la armadura de acuerdo con estas sollicitaciones. En cuanto a los pilares —que también patentó—, los esfuerzos ocasionados por el descentramiento de las cargas, hace necesario armarlos con barras verticales en toda su altura, pero debido al pandeo que esto ocasiona en la pieza, provoca que el hormigón se hinche y se aplaste, lo que se corrige con unos aros perimetrales a modo de cinturón transversal que controlan esta deformación [3, 6, 16].

Al tiempo que ingeniero y constructor, el belga François Hennebique (1842-1921) fue también pionero en la industrialización a gran escala del hormigón, creando varias filiales en numerosos países Europeos. Él fue quien dio el empujón definitivo que necesitaba el hormigón armado para internacionalizarse. La internacionalización del hormigón se asocia con él gracias ya que, en 1892, una vez patentado su sistema¹¹, aplica el prefabricado a gran escala frente a la construcción *in situ* más limitada [16, 18].

Según Hennebique se formula el principio fundamental del hormigón [16]:

¹¹ *Combinaison Particulière du Métal et du Ciment en Vue de la Création de Poutraisons Très Légères et de Haute Résistance. Brevet n° 223546. F. Hennebique, 1982.*

Los elementos asociados en la estructura tienden a ayudarse recíprocamente para aliviar sus respectivos esfuerzos.

Es decir, no se concibe el hormigón únicamente como la unión de dos materiales, sino que son dos materiales unidos que trabajan conjuntamente. A Hennebique se debe el primer forjado de gran luz (patentando la sección en "T"), la construcción en 1880 de la primera losa armada con armaduras de sección circular, o la patente en 1892 de la primera viga con estribos (es decir, con cercos perimetrales a lo largo de toda ella). El puente del Risorgimento con una luz de 100 m y 10 m de flecha (véase Figura 1.3), representa el cenit de su carrera, construyendo con hormigón armado una estructura de una esbeltez impensable para la época.



Figura 1.3: Puente de Risorgimento sobre el río Tiber, Roma. Diseñado por Giovanni Antonio Porcheddu y construido por la empresa Hennebique en 1911 con hormigón armado.

El hormigón, que como todo nuevo material empieza de una manera dudosa, entra con fuerza en el mundo de la construcción, y una vez resueltos los problemas técnicos más elementales es utilizado con gran profusión. Fruto de ello, el ingeniero y profesor Charles Rabut (1852-1925) recoge parte del conocimiento presente en la industria y lo traslada a la universidad, impartiendo a partir de 1897 el primer curso de hormigón armado, material que dice ha sido inventado por "amateurs", y por tanto se encuentra bajo sospecha por los cuerpos oficiales de ingenieros, quienes no lo validan hasta que no demuestra su bondad y resistencia [16].

El curso de Rabut, que no contiene ninguna fórmula, hace una apuesta por ofrecer una alternativa a la albañilería clásica: la separación clara entre el trabajo que hace el hormigón y el acero, la supresión del pandeo, su versatilidad en la utilización (facilidad de ejecución y montaje), su resistencia a las cargas dinámicas y su gran resistencia al fuego y a la intemperie. A pesar de que el curso impartido estaba muy alejado formalmente de lo que entendemos hoy en día por un curso técnico, consagra, aun y así, todo un capítulo a la historia de esta técnica aún naciente.

En sus exposiciones, Rabut insiste en una evolución epistemológica muy particular: desde el invento de Lambot hasta el 1906, en que se redacta la circular ministerial¹² [6], la intuición

¹²El 20 de Octubre de 1906 se publica el primer Reglamento Oficial Francés: *Circulaire du ministre des travaux Publics de Postes et des Télégraphes aux Ingenieurs en-chef des Ponts et Chaussées*, que contenía unas *Instructions Relatives à l'emploi du béton armé*.

y la experimentación van por delante del desarrollo teórico. Según Rabut, casi todas las mejoras sucesivas en el hormigón aportadas por Coignet (padre e hijo¹³) y Hennebique, vienen dictadas por el azar, y él las expone bajo un repertorio de "sistemas". Entre ellos destacan los sistemas Bona, Golding, Mahai, Cottancin, entre otros. A pesar de las ventajas constructivas que aportan los diferentes sistemas, Rabut entiende que la falta de tradición constructiva en hormigón armado se deriva un problema estético, ya que lo considera feo (aunque no sea este un argumento técnico) [3, 16].

Durante décadas el hormigón armado es utilizado exitosamente en construcciones civiles, pero la entrada definitiva del hormigón en la historia de la construcción se produce cuando el arquitecto francés Anatole de Baudot (1834-1915), siguiendo las corrientes neogóticas imperantes, construye la emblemática iglesia de Saint-Jean de Montmartre (1897-1904), que no deja de ser una estructura de hormigón armado. Los arquitectos adoptan el hormigón armado y le otorgan carga de naturaleza a la construcción. Un gran campo de posibilidades se abre ante los creadores; las estructuras y las formas sólo están limitadas por las nuevas tensiones que el nuevo material de forma autónoma pueda soportar a condición, eso sí, de estar fuertemente armado. El hormigón armado permite disociar los sistemas constructivos: desaparece de esta manera el muro de carga, se eliminan todos los elementos de apoyo y es permitida la construcción de ménsulas y voladizos, ampliando así el catálogo de las soluciones estructurales. El hormigón armado libera al arquitecto de los antiguos imperativos técnicos. Sólo queda por resolver el programa que se beneficiará de la libertad de la innovación [2, 16, 18].

1.6. Época clásica del hormigón: 1910-1940

Puede fijarse el período de entre guerras, como el momento de máxima expansión del hormigón armado, quedando superado a finales de los años treinta por un nuevo material, el hormigón pretensado, que supone un nuevo impulso en la carrera futura de la construcción. Son muchas –y de gran calidad– las construcciones, edificios, puentes y todo tipo de infraestructuras las que se construyen en Europa, América y Australia. Aparece la figura del ingeniero consultor y proyectista, un verdadero especialista en el campo del diseño y el cálculo de estructuras. Lo que caracteriza esta etapa es la aceptación del nuevo material como un elemento constructivo con pleno derecho dentro de todo tipo de construcciones. La etapa inicial, que corresponde a los pioneros, deja paso a una etapa esplendorosa que en pocos años logra imponer su práctica. El primer paso sin duda es la aceptación del hormigón en construcciones más convencionales, como los edificios de viviendas, en manos de los arquitectos, que ven en él un material apto y muy versátil [1, 7, 11].

A pesar de su gran aplicación en edificios de tipo industrial, aún queda un largo camino a recorrer. Es un material con unas propiedades resistentes singulares, lejos de la nobleza del acero, con un comportamiento mecánico que presenta no pocas particularidades. Nuevamente el método de prueba y error, en construcciones cada vez más atrevidas, permite un conocimiento más profundo. Es un material resistente a la compresión, pero que bajo tracciones, fisura. Es un material económico, pero su dosificación y la utilización de cementos varios le

¹³Edmond Coignet (1856-1915).

dan propiedades a menudo diferentes. Pide un control de obra exigente, y la necesidad de mano de obra especializada hacen que sea un material todavía muy artesano. La etapa de entre guerras convierte al hormigón armado en un material apto e ideal para la expansión de las infraestructuras en Europa: puentes, viaductos, autopistas, carreteras, fábricas, naves industriales, hangares para dirigibles, hangares de aviación, depósitos de agua, presas, mercados, estaciones de tren, aparcamientos, terminales marítimas, torres de comunicaciones, faros, y un largo etcétera. En definitiva, el hormigón armado se impone en el viejo y el nuevo continente [7, 12, 13].

Una de las características técnicas, sobre todo en la construcción de puentes, era su casi dependencia del diseño de los arcos, que aún se construyeron como en la etapa anterior en que se hacían de piedra, pero ahora de hormigón. El diseño poco a poco se va acomodando a la nueva manera de trabajar con este material, hasta que se supera esta etapa inicial. De hecho, uno de los avances más notables es la transición de entre lo que el arquitecto e ingeniero catalán Felix Cardellach (1875-1919) llamó la construcción compresiva, por una nueva que podemos llamar flexiva. Eugène Freyssinet (1879-1962), afirmó que la única novedad importante de esta época es la construcción de vigas rectas tal como hoy las conocemos (véase Figura 1.4). Ciertamente la viga recta, que hoy consideramos como habitual y normal, es una estructura que trabaja a flexión, lo que supone tracciones en las zonas a las que se confía la armadura. El hormigón armado permite la absorción de tracciones. De todas las formas estructurales, la viga recta es, quizás, la forma estructural más reciente de todas [9-11].

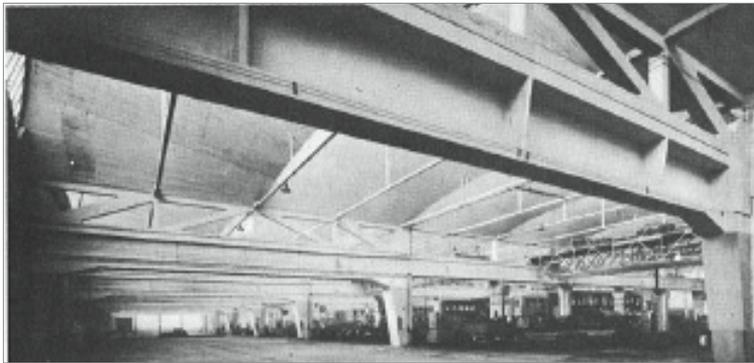


Figura 1.4: Vista de una viga recta de hormigón armado construida por Freyssinet en la fábrica nacional de radiadores en París.

Los arcos de hormigón que trabajan básicamente a compresión, son meros sustitutos de la piedra, pero con el paso del tiempo se hacen cada vez más estilizados. Las secciones más delgadas y las tensiones de trabajo mayores. Se optimiza el uso del material, se aligera el peso y se aumenta la seguridad de las estructuras. Aparecen nuevos métodos de cálculo pero, a pesar de todo, más de un disgusto –a veces con consecuencias nefastas–, hace que los ingenieros deban aplicarse a fondo en el trabajo [14, 15, 18].

El teórico de la arquitectura e ingeniero suizo Charles Édouard Jeanneret-Gris (1887-1965), más conocido como Le Corbusier, publica en 1923 su manifiesto *Vers une Architecture* [11], una recopilación de artículos publicados en la revista *L'Esprit Nouveau* en los

que hace una apología de los ingenieros. Ilustra sus tesis con fotografías de silos y fábricas americanas de hormigón. Sobre estas construcciones afirma [7, 11]:

[...] magníficos principios de los nuevos tiempos, ejemplos de la abstracción de la arquitectura que tiene como particularidad y de magnífico, que, arraigando en el hecho brutal, se espiritualiza, porque el hecho brutal no es otra cosa que la materialización, el símbolo de la idea posible.

Para él el reconocimiento de la armonía que demuestran las nuevas estructuras de hormigón armado son prueba, no del arte, pues no se trata de la Capilla Sixtina ni del templo griego *Erechtheion*, son obras cotidianas de todo un universo que trabaja con conciencia, inteligencia, precisión, imaginación, decisión y rigor. El uso del hormigón se internacionaliza.

1.7. El hormigón se tensa

Ya desde los comienzos de la práctica constructiva en hormigón armado, se detectaron los comportamientos específicos del nuevo material. De hecho, la retracción, que puede ser la más evidente, implica en el hormigón fresco una merma de volumen por pérdida de agua. Su consecuencia más inmediata es la práctica de la construcción de juntas de retracción y la colocación de armados específicos para controlar la fisuración que provoca. Otro fenómeno que quedó rápidamente evidenciado fue su falta de resistencia a la tracción, y la consiguiente fisuración. Por último, su comportamiento a esfuerzos prolongados a la compresión, hacen que el hormigón fluya. Esta deformación diferida en el tiempo, y que Freyssinet comprobó de manera alarmante en la construcción del puente de Veudre sobre el río Allier (1911-1912), junto con los fenómenos mencionados anteriormente, llevaron a muchos técnicos del hormigón a intentar superarlos [10].

Es dable señalar que la idea del pretensado revolucionó completamente la manera de tratar el hormigón. Son muchos los que se arrogan su invención, y según la bibliografía publicada –y su nacionalidad–, escriben la historia según sus "legítimos" intereses. Son varios los países que manifiestan su paternidad, los Estados Unidos de América, Alemania, Francia... Lo cierto es que la idea se maduró durante muchos años, pero sólo Freyssinet desarrolló con acierto la tecnología necesaria para poder otorgarle, con toda justicia, su paternidad. Él lo define como "una verdadera revolución en la construcción" [13, 14].

La idea del hormigón precomprimido, o pretensado, nace de hecho a finales del siglo XIX, cuando los ingenieros comprenden la forma de funcionar del hormigón armado, fisurando bajo el efecto de las tracciones. Es justo en este punto donde hay que precomprimir el hormigón, porque bajo el efecto de las cargas que deberá soportar en el momento de construirlo, habrá que añadir, con juicio, fuerzas en sentido contrario. En otro orden de cosas, pensemos en las barricas de vino que se rodean con aros metálicos que ejercen de compresores de la madera. La rueda de bicicleta también es un ejemplo clásico de un mecanismo pretensado. La propuesta del precomprimido del hormigón es pues muy antigua. En 1886 Henry Jackson patentó un sistema de tirantes de acero para el pretensado del hormigón. En 1888 W. Döring solicita la patente del banco de tensado. Matthias Koenenen 1906 realizó los primeros ensayos con armado, colocado y hormigonado con tensiones previas. K. Weststein en 1919

fabricó unas tablas muy delgadas bajo el nombre de Wettstein-Bretten, utilizando cuerdas de piano fuertemente tensadas. Tal vez fue el primero en utilizar acero de alta resistencia sin darse cuenta de que ésta era una de las premisas para que el pretensado pudiera triunfar. En 1923 R.H. Dill teorizó sobre la necesidad de que el acero debería ser de alta resistencia [12].

Pero la patente definitiva del pretensado la presentó Freyssinet en 1928. Hizo presentar a su nombre un acero que diera tensiones de 400 N/mm^2 . El mérito de Freyssinet fue entender el mecanismo de la fluencia –deformación diferida en el tiempo– del hormigón. Fue él quien investigó la fluencia lenta del hormigón, extrayendo las conclusiones correctas para el diseño del pretensado. Su primera aplicación, con un éxito notable, la pudo aplicar en la consolidación de las cimentaciones profundas de la terminal de Le Havre del transatlántico Normandie, máximo exponente de la construcción naval francesa de la época. Otro ejemplo de su legado es el puente de Luzancy sobre el río Marne (véase Figura 1.5). Su éxito se debió principalmente a la implementación práctica del concepto [8, 9].

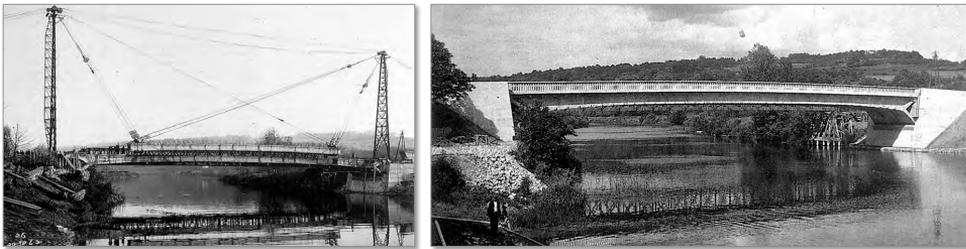


Figura 1.5: Puente de Luzancy de 54 m de luz sobre el río Marne, durante y después de su construcción. Se emplearon dovelas prefabricadas montadas por pretensado formando las vigas que se colocan entre los pilares triangulares.

1.8. Los nuevos hormigones: larga vida al hormigón

Desde el principio del siglo XX hasta bien entrados los años ochenta, el hormigón que se ha utilizado ha sido un material muy similar en todas partes. Ciertamente existían diferencias de dosificación con pequeñas variantes, pero las propiedades intrínsecas del hormigón puesto en obra eran muy cercanas y sobre todo muy constantes. La gran revolución, porque de una revolución se trata, se está librando actualmente, y comenzó en la década de 1980 [16, 17].

En la actualidad el hormigón es un material con sus propiedades gobernables, puede decirse que programables. Es posible actuar sobre cuatro parámetros que conforman la familia de las cualidades de un hormigón: la consistencia y la trabajabilidad, la durabilidad, sus propiedades mecánicas y finalmente su aspecto exterior. Sobre la consistencia y la trabajabilidad se han conseguido hormigones autocompactables (HAC) y autonivelantes. La durabilidad del hormigón es hoy en día uno de los factores más importantes a modificar. La durabilidad viene afectada por dos tendencias que trabajan al mismo tiempo. En primer lugar la durabilidad respecto al ambiente de trabajo y las agresiones exteriores, y en segundo lugar la durabilidad según la evolución interna del propio material. Sobre las propiedades mecánicas, que quizás son las que en principio más llaman la atención, no debe olvidarse que actualmente se ha

llegado a la fabricación de hormigones de hasta 100 MPa. No obstante, en el campo de la construcción y de la obra civil, tampoco son necesarias resistencias tan grandes, pero ello abre otros campos de aplicación. Véase que, de forma paradójica, las propiedades mecánicas del hormigón no parecen ser las más interesantes. Sin embargo en esta primera fase de mejora de sus condiciones se constata que la resistencia se ha multiplicado por tres, se ha reducido considerablemente su coeficiente de fluencia, se ha reducido la retracción y finalmente se ha controlado su capacidad de fisuración [1, 5].

En los hormigones de alta resistencia y los autocompactantes, se consigue –mediante la utilización de los fluidificantes– una gran fluidez, y gracias a su acelerado endurecimiento se pueden reducir considerablemente los ciclos constructivos, lo que hace vislumbrar un futuro prometedor en el campo del prefabricado. En referencia de las innovaciones producidas sobre las propiedades mecánicas, parece evidente que volverán con fuerza un nuevo desarrollo de las estructuras en arco, explotando las altas resistencias de compresión. Incluso puede pensarse en estructuras trianguladas de hormigón solamente, o la solución mixta acero-hormigón, si somos capaces de renovar los conceptos que tuvieron aplicación en los años 60. Se puede pensar también en el hormigón como si de acero se tratase, pero sin parte de sus limitaciones. Se pueden retomar pues las antiguas formas estructurales, pero en otras nuevas que pondrán en valor las nuevas capacidades mecánicas del material. Las luces también se verán incrementadas. También en la prefabricación, hoy se sabe que los elementos corrientes de tipo económico –de inercia constante–, tienen una vida de corto recorrido, tanto por sus limitaciones en cuanto a luces como desde el punto de vista arquitectónico. La utilización de los nuevos hormigones, en definitiva, abre una nueva perspectiva en nuevas aplicaciones y mercados [8, 16].

El nuevo material también induce a nuevas tecnologías. Por ejemplo, en el pretensado clásico, el entubado de los cables lleva a dimensiones transversales importantes. Esto se debe en parte a que los hormigones clásicos superan con dificultades los 40 MPa. Con el pretensado exterior, existe la posibilidad de bajar de forma drástica los espesores de las secciones, y más si se utilizan hormigones de más alta resistencia. También se produce una reducción del peso propio, lo que favorece el aspecto económico. Las primeras obras de pretensado exterior datan de 1982, si no se tiene en cuenta las primeras experiencias de los años cuarenta, efímeras, después abandonadas. Por otra parte en el campo del prefabricado, las propiedades de homogeneidad de los hormigones superficiales, dan unas excelentes cualidades mecánicas, lo que nos lleva a pensar en uniones con pasadores, o encolados, soluciones que pueden simplificar notablemente el montaje y el transporte. Su capacidad de fluidez, y el hecho de que no haya que vibrarlo, permitirán montajes casi milimétricos en la obra [5, 12, 17].

De entre los nuevos hormigones hay que mencionar, por sus altas cualidades, los hormigones armados con fibras. Las fibras pueden ser de tipos diversos: las más comunes son las fibras metálicas, pero también puede ser de polipropileno o fibra de vidrio, entre otras. Puede decirse, de una manera simple, que el hormigón armado con fibras se trata de un hormigón armado a escala local.

Las fibras, al igual que el armado del hormigón tradicional, tienen por objeto controlar la fisuración. A diferencia de la armadura del hormigón tradicional, que se coloca antes del hormigonado, en los hormigones con fibras el armado –es decir las fibras– se incorporan

mezcladas con el propio hormigón, formando un nuevo material. Como las fibras se adicionan directamente a la mezcla del hormigón, éstas deben ser necesariamente cortas. Su dosificación dependerá de que se combinen las dos posibles soluciones total o parcialmente, armando el hormigón con fibras exclusivamente o bien con armaduras convencionales. El hecho de armar con fibras puede permitir una libertad de formas en la pieza de hormigón terminada que no se encontrará sujeta al esqueleto de las armaduras.

Las características técnicas del nuevo hormigón armado con fibras vendrán dadas por la orientación de las fibras, que en principio dependerán de dos parámetros según la puesta en obra: si el hormigón es bombeado o bien proyectado. Esta orientación de las fibras le confiere unas características resistentes determinadas. Hay que evitar sobre todo la posible segregación de las fibras, que también se encuentran afectadas por la fluidez del hormigón. Desde el punto de vista mecánico hay que destacar la ductilidad de la combinación entre el hormigón y las fibras metálicas. Esto representa un importante salto tecnológico, si se tiene en cuenta que puede prescindirse casi totalmente de las armaduras pasivas. Por otro lado, los acabados superficiales que se consiguen son de una gran calidad, con una gran variedad de texturas y con una paleta de colores que abarca desde el negro pasando por todos los matices posibles de colores.

Para finalizar el presente capítulo dedicado a la historia y evolución del hormigón, entraremos en un campo más propio de la ciencia ficción, pero que da una idea de la vitalidad y de la importancia del material, probablemente el más utilizado en la Tierra después del agua, y por lo que se explica a continuación, no es gratuito referirse al planeta Tierra.

En 1969, después de la primera llegada del hombre a la Luna, la cadena hotelera Hilton anunció a que a mediados de los años 80 estaría en funcionamiento el "Moon Hilton", el primer hotel lunar. Hoy, pasados los años, sabemos que esto no ha sido posible. Superada la guerra fría, los gastos estratégicos ya no han sido lo mismo. Es caro y complejo colonizar la Luna. Los caminos para salir de la Tierra pero ya han comenzado, y las estaciones orbitales son una realidad, pero aún no son del todo autosuficientes. Los satélites habitados dependen de las visitas periódicas de los cohetes de carga con suministros de alimentos, agua y oxígeno. Los escritores de ciencia ficción sueñan con centros autónomos situados en un punto Lagrangiano. El transporte del material desde la Tierra es pero impensable debido a los grandes esfuerzos que hay que invertir. No sólo esfuerzos físicos, debidos al gran masa del material sino también esfuerzos económicos. Pero la Luna, Selene griega, puede dar la solución. De establecerse allí la colonia central se tendrían ventajas notables. Al ser la fuerza gravitatoria menor, los lanzamientos serían menos costosos, aunque como contrapartida deberían soportarse más radiaciones cósmicas, lluvia de meteoritos e importantes cambios de temperatura.

En 1984, la NASA¹⁴ envió un satélite en una misión de 6 años para analizar los materiales que se encuentran sobre la superficie lunar. El experimento demostró que todos los materiales se encuentran afectados por las radiaciones solares y el bombardeo de partículas espaciales. El profesor Dr. Tung Dju Lin, quien trabajaba para la *Portland Cement Association* en Chicago, creyó que sólo el hormigón sería capaz de soportar tan duras condiciones ambientales. El hormigón solar sería similar al material con el que los asteroides han sobrevivido miles

¹⁴National Aeronautics and Space Administration.

de millones de años. En los años siguientes se creó un comité denominado *Lunar Concrete Committee*, encabezado por el Dr. Lin. Se consiguió fabricar hormigón lunar a partir de un material muy común en la Luna: la ilmenita (FeTiO_3). Calentándolo a $800\text{ }^\circ\text{C}$ en una atmósfera de hidrógeno se obtiene hierro, titanio, oxígeno y vapor de agua. El gran problema para fabricar hormigón lunar es conseguir hidrógeno, energía necesaria para alimentar la reacción química. La solución se encuentra en el polvo lunar que cubre totalmente el satélite: el regolito. Por cada tonelada de regolito se puede conseguir hasta un kg de hidrógeno, una cifra no pequeña si se aprovecha el proceso para obtener otras materias primas. Siguiendo la filosofía *ISRU* (*in situ resources utilization*), es decir, aprovechar al máximo los recursos que se pueden encontrarse sobre el terreno, es posible aprovechar el material lunar para pavimentar las superficies que facilitarán el transporte y las comunicaciones sobre la Luna, construir plataformas para el alunizaje y la salida de las expediciones, además de proporcionar escudo de protección solar para las operaciones robóticas.

Vemos pues como un material milenario, que ha permitido los más grandes logros en las estructuras de las grandes obras de ingeniería y arquitectura, toma un nuevo impulso a finales del siglo XX, para proyectarlo con gran fuerza y vitalidad, hacia un futuro esperanzador permitiendo una revolución en el mundo de los nuevos materiales. Hoy podemos ya modelar nuevos materiales a partir de su comportamiento mecánico, y, a partir de las exigencias requeridas, modelizar un material hecho a medida. En el mundo de los materiales, el futuro ya es hoy.

1.9. Conclusiones

El hormigón primero, el hormigón armado después y más modernamente el hormigón pretensado y postensado, han permitido una gran evolución en la construcción durante siglos. A finales del siglo XX, cuando parecía que el hormigón entraba en una fase de madurez, las nuevas tecnologías de los materiales en campos tan dispares como la química, la nanotecnología o la ciencia de los materiales, han permitido aplicaciones que lo proyectan al futuro con más fuerza si cabe. Sus grandes prestaciones en comparación con su bajo coste, lo convierten en un material indispensable en la construcción y la obra civil. La combinación inicial del hormigón con el acero, básicamente en forma de barras de diferente calibre, ha dado paso, más modernamente, a la utilización del acero en forma de fibras, mallas y otros formatos diversos, que permiten al hormigón ser utilizado en aplicaciones cada vez más dispares, a veces muy alejadas de la ingeniería civil o de la construcción, su hábitat natural. Los avances científicos y tecnológicos han permitido grandes avances, no solo en la durabilidad, aumento de su resistencia y reducción de la fluencia, sino que han permitido mejorar casi a voluntad las características físico-químicas del material revolucionando sus aplicaciones futuras. Hablar hoy en día de hormigones inteligentes, autolimpiables, captadores de energía, transparentes... ya no es una utopía.

Por otro lado, la combinación clásica de armar el hormigón con barras de acero, ha dado paso a combinaciones cada vez más sofisticadas, como la utilización de materiales conocidos como *FRP* (*Fiber Reinforced Polymers*). Estos permiten reforzar —que ya no armar— las zonas traccionadas mediante el uso de fibras de vidrio, carbono o aramida, por poner algunos ejem-

plos, lo cual permite nuevas aplicaciones mucho más libres e imaginativas que las conocidas hasta la fecha, dado que no necesariamente se han de colocar en el interior de la mezcla, mejorando en muchos casos las limitaciones de la combinación de los materiales clásicamente utilizados. Las excelentes características mecánicas de los nuevos materiales, conjuntamente con su ligereza y fácil aplicación, ya permiten hoy en día aplicaciones más que notables.

1.10. Líneas futuras

Parece evidente que la utilización masiva de estos nuevos materiales deberá ir acompañada con una reducción de su coste, hoy todavía elevado, y de una mayor facilidad de aplicación. La construcción juntamente con la agricultura, son dos de las más antiguas técnicas cultivadas por la humanidad, y que revolucionaron en el Neolítico nuestra forma de vivir. La construcción ofrece una gran inercia al cambio, es por ello que la aplicación de las nuevas técnicas debe orientarse hacia los elementos prefabricados que permiten con mayor facilidad su aplicación industrial. La disminución del peso, mejora en los formatos y sobretodo todo aquello que permita una drástica disminución del coste total del producto, han de permitir sin duda una gran difusión del sistema.

En cuanto a la obra ya construida, en el campo de la rehabilitación y refuerzo estructural, los nuevos *FRP* pueden competir con absoluta solvencia con las técnicas tradicionales, aportando valores hoy en día insustituibles como son la rapidez de ejecución emparejada con una manipulación relativamente sencilla, aunque eso si, en manos de personal técnicamente preparado.

Bibliografía seleccionada

- PICON, A. *L'art de l'ingénieur*. Editions du Centre Pompidou, 1997.

Se trata de un libro fundamental para conocer la historia de la ingeniería de la construcción, incluyendo por supuesto la historia del hormigón, con un amplio abanico de las figuras claves que la han protagonizado.

- TORROJA MIRET, E. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Consejo superior de investigaciones científicas, CSIC, 2008.

Un clásico sobre las tipologías estructurales, pero también sobre los materiales con las que están construidas y sus propiedades. Torroja, tal vez uno de los mejores ingenieros del siglo XX, aborda en este libro cuales han sido las diversas soluciones estructurales, históricamente utilizadas, explicando de una forma didáctica, su funcionamiento mecánico. Especialmente interesante, es el apartado dedicado a las láminas de las cuales Torroja fue uno de los precursores.

- RICE, P. *Un ingeniero imagina*. Cinter divulgación técnica, 2009.

La traducción del libro de Peter Rice, ha permitido, al gran público, acceder a los artículos de pensamiento estructural y constructivo de uno de los más interesantes ingenieros del

pasado siglo. Padre de la técnica conocida como *High Tech*, Rice atribuye a la cualidad de los materiales de construcción, uno de los aspectos más relevantes en la categorización de las estructuras.

Referencias

- [1] ACHE. *II Jornadas de enseñanza del hormigón estructural*. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE), Madrid, 2007.
- [2] ASLAND. *El Cemento Portland y sus aplicaciones*. Compañía General de Asfaltos y Portland - Asland, 1926.
- [3] BOSCH, J.-L., CHAUVEAU, J.-M., CLÉMENT, J., DEGENNE, J., MARREY, B., AND PAULIN, M. *Joseph Monier et la Naissance du Ciment Armé*. Éditions du Linteau, 2001.
- [4] CHOISY, A. *El arte de construir en Roma*. Editorial Reverte, 1999.
- [5] COLLINS, P. *Concrete: The Vision of a New Architecture*. McGill-Queen's University Press, 2004.
- [6] FRANCE COMMISSION DU CIMENT ARMÉ. *The properties and design of reinforced concrete*. D Van Nostrad Company. New York, 1912.
- [7] GIEDION, S. *Espace, temps, architecture*. Denoël, 2004.
- [8] GOTTHARD, F. *Tratado del hormigón armado. Tomo I y II*. Ed. Gustavo Gili, 1971.
- [9] GROTE, J. *Freyssinet: La precontrainte et l'Europe, 1930-1945*. Editions du Linteau, 2000.
- [10] GUYON, Y. *Hormigón pretensado - Estudio teórico y experimental*. Editorial Dossat, 1950.
- [11] LE CORBUSIER. *Vers une architecture*. Flammarion, 1995.
- [12] LEONHARDT, F. *Estructuras de hormigón armado. Tomo V: hormigón pretensado*. Editorial El Ateneo, 1986.
- [13] MARREY, B. *Les ponts modernes, 20e siècle*. Picard, 2000.
- [14] ORDONEZ, J. A. F. *Eugene Freyssinet*. 2c Ediciones, 1978.
- [15] PEÑA BOEUF, A. Un siglo de hormigón armado en España. *Revista de Obras Públicas* 101, 1 (1953), 23–32.
- [16] PICON, A. *L'art de l'ingénieur*. Editions du Centre Pompidou, 1997.
- [17] RICE, P. *Un ingeniero imagina*. Cinter divulgación técnica, 2009.
- [18] SIMONNET, C. *Hormigón. Historia de un material. Economía, técnica, arquitectura*. Editorial Nerea, San Sebastián, 2009.
- [19] VIOLLET-LE DUC, E. *La Construcción Medieval, 2 Ed.* Instituto Juan de Herrera, 2000.
- [20] VITRUVIO POLIÓN, M.L. *Los diez libros de arquitectura (Memoria)*. Literatura - Obras maestras Iberia, 2010.