

# El arte de proyectar y construir estructuras

primera parte

**Con la participación del doctor Helene iniciamos esta sección donde personalidades del mundo del cemento y del concreto nos brindarán sus valiosas reflexiones e ideas..**

En la Edad Media, en catedrales como la de Notre Dame, los constructores exploraron —con sus arcos góticos y bellos espacios internos— los límites de sofisticación y combinación de la roca natural, bien trabajada, como materia estructural.



◀◀ Página 1 de 1 ▶▶

Nuestro invitado especial es profesor titular de la Universidad de Sao Paulo, USP, así como Presidente del Instituto Brasileño del Concreto, IBRACO N. Ha presentado más de 192 documentos publicados en congresos, conferencias y diarios y es miembro de diversos comités científicos. Entre las distinciones que le han otorgado están el Prêmio “La Giralilla de La Habana” por su trayectoria profesional, el Award of Merit, del International Concrete Repair Institute, sólo por mencionar dos reconocimientos.

Al contemplar la historia de la humanidad, principalmente el aspecto escrito por obras de arquitectura e ingeniería, es interesante constatar cómo los grandes cambios en la forma de construir se deben al descubrimiento de nuevos materiales estructurales y cómo el dominio del conocimiento sobre los materiales estructurales han marcado el poder y desarrollo de las naciones a lo largo de los años. Pero,

si reflexionamos un poco vemos que no son muchos los materiales constructivos de dichas estructuras; por lo tanto, los arquitectos e ingenieros siempre tuvieron que utilizar creativa e inteligentemente esas escasas opciones a través de proyectos y obras originales. Al respecto, se pueden enumerar los principales materiales estructurales y apenas llegan a cinco: madera, arcilla y cerámica, roca, acero y concreto armado y presforzado. El hielo, el coral, el bambú, y otros materiales, no pasan de ser “curiosidades regionales”. El concreto de cemento Portland es el más reciente de los materiales constructivos de estructuras; puede ser considerado uno de los descubrimientos más interesantes de la historia. Su descubrimiento a fines del siglo XIX y su uso intensivo en el XX, lo transformaron en el material más usado por el hombre después del agua, revolucionando el arte de proyectar y construir estructuras cuya evolución siempre estuvo asociada al desarrollo de las civilizaciones a lo largo de la historia de la humanidad.

En la antigüedad, los egipcios fueron grandes constructores; dominaron el arte de construir estructuras con bloques de roca, pero no agotaron el potencial de ese material. Tiempo después, los ingenieros medievales usaron la piedra en la construcción de espectaculares iglesias góticas, explorando los límites constructivos de estructuras en roca. Cabe decir que la roca comenzó a ser utilizada como tecnología alrededor de 2,750 a.C. en Egipto, permaneciendo como el más importante de los materiales estructurales por 4,500 años hasta la llegada del acero y de las estructuras metálicas, con la revolución industrial (de 1750 a 1850).

**Los arquitectos egipcios inventaron los métodos y procedimientos para trabajar correctamente la roca como un material de construcción de estructuras estables y durables, en sustitución de la madera y la arcilla.**

## Concreto, desarrollo, ciencia y tecnología

Dos de las más desarrolladas y poderosas sociedades actuales —la estadounidense y la canadiense— consideran la inversión en el estudio de las estructuras de concreto como una de las más importantes inversiones en ciencia y tecnología para obtener y mantener la calidad de vida de sus pueblos y el liderazgo de su parque industrial. Esas sociedades entienden que el profundo conocimiento sobre el concreto coloca y mantiene a su industria en la frontera del saber, asegurando su alta competitividad.

Hasta hace casi dos décadas, en 1989, la National Science Foundation de Estados Unidos y el National Research Council de Canadá aprobaron el apoyo financiero a los consagrados programas del Center for Advanced Cement-Based Materials (ACBM)<sup>2</sup>, en la universidad de NorthWestern y Béton, Canadá<sup>3</sup>, en Sherbrooke, en el entendido de que el estudio del concreto debe estar incluido en el conocimiento estratégico de la “inteligencia” de sus países al lado de los recursos naturales, salud, biotecnología y electrónica del espacio exterior, entre otros. Con la misma visión moderna e incluyente, la Federal Highway Administration (FHWA), en Estados Unidos y la Comunidad Europea han hecho grandes inversiones buscando un conocimiento de las estructuras de concreto. Esas sociedades han comprendido, desde hace años, que ese material y sus estructuras aún tienen mucho por desarrollarse por lo que vale la pena apostar a ese conocimiento.

El resultado no podía ser mejor. El concreto de cemento Portland ha experimentado tal evolución en las dos últimas décadas que se puede llamar una verdadera cuarta revolución en el arte de proyectar y construir estructuras. La reconocida revista Scientific American ([www.sciam.com](http://www.sciam.com)) publicó más de 250 documentos en los últimos diez años sobre descubrimientos y desarrollos en el concreto. Por su parte, Science News on line ([www.sciencenews.org](http://www.sciencenews.org)) ha publicado numerosas innovaciones en tecnología del concreto tales como HPC; HSC; UHPC; Translucid concrete (Concreto translúcido); GFRC; SFRC; Self-cleaning concrete (Concreto con autolimpieza); Reactive concrete powder (Polvo reactivo de concreto); Fibers concrete (Concreto con fibras), y muchas otras. También la revista Popular Science Magazine ([www.popsc.com](http://www.popsc.com)) reconoce el “conductive concrete” (concreto conductor) como la más importante innovación del mundo en 1996 (una década atrás). Por su parte, en 2005/2006, el National Building Museum, en Washington, Estados Unidos, presentó la exposición New architecture in concrete, cariñosamente llamada “Liquid stone”, con 30 innovaciones en el campo de la tecnología y de las estructuras de concreto. En Francia, el Musée des Arts et Métiers, en París, estuvo presentando de 2005 a 2007, la gran exposición Bétons: Étonnez-vous! (Concretos: ¡Asómbrese!), en donde es posible sorprenderse con la historia y la contribución del concreto para mejorar la salud y la calidad de vida de los pueblos. Esa es la visión que se pretende dar, en este artículo, a ese material de construcción: un material actual y de importancia vital para la economía y para el llamado “construbusiness” (negocio de la construcción); fundamental para la arquitectura moderna; rico y versátil para escribir la historia contemporánea a través de monumentos originales y durables; y principalmente, un material fundamental para el desarrollo de la ciencia aplicada, de la ingeniería y de la calidad de vida de un pueblo, suficiente e indispensable para estar entre las inversiones prioritarias tanto en las grandes como en las pequeñas naciones.

### **Los primeros pasos en el proyecto y la construcción de estructuras**

Para entender las otras tres primeras grandes revoluciones en el arte de proyectar y construir estructuras, se debe comenzar retrocediendo 48 siglos cuando la sociedad egipcia reconoció la enorme contribución del brillante político y alquimista Imhotep<sup>4</sup>, nombrado, por primera vez en la historia de la humanidad, con el título de Arquitecto, ya que la denominación de ingeniero civil se adoptaría muchos siglos después. La denominación de arquitecto se debe exactamente al hecho de que él había proyectado y construido la primera pirámide durable del planeta —la pirámide escalonada de Zoser, hecha en bloques de roca— así llamada en homenaje al entonces faraón Zoser. Ese mausoleo, que substituyó a los anteriores, probablemente de madera, arcilla y cerámica, se mostró mucho más durable y competente para proteger para la eternidad los restos momificados de los faraones.

Eso ocurrió alrededor de 2,750 a.C. y esa forma de proyectar puede ser considerada la primera gran revolución. Los egipcios, mejor dicho, Imhotep, introdujo —probablemente sin saberlo— el concepto de vida útil en la construcción civil. Para tener una idea de la revolución que eso representó para la sociedad egipcia y para la humanidad, se puede citar que, muchos siglos después, otros pueblos apenas daban sus primeros pasos en el arte de construir estructuras. Por ejemplo, en Inglaterra, otro monumento monolítico, Stonehenge<sup>5</sup> —que data de 2,300 a. C., o sea, después de más de 300 años— era todavía mucho menos elaborado desde el punto de vista de la ingeniería de las estructuras.

Los arquitectos egipcios habían descubierto los métodos y procedimientos para trabajar correctamente la roca como un material de construcción de estructuras estables y durables, en sustitución de la madera y la arcilla, hasta entonces los más usados. Apenas 200 años después —no sin antes sufrir por algunos colapsos de otras pirámides que los ayudaron a evolucionar— los arquitectos egipcios proyectaron y construyeron la pirámide de Khufu, en homenaje al faraón Khufu o Keops, considerada una de las 7 maravillas de la antigüedad, con 147 m de altura.

Con ese material de construcción, consiguieron levantar una de las más durables y resistentes obras de ingeniería de la humanidad; ahora con cerca de 4,500 años, aún majestuosa, muestra al mundo el poder y el desarrollo de la civilización egipcia. Después, otras grandes civilizaciones, tales como la griega, la persa, la

romana, la maya, la inca, la azteca, y los grandes arquitectos de la Edad Media y del Renacimiento utilizaron la roca y escribieron la historia de la humanidad por medio de sus obras seguras, hermosas, funcionales y durables, que complementan e ilustran la historia tradicional escrita con letras y palabras en pergaminos.

**Los cimientos del puente de Brooklyn, en Nueva York, fueron contruidos originalmente en albañilería de bloques de roca, pues no había aún concreto armado**

En la Edad Media, Las catedrales de Colonia y Notre Dame exploraron —con sus arcos góticos y bellos espacios internos— los límites de sofisticación y combinación de la roca natural, bien trabajada, como materia estructural. Las edificaciones de esa época, entre tanto, estaban restringidas a vanos en forma de arcos o bóvedas con dimensiones inferiores a 45 m, paredes soportantes, pisos y cubiertas planas de madera y con vanos muy limitados, lo que impedía construcciones altas y con grandes espacios internos.

### **Las maravillosas estructuras metálicas**

La segunda gran revolución en el arte de proyectar y construir estructuras, ocurrió con la Revolución industrial; es decir, a fines del siglo XVIII y principios del XIX, con la llegada del acero para la construcción de estructuras. Fue entonces cuando la ingeniería consiguió construir puentes de grandes claros. El primero de ellos fue el puente metálico construido en 1781, en arco y todavía con modestos 30 m de luz, denominado Coalbrookdale Bridge, situado en Telford, región reconocida como el centro de la revolución industrial, en Inglaterra, y que hasta ahora se encuentra en uso peatonal.

En 1883, los norteamericanos sorprendieron al mundo construyendo el puente de Brooklyn, en Nueva York. Es interesante notar que los cimientos de ese puente fueron contruidos originalmente en albañilería de bloques de roca, pues no había aún concreto armado. Se trataba y trata de un puente suspendido por cables de acero galvanizado, patentados y proveídos por John Augustus Roebling, propietario de la más famosa casa de cables y cuerdas de acero de la época. Roebling acabó también proveyendo cables para el Golden Gate (de 1936), con cimientos de concreto. Todavía en el siglo XIX, utilizando de manera magistral este nuevo material de construcción, Gustave Eiffel proyectó y construyó una de las más emblemáticas obras de ingeniería: la torre Eiffel. Hasta esa época el acero estructural venía siendo utilizado principalmente para construir puentes y torres, empleándose poco en edificios que aún continuaban siendo contruidos con paredes estructurales de albañilería portante y pisos de madera.

Para alcanzar un uso más amplio fue necesario que el que era hasta entonces un nuevo material de construcción de estructuras —el acero estructural— y la tecnología derivada de éste, recibiesen el impulso de dos importantes descubrimientos y de sus respectivas patentes. El primero, en 1853 en el estado de Nueva York, en donde Elisha Graves Otis desarrolló el primer elevador seguro, sin riesgo de quedarse atorado, utilizado aún en edificaciones altas en el mundo. En la práctica, el primer elevador eléctrico Otis fue instalado en 1889 en un hotel de Nueva York. El segundo —también en los Estados Unidos— es la contribución de Leroy Buffington, quien en 1888 patentó la forma de construir estructuras a través de un esqueleto reticular (pilones, vigas y losas) en sustitución de las paredes soportantes, que pasaron a tener apenas la función de protección, revolucionando la forma de proyectar y construir edificios.

Esos desarrollos dieron origen (en 1891), al inicio de los rascacielos, con la inauguración del edificio Wainwright, con 42 m de altura, en St. Louis, en Estados Unidos. Esa nueva forma de construir fue denominada como la Escuela de Chicago, considerándose al arquitecto Henry Sullivan como el gurú; a partir entonces, el proyecto y construcción de edificios se desarrolló enormemente, siendo la principal forma de construir hasta nuestros días.

**Continuará...**

### **Referencias**

1 El texto original fue escrito en portugués. La traducción de este idioma al español fue del prof. Gerardo Dávila.

2 A partir de 1989, en Estados Unidos, la National Science Foundation (NSF) reconoce la importancia y empieza a apoyar al Center for Advanced Cement-Based Materials (ACBM), liderado por el prof. Surendra Shah de la NorthWestern University, que junto con otras universidades y el NIST comienzan a investigar y a desarrollar el concreto de forma sistemática y científica, privilegiando tres temas: Waste material utilization (Uso de materiales de desecho); Life cycle prediction (Predicción del ciclo de vida), y High performance concrete (Concreto de alto desempeño).

3 En 1989, el National Research Council de Canadá, y el instituto Network of Centres of Excellence comenzaron a apoyar expresamente los 14 principales centros y áreas de investigación y desarrollo de Canadá, contándose cinco en el campo de Advanced technologies (Tecnologías avanzadas); tres en

Engineering and manufacturing (Ingeniería y manufactura); cinco en Health, human development and biotechnology (Salud, desarrollo humano y biotecnología), y uno en Natural resources and environment (Recursos naturales y desarrollo). El proyecto Béton Canadá, liderado por el Prof. Pierre-Claude Aitein de la Universidad de Sherbrook, tienen el siguiente objetivo: La misión de Concrete Canadá es la de posicionar a la industria de la construcción canadiense en la tecnología de punta del concreto, a fin de mejorar su competitividad. Además de otras universidades, se incluyen 65 empresas.

4 Imhotep es considerado como el primer arquitecto y médico conocido por su nombre en la historia. Diseñó la pirámide de Zoser, en Saqqara, Egipto. Pudo haber sido el creador del primer uso conocido de columnas en la arquitectura.

5 El cromlech de Stonehenge está compuesto de un círculo en el cual fueron dispuestos grandes megalitos. Su construcción data de entre 2,500 a.C. y 2000 a.C. Fue en 2200 a.C. cuando tomó su aspecto actual, para lo cual transportaron 32 bloques de arenisca desde las montañas de Preseli, al sudeste de Gales. Cfr. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).

## El arte de proyectar y construir estructuras

segunda parte

**En este número, entregamos al lector la segunda parte del texto que amablemente nos brindó el doctor Paulo Helene y donde hace un recuento histórico del arte de proyectar y construir.**

\* Se conserva la numeración original continuación de la primera parte del texto, publicado en el número anterior. (Nota del editor).

Anunciantes



◀◀ Página 1 de 1 ▶▶

El concreto como material estructural Aunque el concreto simple se aplicó exitosamente en centenares de kilómetros de avenidas y pavimentos del imperio romano como en la Vía Apia —aún existente en los alrededores de Roma— su uso más espectacular fue en la cúpula de mayor vano libre de la antigüedad, el Panteón de Roma, con 44 m de luz, cuyo claro libre fue superado solamente en 1912, con la cobertura de un centro de exposiciones en Alemania<sup>6</sup>. Se trataba de un concreto primitivo, obtenido de la mezcla de cal hidratada con arcilla puzolánica, abundante en la región de Pozzuoli (cerca de Nápoles), que se transformaba en un material durable pero de baja resistencia, comparada con las resistencias actuales.



*En el concreto usado en el Panteón, en Roma, se trata de una mezcla de cal hidratada con arcilla puzolánica, abundante en la región de Pozzuoli, que se transformaba en un material durable pero de baja resistencia, comparada con las resistencias actuales.*

En esa cúpula se utilizó con maestría todo el saber de la época<sup>7</sup>, contraventeando los esfuerzos horizontales de la base con paredes estables y estructuras de 6 m de largo; el espesor de la cúpula es variable y decreciente desde los apoyos al centro; el concreto tiene densidad variable y decreciente de los apoyos al centro a través del uso de diferentes agregados (calcáreo, carbón, ladrillo, y piedra poma); los moldes son de bronce con cajones tipo “cubetas” para reducir el peso del material y

hacer eficiente la densificación y acabado superficial.

Después de esa hazaña estructural, la ingeniería no usó más ese concepto como material estructural en obras importantes y, al parecer, se olvidó ese conocimiento por muchos siglos.

*La estructura en concreto armado del Cristo redentor, en el Corcovado, en Río de Janeiro, fue construida in situ en lo alto de la ladera, haciendo uso de pocas partes prefabricadas.*



El concreto de la era actual tuvo inicio sólo después de creada la patente del cemento Portland por John Aspdin, en 1824, en Inglaterra. En esos primeros años, lo mismo en Estados Unidos, que en Francia e Inglaterra —las tres naciones más desarrolladas de la época— tuvo poca aplicación significativa, destacándose las patentes de los franceses Joseph-Louis Lambot (en 1855), para construir barcos, y de Joseph Monier para construir contenedores en 1867 (y postes y vigas, en 1878), básicamente en argamasa armada.

A Monier también se acredita el proyecto y la construcción del primer puente de argamasa armada, inaugurado en 1875 en el Castillo de Chazelet.

Valorando el potencial de ese nuevo material estructural, el ingeniero alemán Gustav Adolf Wayss compró la patente de Monier y desarrolló el uso del concreto armado, dando gran impulso a su empresa Wayss & Freytag a partir de 1875, empresa que en los primeros años del siglo XX tuvo gran influencia en Brasil, Uruguay y Argentina, a través de sus filiales. Para 1878, Thaddeus Hyatt, patentó en Estados Unidos el concreto armado y en 1893 construyó el primer edificio en California, pero es más lento que los alemanes y franceses en la transferencia de esta nueva tecnología a los demás países.

En el Siglo XIX, investigadores de la talla de Louis Vicat<sup>8</sup>, Henry Le Châtelier<sup>9</sup>, y René Féret<sup>10</sup> trataron de hacer ese nuevo material —el concreto de cemento Portland— más conocido y más confiable, dando como resultando un gran interés en su uso generalizado en estructuras. Por su parte, con la base teórica y experimental sobre la confiabilidad de este nuevo material estructural, garantizado por ese y otros investigadores, y disponiendo de un producto industrializado, el constructor francés François Hennebique, desarrolló el sistema y obtuvo una patente, en 1892, para el proyecto y la construcción de edificios con base en el nuevo proceso constructivo bautizado por él como *béton armé* (concreto armado).

Hennebique —quien también proyectó y construyó el primer puente de concreto armado en Châtellerault, en 1899— demostró que había resuelto los problemas de uniones y amarres entre las vigas, pilares y losas. Para demostrar las ventajas y seguridad de este nuevo sistema constructivo, proyectó y construyó el primer edificio totalmente de concreto armado, con pilones, vigas, y losas, sistema similar al que hoy se practica en todo el mundo. Además, demostró que era posible, seguro y durable, sustituir las paredes soportantes por paredes de protección, y los pisos metálicos o de madera por losas de concreto armado, inaugurando en 1901 un edificio de 7 pisos en donde sentó su residencia y oficina de negocios.

Su descubrimiento representa una tercera revolución, tan impresionante en la forma de proyectar y construir estructuras que, en apenas una década, su empresa construyó más de 7,000 edificios y construyó 62 oficinas esparcidas en las principales ciudades de los cuatro principales continentes de la época: Europa, América, África y Asia. El principal slogan de su negocio era: "Nunca más un riesgo de incendio". Gracias a los métodos de cálculo desarrollados por Möersch y Köenen en Alemania, y Coignet y Hennebique en Francia, en 1903, en Suiza y Alemania se publican las dos primeras normas de proyecto y ejecución de estructuras de concreto armado, seguidas por Francia en 1906, por Inglaterra en 1907, y por Estados Unidos en 1910.

Grandes cambios	Periodo y lugar	Obra emblemática	Proyectista	Comentarios
Primera revolución.	2,800 a.C. a 2,500 a.C., Egipto.	Pirámide de Zozer.	Imhotep.	La ingeniería y la arquitectura de estructuras podían construir obras durables y majestuosas de grandes proporciones.
Segunda revolución.	1179 Coalbrookdale, Inglaterra.	Iron bridge.	T.M. Pritchard con acero producido por Abraham Darby III.	La ingeniería estructural y la arquitectura podían proyectar obras antes inimaginables, en un menor tiempo y con seguridad para lograr grandes claros y construir en altura.
Tercera revolución.	1901, París, Francia.	Edificio Hennebique, rue Danton 1.	Francois Hennebique.	La ingeniería y la arquitectura estructural podían usar más recursos pues descubrían cómo combinar dos materiales: el concreto y el acero.
Cuarta revolución.	1997, Kuala Lumpur, Malasia.	Torres Petronas.	Arquitecto César Pelli; proyecto estructural de Thornton Tomasetti.	La ingeniería estructural y la arquitectura descubren las ventajas de la rigidez del concreto de alto desempeño así como sus beneficios para la sustentabilidad de la construcción civil

En Brasil se publicó la primera norma en 1931 después de haber proyectado e impuesto dos récords mundiales de altura, los edificios A Noite, en Río de Janeiro y el Martinelli, en Sao Paulo, ambos a fines de la década de los veinte, con más de 100 m de altura. Un poco antes —a mediados de la década de los veinte— el Palacio Salvo, en Montevideo, por primera vez alcanzó los 100 m de altura y pudo ser considerado el primer rascacielos de concreto armado en el mundo. A principios de la década siguiente, el rascacielos Kavanah, en Buenos Aires, alcanza la impresionante altura de más de 120 m en 1935 pasando a ser el edificio de concreto más alto del mundo.

Las cuatro grandes marcas de la evolución de las estructuras El concreto armado fue para Brasil, Argentina, Uruguay y otros países —en los cuales no existía industria siderúrgica capaz de producir perfiles estructurales— el más importante material estructural de construcción civil de la primera mitad del siglo XX, y continúa así hasta ahora.

En 1928, en Francia, Eugène Freyssinet<sup>12</sup> insertó su nombre en la historia al patentar el concreto presforzado que dio un enorme impulso al uso de las estructuras de concreto, no solamente para edificios, haciendo posible las losas planas, sino también para puentes, posibilitando procesos constructivos tan atrevidos con equilibrios sucesivos para vencer grandes claros sin necesidad de apoyos.

En ese corto tiempo, el proyecto de estructuras había cambiado radicalmente. Ya no eran necesarios los arcos y bóvedas para vencer los claros, ni apoyos tradicionales, ni varios materiales sobrepuestos, ni paredes estructurales para soportar cargas; bastaban pilones, vigas y losas de concreto. Cabe recordar que data de esta época el proyecto de construcción de la estatua de Cristo redentor, en Río de Janeiro, situada sobre el Corcovado.

El proyecto estructural fue del ingeniero brasileño Heitor da Silva Costa con la colaboración de Albert Caquot, reconocido proyectista estructural francés. Para el diseño artístico, contó con la colaboración del artista plástico brasileño Carlos Oswald y del polaco Maximillien Paul Landowski, quien era un reconocido escultor en Francia. La estructura en concreto armado fue construida in situ en lo alto de la ladera, haciendo uso de pocas partes prefabricadas.

Los sacos de cemento, arena, armaduras, cimbras, moldes, además del agua y del revestimiento final en piedra jabón, se subieron a repecho por las vías del pequeño tren de Corcovado, construido por don Pedro II. Inaugurado el 12 de octubre de 1931, el Cristo Redentor es considerado Patrimonio de la humanidad desde 1937 y santuario católico desde 2006. Hoy, con 76 años de edad, su estructura ha requerido apenas dos intervenciones para mantenimiento realizadas en las décadas de los ochenta y noventa, y que la caracteriza como de ejemplo de vida útil.

Por otro lado, la construcción civil de edificios en los países desarrollados ha usado intensivamente del acero estructural. Fue notable el desarrollo de la ingeniería de estructuras metálicas. En la misma época, en 1931, se

inauguraba el Empire State Building, en Nueva York, con 383 m de altura, sorprendiendo a la ingeniería mundial y colocándose como el gran símbolo de poder y desarrollo de la civilización norteamericana. Conviene subrayar que durante los primeros noventa años del siglo XX, las estructuras metálicas para edificios altos prevalecieron sobre las de concreto, habiendo cambios solamente a finales de la década de los noventa.

### **La supremacía del concreto**

En 1976, la ingeniería canadiense impresionó al mundo con la construcción —en tiempo récord— de la CN Tower, hoy perteneciente a la CLR Real Estate Canada Lands Company; hecha en concreto presforzado y con 555 m de altura, está considerada hasta ahora la más alta estructura construida por el hombre, gracias a la osadía del arquitecto John Andrews y dos ingenieros proyectistas de NCK Engineering.

Otra marca de la ingeniería del concreto actual es el edificio que introdujo el estilo constructivo high-tech, inaugurado por los franceses en 1990: el gran arco de La Defense, en las cercanías de París, construido con concreto de alto desempeño. Fue proyectado utilizando en gran parte el concreto estructural presforzado, por los arquitectos Johann Otto von Spreckelsen y Paul Andreu.

En 1997, en Kuala Lumpur, Malasia, se dio un paso enorme en dirección de la cuarta revolución en el arte de proyectar y construir estructuras, con la construcción de las torres Petronas, en concreto de alto desempeño y con 452 m de altura, superando la estructura metálica de la torre Sears, en esa época la más alta estructura de un edificio en el mundo, situada en Chicago.

Con el proyecto arquitectónico de Cesar Pelli y el proyecto estructural de la firma americana Thornton Tomasetti, esa obra emblemática puede ser considerada parteaguas, pues a partir de ese periodo el mundo de las estructuras de edificios altos adopta definitivamente el concreto de alto desempeño como su principal protagonista.

De acuerdo con los inventarios del Council on Tall Buildings and Urban Habitat, relatados por Gilberto do Valle en el 48° Congreso Brasileño del Concreto (Río de Janeiro, 2006), existen cinco nuevos edificios con altura superior a los 450 m, entre ellos: el edificio Taipei 101 Shanghai World Financial Centre, en Taiwan, inaugurado en 2004, con 509 m de altura, construido con estructura mixta de acero y concreto de alto desempeño.

En los últimos 10 años, a partir de la construcción de las Torres Petronas (1997), hay 36 nuevos edificios con altura superior a los 300 m —que es el nuevo criterio para considerarse un rascacielos— que ya fueron construidos o están en construcción en el mundo. De ese total, trece son estructuras de concreto, incluyendo el más alto del mundo —actualmente en construcción en los Emiratos Árabes Unidos— denominado Burg (torre) Dubai, con una altura probable de 750 m, y que será inaugurado en 2008. De los 36 citados, otros 19 son en estructura mixta de concreto y acero, y sólo cuatro son estructuras enteramente de acero.

### **Conclusiones y perspectivas futuras**

En 100 años, el concreto, “vital construction material” (material vital de construcción), según el ACBM, superó todos los límites y fronteras del conocimiento en ingeniería de proyectos y de construcción. Se trata del más nuevo material de construcción estructural descubierto por la ingeniería, el cual todavía se encuentra en franca evolución, no siendo posible prever su futuro ni definir sus límites.

La historia reciente ha demostrado que aún vale la pena investigar, proyectar, dosificar y construir, buscando siempre obtener más provecho de ese versátil material de construcción, explorando su elevado desempeño y usándolo correctamente desde el punto de vista de la protección ambiental y de sustentabilidad.

En la última década, muchas empresas y proyectistas del mundo —a veces sin estar plenamente conscientes— han sacado provecho de las nuevas tecnologías desarrolladas por los grandes centros de investigación y desarrollo en concreto, como el ACBM y el FHWA en los Estados Unidos, el Béton Canadá, en Canadá, y muchos otros en Europa, Asia y Australia. Tan sólo en Brasil, hay cerca de 130 Centros de Investigación y Desarrollo en concreto registrados en el sistema de ciencia y tecnología del país.

Las investigaciones, estudios y experimentos en esos centros generan tranquilidad y seguridad en los proyectistas, constructores y usuarios que, cada vez más, vienen prefiriendo esa opción revolucionaria de construcción de estructuras, encontrando mucho material de consulta y soporte para sus proyectos y alternativas de construcción. Investigación, conocimiento, confianza, y permanente transferencia de tecnología, son los pilares de sustentación del creciente y pujante mercado de las estructuras de concreto en el mundo actual.

### **Referencias**

6 Lepik, Andrés, Sky Scrapers, Nueva York, Prestel publishing, 2004.

7 Concreto. Ensino, pesquisas e realizações, ed.G.C. Isaia, Sao Paulo, Instituto Brasileño del Concreto, IBRACON, 2005, p. 01-43.

8 Louis Vicat (1786-1961) fue un ingeniero francés, inventor del cemento artificial. Se graduó en la École Polytechnique en 1804 y en la École des Ponts et Chaussées en Vicat estudió el fraguado de morteros e inventó nuevos cementos artificiales (white gold) en 1817. El material fue popular, pero fue sustituido por el cemento Portland. También inventó la aguja Vicat que aún está en uso para la determinación del tiempo de fraguado de los concretos y los cementos. Fue miembro de la Académie de Sciences de París. Cfr. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).

9 Henry Louis Le Chatelier (1850-1936). Químico francés. Fue ingeniero consultor para una compañía de cemento, la Société des

Chaux et Ciments Pavin de Lafarge. Su tesis doctoral en 1887 fue dedicada al tema de los morteros: Investigaciones experimentales sobre la constitución de los morteros hidráulicos. Le Chatelier fue electo a la Academia de Ciencias de París, en 1907. Cfr. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). Para mayor información sobre este personaje, consultar el artículo "Recordando a un genio", de Juan Luis Cottier Caviedes, en *Construcción y tecnología*, de febrero de 2007 (Nota del editor).

10 René Ferét fue jefe del Laboratorio de Puentes y carreteras; en 1892 formuló la ley fundamental que relaciona la resistencia a compresión de las argamasas con su compactación. (Helene, Paulo, Terzian, Paulo, *Manual de dosagem e controle dos concretos de cimento Portland*, Sao Paulo, PINI, 1993-350 p.

11 Helene, Paulo, Terzian, Paulo, *Manual de dosagem e controle dos concretos de cimento Portland*, Sao Paulo, PINI, 1993, 350 p.

12 Eugène Freyssinet (1879-1962) fue un ingeniero estructural y civil francés. Trabajó en la École Nationale des Ponts et Chaussées en París, en donde diseñó varios puentes hasta la Primera Guerra Mundial. Su más significativo puente —de los primeros que construyó— fue el de Le Veurdure, de tres claros, cerca de Vichy, construido en 1911. En ese tiempo, los claros de 72.5 m eran los más largos construidos hasta entonces. La propuesta de Freyssinet era para tres claros de armaduras de concreto reforzado, y resultó significativamente menos costoso que el diseño de arcos de mampostería estándar. El diseño utilizó gatos para elevar y conectar los arcos, introduciendo efectivamente un elemento de presfuerzo. El puente también permitió a Freyssinet descubrir el fenómeno de fluencia en el concreto, por el que el concreto se deforma con el tiempo cuando se coloca bajo esfuerzo.

Él diseñó varios tramos grandes de cascarón delgado, incluyendo hangares para aviones en Orly. También construyó barcos de carga con concreto. Obtuvo una patente para el concreto presfuzado en 1928. Cfr. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).