



Informe Especial

Supremacía de Concreto Como Material Estructural

Paulo Helene



Asocem
ASOCIACION DE PRODUCTORES DE CEMENTO

Mayo 2013

Supremacia de Concreto como Material Estructural*

Paulo Helene

Prof. Titular da Universidade de São Paulo, Escola Politécnica
Diretor da PhD Engenharia
paulo.helene@concretophd.com.br

Conferencia dictada en la Asamblea General de la FICEM. 2012.



Por Prof. Paulo Helene

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar el concreto, su historia, su composición básica y sus propiedades, resaltando la contribución de la tecnología del concreto en la evolución de las estructuras y el desarrollo de la humanidad.

El concreto de cemento Portland es el material estructural más importante en la actualidad. Incluso con los últimos materiales de construcción de las estructuras, puede ser considerado como uno de los descubrimientos más interesantes de la historia del desarrollo de la humanidad y su calidad de vida.

Su descubrimiento a fines del siglo XIX y su uso intensivo en el siglo XX, lo transformaron en el material de más consumo por el hombre después del agua, revolucionó el arte de proyectar y construir estructuras, cuya evolución siempre estuvo asociada con el desarrollo de las civilizaciones a lo largo de la historia humana.

En la antigüedad, los egipcios fueron grandes constructores y dominaron el arte de la construcción de las estructuras con bloques de piedra, pero no agotaron el enorme potencial de este material. Los ingenieros de la edad media también llevaron este noble método a conducir la más bella, utiliza este noble material con la construcción de las iglesias góticas espectaculares, explorando los límites en construcción de estructuras en piedra.

La piedra comenzó a ser utilizada con tecnología alrededor del año 2750 a.C. en Egipto, y continuó como líder de los materiales estructurales para 4500

años, hasta el advenimiento del acero y de las estructuras metálicas, producto de la Revolución Industrial (1750-1850 d.C.).

En el Brasil, así como en otros países del mundo, el concreto tiene un papel destacado, siendo el principal y más utilizado material de construcción. Al mirar la historia de la humanidad, sobre todo uno 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 como el dominio del conocimiento sobre los materiales estructurales marcaron el desarrollo de las naciones a lo largo de los años.

2. Concreto, evolución, ciencia y tecnología

Dos de las más desarrolladas y poderosas sociedades actuales los Estados Unidos y Canadá, consideran que la investigación y el estudio de las estructuras de concreto, tal como uno de grandes inversiones en ciencia y tecnología para obtener y mantener la calidad de vida de sus pueblos y el liderazgo de su parque industrial. Estas sociedades entienden que el profundo conocimiento sobre el concreto posiciona y mantiene a su industria en la frontera del conocimiento, asegurando su alta competitividad.

* Conferencia dictada en la Asamblea General de la FICEM. 2012

¹ Desde 1989, los Estados Unidos, la National Science Foundation NSF reconoce la importancia y apoya la ACBM Center for Advanced Cement-based Materials, dirigidos por el Prof. Surendra Shah, de la Universidad Northwestern, que junto con otras universidades y del NIST (National Institute of Standards and Technology) están investigando y desarrollando la forma concreta sistemática y científica, haciendo hincapié en tres temas: el uso de residuos; predicción de la vida útil y el concreto de alto rendimiento.



Hace dos décadas, en 1989, la National Science Foundation en los Estados Unidos y el Consejo Nacional de Investigación de Canadá aprobaron el apoyo financiero expreso a los programas consagrados de la ACBM Center for Advanced Cement-Based Materials¹.

En la Universidad de Northwestern y Béton en Sherbrooke, Canadá², entendiendo que el estudio de concreto debe estar constituido en el conocimiento estratégico la "inteligencia" de sus países al lado con los recursos naturales, la salud, la biotecnología, electrónica, y el espacio exterior de otro tipo.

Con la misma visión moderna y completa, la FHWA Federal Highway Administración de los Estados Unidos y la Comunidad Europea han invertido en mejor conocimiento de las estructuras de concreto. Estas sociedades entienden, hace años, que este material y sus estructuras ayudan mucho en el desarrollo y que vale la pena apostar en ese conocimiento.

El resultado no podría ser mejor. El concreto de cemento Portland presentó enormes progresos en las últimas dos décadas, lo que se puede llamar una verdadera cuarta revolución en el arte de proyectar y construir estructuras.

² En 1989, la National Research Council de Canadá, estableció la Red de Centros de Excelencia (Red de Centros de Excelencia) que ahora soporta de manera significativa los 14 principales centros y áreas de investigación y desarrollo en Canadá. El proyecto Béton Canadá (Concreto Canadá), dirigido por el Prof. Pierre-Claude Aitcin Universidad de Sherbrook, tuvo los siguientes objetivos: la misión Concreto de Canadá está poniendo industria de la construcción canadiense en la posición de liderazgo de la tecnología del hormigón, para fortalecer su competitividad. Además de otras universidades participan 65 empresas.

³ www.sciam.com

⁴ www.sciencenews.org

⁵ www.popsci.com

La Scientific American³ reconocido científico publicado más de 250 documentos en los últimos años diez años en investigación y desarrollo en el concreto. La Science News on line⁴ tiene frecuentemente publicadas muchas innovaciones en la tecnología del concreto tales como Concreto de Alta Performance (High Performance Concrete); concreto de alta resistencia (High-Strength Concrete), (Ultra-High Performance Concrete); translúcido de concreto (translucid concrete); concreto reforzado con fibra de vidrio (Glass Fiber reinforced Concrete), concreto armado con fibra de acero (Steel Fiber Reinforced Concrete); Concreto Autolimpiante (Self-cleaning concrete); Concreto con Polvo reactivo (Reactive Powder Concrete); concreto con fibras (Fibers Concrete), y muchas otras.

También la consagrada Popular Science Magazine⁵ reconoció la conductora "concreto "(conductive concrete) como la mas importante innovación en el año 1996 (hace una década). Una década a tras en los años 2005/2006, la National Building Museum en Washington, Estados Unidos, presentó una exposición en ingles de Nueva exposición en concreto (New Architecture in Concrete), cariñosamente llamado "liquis Stone" (piedra líquida) con 30 innovaciones en el campo de la tecnología y de las estructuras de concreto. En Francia, el Musée des Arts et Métiers de París, estuvo presentando del 2005 a 2007, la maravillosa exposición "Betons: étonnez-vous" (Concreto: sorpréndelos), donde fue posible admirar como la historia y la contribución del concreto han mejorado la salud y la calidad de vida de los pueblos.

Esa es la visión que se pretende dar a este material de construcción en este trabajo, un material actual y vital



para la economía y los negocios de construcción llamado "Construbusiness", un material fundamental para la arquitectura moderna, un material 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 grandes como en las pequeñas naciones.

3. Los primeros pasos

Para entender a las tres primeros grandes revoluciones en el arte y el proyectar estructuras, se debe comenzar a retroceder más de 48 siglos atrás, cuando la sociedad egipcia efectuó una enorme contribución política y alquimista Imhotep⁶, nombrado por primera vez en la



Pirámide escalonada considerada la primera pirámide en roca que fuera proyectada y construida por el hombre, su autor Imhotep es considerado el primer arquitecto de la humanidad.

(<http://www.utexas.edu/courses/classicalarch/images.html>)

⁶ Imhotep está considerado como el primer arquitecto de la historia. Diseño de la Pirámide de Djoser (pirámide escalonada) en Saqqara Egipto. Puede haber sido el responsable de la primera utilización de columnas en la arquitectura.

historia humana, con el título de Arquitecto, ya que la denominación de ingeniero civil sería adoptado muchos siglos después.

La destacada denominación de arquitecto se debe exactamente al hecho de haber proyectado y construido la primera pirámide del planeta, escaló la pirámide Djoser (Fig. 1), todos en bloques de piedra, llamada así por el entonces emperador egipcio Djoser. Este mausoleo, que sustituyó a los anteriores, efectuados con madera, cerámica y arcilla, demostró ser mucho más durable y competente para proteger para la eternidad los restos momificados de los dos emperadores egipcios.

Es alrededor del año 2750 a.C, que esta forma de proyectar y construir pudo ser considerada como la primera gran revolución. Los egipcios, mejor dicho, el arquitecto Imhotep introdujo, probablemente sin saber, el concepto de vida útil en la construcción civil. Para tener una idea de la revolución que representó para la sociedad egipcia y la humanidad puede mencionar que incluso muchos siglos, otros pueblos de la antigüedad todavía se iniciaban en el arte de construir estructuras. Por ejemplo, en Inglaterra, otro monumento histórico, también en roca, denominado Stonehenge⁷, que data aproximadamente del año 2300 a. C., es decir, después de más de 300 años, todavía era mucho menos elaborado desde el punto de vista de la ingeniería estructural.

Los egipcios Arquitectos habían descubierto los métodos y procedimientos adecuados para trabajar

⁷ Se compone de un gran círculo de megalitos cuya construcción se fecha entre los años 2500 aC y 2000 aC En el 2200 aC hizo su aparición actual, cuando se transportaron 32 bloques de las montañas de Preseli, Gales suroeste, la Gran Bretaña.



Figura 2. Pirámide de Keops, considerada la más majestuosa pirámide del antiguo Egipto. Uno de los siete maravillas de la antigüedad. (<http://www.carpom.hpg.ig.com.br/Piramide6.jpg>)

correctamente la piedra como material de construcción de estructuras, estables y durables de madera, en sustitución de arcilla y hasta ahora el más utilizado. Aproximadamente 200 años después, no sin antes ser víctimas de algunos colapsos de pirámides que ayudaron a su evolución, los arquitectos proyectaron construyeron la pirámide egipcia Khufu (Fig. 2), en homenaje al emperador Keops, también conocido como Keops, considerada como una de las 7 maravillas de la antigüedad, con una impresionante altura 147m.

Pirámide de Khufu, considerada la pirámide mas majestuosa del antiguo Egipto y uno de las 7 maravillas de la antigüedad.

Con este material de construcción, ellos consiguieron construir uno de los más durables y resistentes obras de la humanidad, ahora cerca de 4500 años, y todavía existente y majestuoso, mostrando al mundo el poder y el desarrollo de la civilización egipcia. Mucho más tarde, otras grandes civilizaciones tales como: la griega,

la persa, la romana, los mayas, los incas, los aztecas y los grandes arquitectos de la Edad Media y del Renacimiento hicieron uso de la roca y escribió la historia de la humanidad a través de sus obras, seguras, hermosas, funcionales y durables, que complementan e ilustrar la historia tradicionales y palabras sobre pergaminos.

Las catedrales de Colonia y de Notre Dame exploraron sus arcos góticos y bellos espacios interiores, en los límites de sofisticación y combinación de la roca naturales, buen trabajo como material estructural. Las construcciones de este tiempo, sin embargo, eran restringidas en vanos en forma de arco o abovedadas con dimensiones inferiores a 45m, paredes portantes, pisos y coberturas planas de madera con luces limitadas, e impedía las construcciones en altura y con grandes espacios internos.

4. Las maravillosas estructuras metálicas

La 2da gran revolución en el arte de proyectar y construir estructuras ocurrió con la Revolución Industrial, es decir, a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, con la llegada de la producción de acero apto para la construcción de estructuras. Fue entonces que la Ingeniería consiguió construir puentes de grandes luces. El primero fue el puente de metal construido en arco y con modestos 30m de luz en 1781, denominado Puente Coalbrookdale , ubicado en Telford, región conocida como el centro de la Revolución Industrial, Inglaterra, y que hoy se destina al tránsito peatonal.



Figura 3. El majestuoso puente de acero en Brooklyn, Nueva York, abrió sus puertas en 1883. (http://home.hia.no/~magnb04/NYC_New_York_Brooklyn_Bridge_from_World_Trade_Center_b.jpg)



Figura 4. Torre Eiffel en París, con 312m de altura supera la altura de la pirámide de Keops, con 147m hasta el momento la estructura más alta construida por Ingeniería

En 1883, los norteamericanos sorprendieron al mundo construyendo el maravilloso puente Brooklyn, en Nueva York, estrella de películas hasta la fecha (Fig. 3). Es interesante notar que la cimentación de ese puente se construyó originalmente en bloques de mampostería de piedra, pues todavía no se había extendido el concreto armado. Se trata de un lindo puente suspendido con cables de acero galvanizado, patentado y suministrados por John Augustus Roebling, propietario de las más consagradas y famosas de las casas y cuerda de alambre de acero de la época. Roebling proveyó los cables del puente Golden Gate, inaugurado en 1936, con cimientos de concreto, y cientos de otros, incluyendo el Puente Leonel Viera, entre Maldonado y Punta del Este, Uruguay inaugurado en 1963.

También en el siglo XIX, magistralmente con este nuevo material de construcción, Gustave Eiffel, en Francia, proyectó y construyó una de las más

emblemáticas obras de ingeniería, la majestuosa torre de Eiffel (Fig. 4), inaugurada en 1889, con 312m altura, superando por primera vez después de 4400 años, la altura de la pirámide egipcia de Khufu, monumento más alto hasta ese entonces construido por el hombre. Desde su inauguración, esta torre despierta el interés y la curiosidad de millones de visitantes a París, habiendo recibido en el año 2006 más de 6,5 millones de turistas. Hasta esa fecha el acero estructural era utilizado principalmente para construir puentes y torres, siendo poco empleado en edificios que todavía eran construidos con paredes portantes y albañilería y pisos de madera.

Para alcanzar una mayor posibilidad de uso también fue necesario que este nuevo material de construcción de estructuras de acero estructural y la tecnología resultante, recibiera dos importantes descubrimientos y sus patentes. La primera, en 1853 en el estado de Nueva York, donde Elisha Graves Otis desarrolló el



Figura 5. Edificio Wainwright en St. Louis, Estados Unidos, considerado como uno de los primeros "rascacielos" en estructura metálica con una altura de 42m, inaugurado en 1891 (http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Wainwright_building_st_louis_US_A.jpg)



Figura 6. Cúpula del Panteón de Roma construido en concreto en masa, utilizando áridos ligeros, puzolana y cal 118-125 A.D.

primer elevador sin riesgo de caída que es utilizado hasta hoy en día en los edificios más altos en el mundo. En la práctica, el primer ascensor eléctrico de Otis se instala en el año 1889 en un hotel de Nueva York. El segundo descubrimiento también patentado en los Estados Unidos en 1888, por Leroy Buffington, fue la forma de construir estructuras mediante una estructura de celosía (pilares, vigas y losas) para reemplazar las paredes portantes, y tener la función de cierre, revolucionando la forma de proyectar y construir edificios⁸.

Estos desarrollos dieron origen en 1891, al inicio de la construcción de rascacielos con la inauguración del edificio Wainwright con 42m de altura en St. Louis (Fig.

5) en los Estados Unidos. Esta nueva forma de construir fue conocida como la "Escuela de Chicago", siendo el arquitecto Louis Henry Sullivan considerado como un icono y a partir de la construcción de edificios en altura se desarrolló hasta la actualidad, como la principal forma de construcción.

5. El concreto como material estructural

A pesar de que el "concreto simple", ha sido magníficamente aplicado en centenas de kilómetros de caminos y aceras del Imperio Romano como la Vía Apia, existente hasta hoy en los alrededores de Roma, su uso mas espectacular fue la cúpula de mayor luz libre de la antigüedad, el Panteón de Roma, con 44m de luz (Fig. 6), que fue superado recién en 1912, en un centro de

⁸ LEPIK, Andres. *Sky Scrapers*. New York, Prestel publishing, 2004. ISBN 3-7913-3155-8



exposición de Alemania.

Se trataba de un concreto primitivo, obtenido mediante la mezcla de cal con arcilla puzolánica, abundante en la región de Pozzuoli, en las cercanías de Nápoles, que se transformaba en un material muy durable, pero con bajas resistencias comparadas con la actualidad. Esta cúpula fue utilizada con todo el conocimiento de la época⁹, contrarestando los esfuerzos horizontal con paredes de 6m de longitud; el espesor de la cúpula era variable y decreciente de los apoyos al centro; se utilizaron diferentes agregados, ladrillos y piedra pómez, carbón, formas de bronce, tipo cubetas para reducir el peso del material y una consolidación eficiente y un acabado superficie. 8 LEPIK, Andres. Sky Scrapers. New York, Prestel publishing, 2004. ISBN 3-7913-3155-8

Después de esta hazaña de la ingeniería estructural no se volvió a utilizar el concreto como material estructural en obras importantes y este conocimiento desapareció por muchos siglos.

El concreto actual tuvo inicio únicamente después de la patente del Portland por John Aspdin¹⁰ en 1824 en Inglaterra. En estos primeros años, incluyendo Estados Unidos, Francia y Gran Bretaña, que fueron las tres naciones más desarrolladas de la época, tuvo escasa aplicación significativa. Destacando las patentes de los francés Joseph-Louis Lambot en 1855 para construir

barcos, y Joseph Monier para construir masetas en 1867 (y los postes y vigas en 1878), básicamente en mortero armado. Monier también acreditó un proyecto de la construcción del primer puente de mortero armado, inaugurado en 1875 en el castillo de Chazelet¹¹.

Percibiendo el potencial de este nuevo material estructural, el ingeniero alemán Gustavo Adolf Wayss compró la patente de Monier y ha desarrollado el uso del concreto armado, dando gran impulso a su empresa Wayss & Freytag a partir de 1875, en el cual la empresa en 1900 tuvo una gran influencia en Brasil, Uruguay y Argentina, a través de sus filiales.

En la misma época, en 1878, Thaddeus Hyatt, patentó en los Estados Unidos el concreto y en 1893 construyó el primer edificio en California, pero perdió ante alemanes y franceses la velocidad de transferencia de esta nueva tecnología a los demás países.

En el siglo XIX, investigadores de la talla de Luis Vicat¹², Henry Le Châtelier¹³ y Féret¹⁴ René trataron de formar este nuevo material, con mayor conocimiento y mayor confiabilidad, resaltando el interés de su uso generalizado en estructuras.

¹² Louis Vicat (1786-1861) ingeniero francés, inventor del cemento artificial. Estudió morteros tiempo de manejo e inventó nuevos cementos artificiales en 1817. También inventó la aguja Vicat que todavía se utiliza para calcular el tiempo de mango concreto y cemento.

¹³ Henry Louis Le Chatelier (1850-1936) químico francés, ingeniero consultor de empresa cementera Société des Chaux et Ciments Pavin de Lafarge.

¹⁴ René Féret fue jefe del Laboratorio de "Ponts et Caminos", París, y en 1892 formuló la ley fundamental que relaciona la resistencia Mortero de compresión con su compacidad. (HELENE Paul & Terzian, Paul. Dosificación y Control Manual Concreto de Cemento Portland. São Paulo, PINI, 1993. 350 p.

¹⁵ Hennebique François (1842-1921), el constructor francés, considerado como el inventor de estructuras de concreto armado. En 1879 construyó la primera losa de concreto y, en 1892, el primer edificio con este material.

⁹ Isaia, C. Gerard Concreto: la era clásica contemporánea. Capítulo 1. En: CONCRETO. Enseñanza, Investigación y Logros. ed. G. C. Isaia. São Paulo, Brasil Concrete Institute IBRACON, 2005. p. 01-43 Aspdin

¹⁰ John nació en Leeds, Yorkshire County, Inglaterra, el 21 de octubre de 1824, solicitó la patente N.º 5022 de "... una mejora en el método de producción de piedra artificial.."

¹¹ de mortero de cemento armado o denominaciones Armadas fueron el tiempo para Concreto Armado hoy.



Figura 7. Dibujo de un diseño típico y la construcción de edificios con estructuras de concreto de acuerdo con la patente Hennebique en 1892.

Con la base teórica y experimental sobre la fiabilidad de este nuevo material estructural, asegurado por esos y otros investigadores, y, que tiene un producto industrial, el francés François Hennebique¹⁵ constructor, desarrolló sistema y obtuvo una patente en 1892 para un proyecto y construcción de edificios con base a ese nuevo proceso constructivo que denominó concreto armado. Cuya primera figura se muestra en la figura 7.

Hennebique, que también proyectó y construyó el primer puente de concreto armado en Chatellerault, en 1899, mostró que había resuelto los problemas de conexión entre vigas, pilares y losas. Para demostrar las ventajas y seguridad de este nuevo sistema constructivo, proyectó y construyó el primer edificio completamente de concreto armado, similar al que hoy se lleva en la práctica en todas las naciones del mundo.

Demostró que era posible, segura y duradera, sustituir las paredes portantes y pisos metálicos o de madera o losas de concreto armado inaugurando en 1901 un edificio de 7 pisos, donde fijó su residencia y oficina, tal



Figura 8. La construcción de Hennebique. Rue Danton n.1. Quartier Latin, París, 1901. Vida útil probado por más de 110 años!

como se muestra en la Figura 8.

Su descubrimiento representó una tercera revolución tan importante en la forma de construir estructuras, que en tan sólo una década, su empresa construyó más de 7000 edificios y estableció 62 oficinas técnicas en las principales ciudades de mundo, en los cuatro continentes más importantes de la época: Europa, América, África y Asia. El principal slogan de su negocio fue: "... nunca más riesgo de incendio ...".

Gracias a los métodos de cálculo desarrollados por el Möersch⁸ y Köenen⁸ Alemania y Coignet⁸ y Hennebique en Francia en 1903, Alemania y Suiza publicaron las dos primeras normas para el proyecto y ejecución de estructuras de concreto armado, seguidas por Francia en 1906, y por Inglaterra en 1907, y posteriormente por los Estados Unidos en 1910.

El Brasil publica su primera norma en 1931¹⁶, después de haber proyectado y construyó dos récords mundiales de altura, los edificios de una noche en Río



de Janeiro y Martinelli en Sao Paulo, ambos a fines de la década del 20, con más de 100 metros de altura. Un poco antes, a mediados de la década del 20 el Palacio Salvo en Montevideo (Fig. 9), por primera vez alcanza 100m de altura y puede ser considerado el primer rascacielos de concreto armado del mundo. En la década siguiente, los Rascacielos en Kavanagh Buenos Aires supera impresionante una altura de 120 m en 1935 y pasa a ser el edificio en concreto, específicamente, el más alto del mundo.

6. Las 4 principales hitos de la evolución estructural.

El concreto armado fue para Brasil, Argentina, Uruguay y otros países en los que no había industria siderúrgica capaz de producir formas estructurales, el más importante material estructural de construcción civil de la primera mitad del siglo XX, y continúa hasta hoy.

Eugenio freyssinet¹⁷ en 1928 en Francia inscribe su nombre en la historia patentando el concreto pretensado que dio enorme impulso al uso de estructuras de concreto. No solamente para edificios haciendo posible losas planas sino también para puentes empleando con procesos constructivos para vencer grandes luces sin necesidad de columnas.

En unas pocas décadas, el proyecto de estructuras se había radicado cambiado radicalmente. Ya no eran

¹⁶ HELENE, Paulo & TERZIAN, Paulo. *Manual de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland*. São Paulo, PINI, 1993. 350 p. ISBN 85-7266-007-0.

¹⁷ Eugène Freyssinet (1879-1962) Engenheiro civil francês, especializado em Engenharia Estrutural, pioneiro do concreto protendido, do qual obteve patente em 1928.



Figura 9. Palacio Salvo en Montevideo, Uruguay, el primer rascacielos en el concreto mundo, inaugurado en 1925. Diseñado por el arquitecto Mario Palanti

necesarios para ganar arcos y elementos abovedados para vencer vanos, ni las columnas tradicionales en varios materiales superpuestos, en paredes estructurales para soportar cargas, siendo suficiente pilares, vigas, y losas de concreto.

Por otra parte, la construcción civil o de edificios en los países desarrollados hacían uso intensivo del acero estructural. Era notable el enorme desarrollo de la Ingeniería de estructuras metálicas que, en la misma época, en 1931, inauguraba el edificio del Empire State en Nueva York, con 383m de altura, sorprendiendo a la ingeniera mundial y colocándose el mayor logro del poder del desarrollo de la civilización americana. Durante los primeros años del siglo XX, las estructuras metálicas para edificios altos prevalece sobre el concreto, habiéndose alterado esta situación únicamente a fines de la década del 90, conforme se muestra el cuadro 1.



Cuadro 1. Síntesis de las cuatro grandes revoluciones en el arte de proyectar y construir estructuras

Grandes cambios	Periodo	Obra emblemática	Proyectista	Comentarios
1ª revolución	2800 a.C. a 2500 a.C.	Pirámide escalonada de Djoser – Egipto	Arquitecto, alquimista, político Imhotop – Egipto.	La ingeniería y la arquitectura de las estructuras podían construir obras durables, majestuosas y de grandes proporciones
2ª revolución	1779	Puente Iron en Coalbrookdale – Inglaterra	Arquitecto T. M. Pritchard producido por Abraham Darby III Inglaterra.	La ingeniería estructural y la arquitectura podían proyectar obra anteriormente inimaginable con velocidad y seguridad para vencer grandes luces, con alturas sin precedente.
3ª revolución	1901	Edificios Hennebique Rue Danton Nº1. Paris – Francia.	Constructor Francois Hennebique – Francias.	La ingeniería y la arquitectura estructural podían llegar a mucho mas, con el descubrimiento de dos materiales fantásticos, el concreto tenían la durabilidad de la roca y era compatible con el acero al que protegía eternamente.
4ª revolución	1997	Edificio Petronas Tower – Kuala Lumpur – Malasia.	Arquitecto Cesar Pelli – Argentina. Proyecto estructura de Thornston Tomasetti. Estados Unidos.	La ingeniera estructural y la arquitectura descubren las ventajas del concreto de alto desempeño, y sus beneficios para la sostenibilidad para la construcción civil.

7. La supremacía de concreto

En 1976, la ingeniera Canadian impresiona al mundo con la construcción en tiempo récord de la CN Tower, hoy perteneciente a las "CLC Real Estate Canada Lands Company" en concreto pretensado con 555m de altura considerado hasta hoy la mas alta estructura hasta hoy construida gracias a la osadía del

arquitecto John Andrews y NCK ingenieros de diseño de ingeniería.

Otro hito de la ingeniería de concreto actual es el edificio que introdujo el moderno estilo "high-tech" edificio inaugurado por los franceses en 1990, en el llamado "La Grande Arche" en distrito de La Defense, en las cercanías de París, construido con concreto de



Figura 10. Torre Petronas en Kuala Lumpur, Malasia, el primer edificio en la parte superior de concreto de alto desempeño que superó los edificios de metal altura de 1997.

([Http : //www.diritto-internazionale.com/guide/Petronastower2.jpg](http://www.diritto-internazionale.com/guide/Petronastower2.jpg))

alta de desempeño. Fue proyectado utilizando gran medida el concreto pretensado por los arquitectos Johann Otto von Spreckelsen y Paul Andreu.

En 1997, en Malasia, en la ciudad de Kuala Lumpur, se dio paso a la dirección de la cuarta revolución en el arte de diseño y construcción de estructuras, con la construcción de Petronas Twin Towers en concreto de alto desempeño y con 452m, de altura superando la estructura metálica de la Torre Sears, en la época la más

alta de la estructura Mundial, situada en Chicago. El proyecto arquitectónico se debió al consagrado arquitecto argentino Cesar Pelli y el proyecto estructural de la renombrada oficina americana Thornton Tomasetti, esta obra emblemática puede ser considerada como un divorcio acuático a partir de ese período, el mundo de las estructuras de edificios altos definitivamente adopta el concreto de alto desempeño como su principal protagonista (Fig. 10).

De acuerdo con las encuestas de "CTBUH - Consejo de Edificios Altos y Urbanos Hábitat", informadas por Gilberto do Valle en el 48° Congreso Brasileño de concreto efectuado en Río de Janeiro en 2006, hoy ya existen cinco nuevos edificios con una altura superior a 450, entre ellos: el edificio Taipei 101 "Shanghai World Financial Center" en Taiwán inaugurada en 2004 a 509 millones en altura, construido con estructura mixta de acero / concreto de alto desempeño.

También según Valle, en los últimos diez años, a partir de la construcción de las torres Petronas (1997), 36 nuevos edificios con altura superior a 300 metros, considerado como un nuevo umbral para este tipo de rascacielos fueron construidos en el mundo. De este total, 13 edificios tienen estructuras de concreto e inclusive el más alto del mundo, actualmente en construcción en los Emiratos Árabes Unidos, llamado Burg (torre) Dubai con 750m probable que se abra en 2008 (Fig. 11). De los 36 en la lista, otros 19 son estructura mixta de concreto / acero y solamente 4 en la estructura de acero.