



Uso del hormigón de altas prestaciones en columnas estructurales con vistas a la sostenibilidad

C. Britéz¹, J. Pacheco², S. Levy³, P. Helene⁴.

¹ PhD, Universidad de São Paulo. PhD Engenharia.

² Ingeniería, PhD Engenharia.

³ Profesor, Centro Universitário Nove de Julho.

⁴ Prof. Titular, Universidad de São Paulo. PhD Engenharia.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/r.a.v5i1.78>

Artículo recibido el 04 de octubre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 12 de enero de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2015 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2015.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 1, Enero – Abril 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C. Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893. alconpat.int@gmail.com. Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

En las últimas décadas, el concepto de construcción sostenible se ha abordado en varios proyectos de ingeniería en el mundo. La búsqueda de materiales que proporcionen proyectos con alta vida útil es un consenso en todo el mundo. Dicho esto, muchos investigadores no consideran al hormigón un material atractivo desde el punto de vista de la construcción sostenible. Este artículo intenta desvelar este panorama y presentar una aplicación de hormigón de altas prestaciones en columnas estructurales con vistas a los aspectos de sostenibilidad. Es un estudio de caso de un edificio situado en el municipio de São Paulo. Se observó que el concepto de construcción sostenible está absolutamente de acuerdo con el uso de hormigón de altas prestaciones en columnas estructurales.

Palabras claves: Construcción sostenible; vida útil; hormigón; hormigón de altas prestaciones.

ABSTRACT

In the last decades, the concept of sustainable construction has been addressed in several engineering projects in the world. The search of materials that provide more durable projects and with long service life is a worldwide consensus. Many researchers do not consider the concrete an attractive material from the standpoint of sustainable construction. This article aims to demystify this scenario and apply high performance concrete in structural columns aiming to sustainability issues. It is a case study of a building located in the municipality of São Paulo. It was noted that the concept of sustainable construction is absolutely in line with the use of high performance concrete in structural columns.

Keywords: Sustainable construction; service life; concrete; high performance concrete.

RESUMO

Nas últimas décadas, o conceito de construção sustentável e de sustentabilidade tem sido abordado em diversos projetos de engenharia espalhados pelo mundo. A busca por materiais que proporcionem projetos com elevada vida útil é um consenso mundial. Isto posto, muitos pesquisadores consideram que o concreto não é um material atrativo do ponto de vista de uma construção sustentável. Através de um estudo de caso de uma edificação localizada no município de São Paulo, este artigo busca desmistificar este panorama e, concomitantemente, apresentar uma aplicação do concreto de alta resistência em pilares estruturais com vistas aos aspectos de sustentabilidade. Observou-se que o conceito de construção sustentável está em concordância com o uso de concreto de alta resistência em pilares estruturais.

Palavras-chave: A construção sustentável; vida útil; concreto; concreto de alto desempenho.

Autor de correspondencia: Carlos Britéz (carlos.britez@concretophd.com.br)

1. INTRODUCCIÓN

Desde los principios de la humanidad, por instinto, el hombre busca satisfacer al menos tres necesidades básicas: alimentos (en busca de comida), abrigo y confort. Sin embargo, con el descubrimiento de la agricultura¹, desde hace unos 10.000 años, el hombre se dio cuenta de que podía producir sus propios alimentos, estableciendo así un vínculo con la tierra, dejando de ser nómada y convirtiéndose en el "dueño" de estos territorios fértiles.

Según Salvadori (2006), desde el descubrimiento de la agricultura, los abrigos o tiendas provisionales se reemplazaron por viviendas más sólidas y un fuego fijo empezó a ocupar el lugar central del ambiente. Un gran número de cabañas se fijó en regiones fértiles, el contacto entre las familias se hizo más frecuente e íntimo y surgieron los primeros pueblos, que se unirían por una red de senderos. Este hecho introdujo el concepto de la sociedad que hoy conocemos.

La necesidad de viviendas más sólidas condujo, indirectamente, a que los seres humanos buscaran recursos naturales que permitieran que las construcciones soportasen el clima, los vientos fuertes, lluvias e incluso la acción del fuego. En otras palabras, por instinto, la búsqueda del hombre sería encontrar una construcción con "vida útil" superior a la de las construcciones provisionales. Para este propósito, evidentemente, los seres humanos se dieron cuenta de la necesidad de utilizar materiales más resistentes y duraderos.

Las siguientes generaciones fueron observando, adaptando y creando nuevas formas de construcción duradera y este hecho, junto con el crecimiento de la población² de la Tierra, requirió cada vez más recursos naturales del planeta para uso en sus viviendas.

El uso desenfrenado de los recursos naturales combinado con la degradación del medio ambiente para la extracción y manejo de estas materias primas, así como su procesamiento y posterior eliminación, causó una gran preocupación mundial en relación a los aspectos del concepto de sostenibilidad.

Se entiende que la sostenibilidad es un concepto sistémico que puede definirse como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. En general, para que una empresa humana sea sostenible, tiene que cumplir cuatro requisitos básicos: debe ser ecológicamente racional, económicamente viable, socialmente justa y culturalmente aceptada. Así, la sostenibilidad es un principio que debe estar de acuerdo con tres campos vitales: social, económico y ambiental, como se ve en la ilustración de la Figura 1 (*Concrete Centre*, 2007).

¹ Esta información se extrajo del libro "Por que as estruturas ficam de pé" escrito por *Mário Salvadori*, que fue traducido al portugués en 2006. *Mário Salvadori* (1907-1997) fue profesor emérito de ingeniería civil y arquitectura en la Universidad de Columbia, miembro honorario del *American Institute of Architects* y autor de dieciocho libros, entre los cuales "*Why Buildings Fall Down*" en conjunto con *Matthys Levy* (Salvadori, 2006).

² La ONU publicó un documento en 1999 llamado "*The World at Six Billion*", donde es posible observar que sólo en los últimos doscientos años, la población mundial ha crecido de forma espectacular: en 1800 la población mundial alcanzó los 1000 millones de personas y a la fecha de elaboración del documento (1999) llegó a la cifra de 6 mil millones.

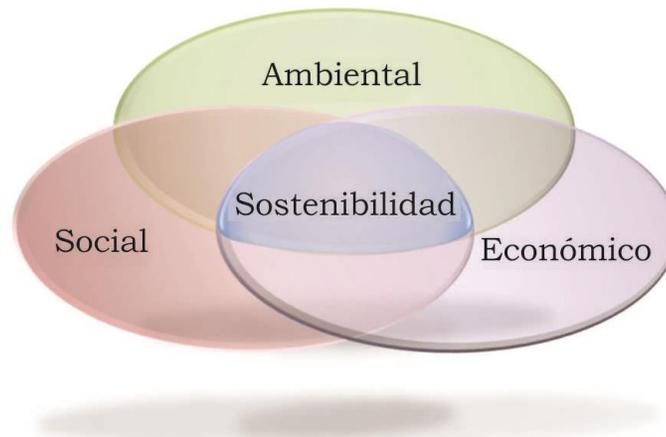


Figura 1. Configuración macro de sostenibilidad vinculada a tres campos vitales: social, económico y ambiental (adaptado de *Concrete Centre*, 2007)

En general, se observa que los recursos naturales finitos del mundo están siendo utilizados y desechados a un ritmo que el mundo no puede permitirse. Por otra parte, las emisiones causadas por el consumo de estos recursos están produciendo contaminación ambiental y la degradación está conduciendo a un cambio climático global. El impacto ambiental causado por los seres humanos ha sido repetidamente alertado por organizaciones³ repartidas por todo el planeta. Grandes movimientos para divulgar la degradación del medio ambiente están siendo promovidos en Brasil⁴ y en el mundo, aún así, el concepto de sostenibilidad todavía encuentra resistencias en algunos sectores de la sociedad, incluyendo el de la construcción.

La industria de la construcción consume una gran parte de los recursos naturales extraídos del planeta y en este escenario, el hormigón es en gran parte responsable por este consumo. Es importante destacar que el hormigón es el material más utilizado por la humanidad, después del agua (MEHTA, 2008). Por lo tanto, la inversión en alternativas que promuevan edificaciones sostenibles, se considera actualmente como el gran reto de la ingeniería mundial. En Brasil, el Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica – IDHEA es uno de los pioneros en la certificación de obras con características sostenibles.

Según IDHEA, el concepto de construcción sostenible se basa en el desarrollo de un modelo que permita que la construcción enfrente y proponga soluciones para los principales problemas ambientales de nuestro tiempo, sin renunciar a la tecnología moderna y que haga posible la creación de edificios que satisfagan las necesidades de sus usuarios.

De acuerdo con esta perspectiva, la construcción sostenible se comporta como un sistema que promueve cambios conscientes en el entorno, de modo que satisfaga las necesidades de construcción y uso del hombre moderno, preservando el medio ambiente y los recursos naturales, garantizando la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras.

³ Una de las organizaciones más activas en la defensa del medio ambiente es *Greenpeace*, que tiene un lema interesante, que se reproduce aquí, tomado de la publicación del IBRACON, **Concreto: ensino, pesquisa e realizações** cap. 50, escrito por el Prof. Dr. Salomon Levy: "Cuando el último árbol se haya caído, cuando el último río se haya secado, cuando el último pez haya sido pescado, la humanidad entenderá que el dinero no se puede comer" (Levy, 2007).

⁴ En Brasil, es importante destacar que el Río de Janeiro fue la primera ciudad que se adhirió al evento "Hora del Planeta", un movimiento mundial para combatir el calentamiento global. La iniciativa, conocida internacionalmente como *Earth Hour* incluye el gesto simbólico de apagar las luces de las casas a las 20:30hs y mantenerlas apagadas durante 60 minutos.

En este sentido, el enfoque de este artículo es abordar el uso del hormigón para el modelo de construcción sostenible, señalando que el caso en estudio es sólo una alternativa técnica que permite la reducción del volumen de hormigón en una estructura y no el cambio de características del mismo, tales como la incorporación de agregados reciclados o el uso de cemento ecológicamente correcto en la dosificación.

Los objetivos de este artículo son: (a) dar una visión general y analizar el uso del hormigón en la construcción sostenible; (b) describir el uso de hormigón de altas prestaciones, con vistas a los temas de sostenibilidad; y (c) promover la discusión del tema para investigadores y empresas de construcción.

2. HORMIGÓN SOSTENIBLE Y EL CONCEPTO DE VIDA ÚTIL

Según Mehta (2008), se estima que el consumo actual de hormigón en el mundo es del orden de 11 mil millones de toneladas por año. Si tenemos en cuenta que al menos una séptima⁵ parte de esta masa es la cantidad de cemento que se produce anualmente en todo el mundo, se obtiene un valor aproximado de 1,6 mil millones de toneladas.

Con respecto al cemento, Isaia y Gastaldini (2004) reportan que su producción consume 5,5GJ de energía y libera aproximadamente 1 tonelada de CO₂ por tonelada de clínker. Estos números traducidos significan que todo el cemento producido en todo el mundo corresponde entre 5% y 8% del total global de CO₂ emitido anualmente a la atmósfera. Teniendo en cuenta que 1 tonelada de cemento tiene alrededor del 70% de clínker, se observa que al año, la industria del cemento emite mil millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera.

Aunque las cifras no son relevantes frente al tema del CO₂ mundial (pues representan en promedio 6% del total emitido, pero evidentemente no se pueden ignorar), la producción de cemento para uso en hormigón se ha reformulando para seguir el desarrollo sostenible global. Básicamente hay dos formas de reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera causada por la producción de cemento: la reducción de la producción o la sustitución del "cemento puro" por uno o más aditivos minerales, en su mayoría subproductos industriales, como el caso típico de la escoria de alto horno o de las cenizas volantes, transformando el producto en "cementos ecológicamente correctos".

En la práctica, una iniciativa global adoptada por varios investigadores, incluyendo Brasil, es la sustitución de parte del cemento por escoria de alto horno y cenizas volantes de centrales eléctricas. Según Levy (2005), esta sustitución presenta ventajas técnicas, económicas y sobre todo ambientales, ya que puede reducir significativamente tanto las emisiones de CO₂ en la atmósfera, como el consumo de energía. Por lo tanto, ha sido posible reducir la producción de clínker, con un menor consumo de piedra caliza y, por consiguiente, disminuyendo la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera, tornando estos cementos más ecológicos.

En términos globales, es posible medir cuantitativamente el reflejo de las iniciativas sostenibles en el medio ambiente. En 2009, el *Concrete Centre* elaboró el documento "*The concrete industry – Sustainability performance report*" con indicadores de una reducción directa del 27% en las emisiones de CO₂ a partir de 1990, en la producción total de cemento en la región de Reino Unido. Otro documento elaborado por el *Concrete Centre* en 2005, llamado "*Civil Engineering – Sustainable solutions using concrete*" ofrece indicadores de las principales empresas cementeras

⁵ Esto corresponde a un hormigón con aproximadamente 350kg de cemento por metro cúbico.

del mundo donde, por ejemplo, *Lafarge Cement* redujo en 20% y el *Heidelberg Castle Cement* en 15%, la emisión CO₂ en sus producciones mundiales.

Sin embargo, el impacto ambiental del hormigón no sólo es causado por el cemento. Para la producción del hormigón también se consumen materiales como arena y grava. Según Klein (2008) e Isaia y Gastaldini (2004), se estima que 12 mil millones de toneladas de agregados se consumen a cada año. Por otra parte, teniendo en cuenta el impacto de la explotación, todo el procesamiento y el transporte de esta materia prima, se observa que el proceso de producción del hormigón afecta significativamente el medio ambiente. Además, a este montante se le debe añadir el consumo de más de mil billones de litros de agua al año.

Por lo tanto, se destaca que sólo el control de las emisiones de CO₂ en la producción de cemento no contribuye a la "salvación" del planeta, en lo que se refiere a los aspectos relevantes para la construcción sostenible, que utiliza al hormigón como material principal. Se necesita analizar el material aplicado a nivel global en la estructura y no los componentes individuales.

Se observa una interesante paradoja en esto: si el consumo de cemento y hormigón se utilizan como índices de desarrollo de una nación, como pueden, al mismo tiempo, utilizarse como índice de la degradación del medio ambiente?

Una de las respuestas es pensar acerca de la estructura, en la obra, en el producto final y no en los materiales por sí solos.

Teniendo en cuenta esta paradoja se puede aclarar que analizar la estructura, el producto final y no los materiales por sí solos, significa aplicar uno de los conceptos de ingeniería más importantes: el concepto de vida útil⁶.

Una construcción sostenible está directamente relacionada con el concepto de vida útil, ya que como lo señala Klein (2008), en general, el aumento de la vida útil ha sido una buena solución a largo plazo para la conservación de los recursos naturales, reducción de los impactos, ahorro de energía y preservación de los recursos naturales.

Se entiende que la vida útil es el período de tiempo durante el cual las estructuras se mantienen dentro de los requisitos mínimos de funcionalidad, desde que se cumplan las recomendaciones de uso y mantenimiento prescritas por el proyectista estructural y el constructor, y que se efectúen las reparaciones necesarias en caso de daños accidentales.

Las estructuras de hormigón se deben proyectar, construir y utilizar de tal modo que, bajo las condiciones ambientales previstas y respetándose las condiciones de mantenimiento preventivo especificadas en el proyecto estructural, conserven su seguridad, estabilidad, función y apariencia aceptable durante un período predeterminado de tiempo, sin necesidad de medidas adicionales de mantenimiento y reparación.

Al menos cinco alternativas se pueden adoptar para que el hormigón sea empleado cada vez más en construcciones sostenibles: actuar sobre los materiales, emplear agregados reciclados, utilizar hormigón autocompactante, hormigón de alta vida útil y hormigón de alta resistencia.

No es el objetivo de este documento estudiar todas estas alternativas, sin embargo, se discutirá el empleo de hormigón de alta resistencia en columnas estructurales mediante el estudio de un caso práctico. La finalidad principal consiste en demostrar que es posible utilizar un hormigón de alta resistencia (con un mayor consumo de cemento por metro cúbico) que satisfaga los requisitos de sostenibilidad, debido a la reducción del volumen total de hormigón de la obra y al aumento de su vida útil.

⁶ En Brasil, los períodos de vida útil se definen en la norma ABNT NBR 15575. Se recomienda también para este tema, consultar la norma BS 8500: 2006 "Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1".

3. ESTUDIO DE CASO PRÁCTICO

Los elementos estructurales (columnas) estudiados en este caso práctico pertenecen a *e-Tower*, un edificio comercial de 162m de altura y 42 pisos (incluyendo los 4 subsuelos), ubicado en la calle Funchal nº 418, Vila Olimpia, São Paulo, Brasil.

En este edificio se hormigonaron cinco columnas pasando por los cuatro subsuelos, la planta baja y los 4 primeros pisos, con un hormigón de $f_{ck} = 80\text{MPa}$ ⁷ a los 28 días de edad. En la Figura 2 se puede observar la perspectiva arquitectónica del edificio *e-Tower* (*Concrete International*, 2003).

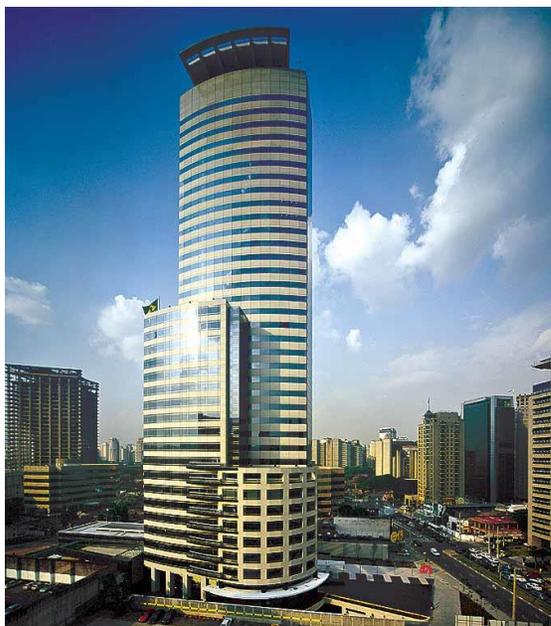


Figura 2. Perspectiva arquitectónica del edificio *e-Tower* en São Paulo, Brasil (*Concrete International*, 2003)

El hormigón de alta resistencia fue la solución técnico-económica presentada para el edificio *e-Tower*, debido a que se necesitaba reducir las dimensiones de las columnas de la fachada norte, que tenían una alta carga en los subsuelos. El estudio inicial proponía una sección del orden de $0,90\text{m}^2$, alrededor de $90\text{cm} \times 100\text{cm}$. Estas dimensiones se debían al hecho de haberse adoptado para toda la estructura una resistencia característica a la compresión, f_{ck} , de 40. Sin embargo, el proyecto arquitectónico solicitaba que las dimensiones máximas de estos elementos estructurales no excediesen $60\text{cm} \times 70\text{cm}$. Para esto, el f_{ck} del hormigón se aumentó a 80MPa en esas columnas y todo el cálculo estructural fue rehecho.

Según Helene (2005), lo que también llevó al uso de hormigón de alta resistencia, fue la distancia necesaria entre las columnas para permitir que se pudiesen proyectar dos plazas de estacionamiento de tamaño medio, con luz entre columnas de $4,20\text{m}$, al menos, siendo que $4,40\text{m}$ sería más aconsejable. En la ciudad de São Paulo, el Código de Obras establece que una plaza de estacionamiento de tamaño medio tenga, al menos, $2,10\text{m}$ de ancho. Por otra parte, de acuerdo

⁷ En 2002 Brasil recibió el reconocimiento de la comunidad internacional, cuando rompió el récord de hormigón de altas prestaciones en el mundo, en ese momento. Los detalles sobre el récord mundial se describen en el artículo: "HPCC in Brazilian Office Tower: High-performance colored concrete offers strength, thinner columns, more usable space, and aesthetics" (Hartmann & Helene, 2003). Se destaca que el hormigón alcanzó el valor promedio de 125MPa a los 28 días de edad.

con el proyecto aprobado en el Ayuntamiento, la mayor dimensión de las columnas paralela a las plazas, era 70cm. La modificación del proyecto de las columnas se puede ver en la Figura 3.

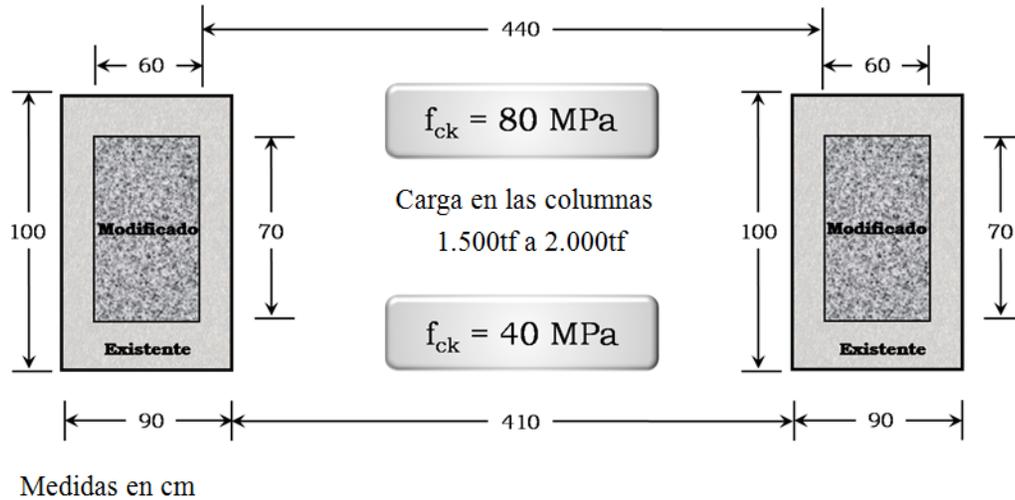


Figura 3. Edificio *e-Tower*: columnas existentes en el proyecto original de $f_{ck} = 40\text{MPa}$ (90cm x 100cm) y columnas modificadas con $f_{ck} 80\text{MPa}$ (60cm x 70cm)

Esta modificación del proyecto (la reducción del tamaño de las columnas) permitió que se pudiesen analizar los aspectos concernientes a la construcción sostenible. En términos de vida útil y sostenibilidad, uno de los principales mecanismos nocivos de una estructura de hormigón armado es la corrosión de acero.

Todo acero al carbono está permanentemente protegido en un ambiente altamente alcalino, con pH mayor que 12. Esta conclusión ha sido reconocidamente constatada en estructuras de hormigón de cemento Portland sin cloruros, porque los productos de hidratación de las reacciones de endurecimiento de los granos de cemento anhidros con el agua, liberan grandes cantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH y KOH , que son bases fuertes (Helene, 1986).

Esta capacidad de protección por pasivación se puede perder con el tiempo en función de varias acciones, de las cuales las principales son la penetración de cloruros y la reacción del dióxido de carbono CO_2 con álcalis de productos de hidratación, que tiene como resultado sales de baja alcalinidad, un fenómeno conocido como carbonatación del hormigón.

Cuando se aumenta la resistencia del hormigón, menor es el riesgo de corrosión de la armadura, dada la gran dificultad de penetración de agentes agresivos. Según Levy (2005), con poros menores y no conectados entre sí, el hormigón de altas prestaciones es menos susceptible a la acción de agentes agresivos, disueltos en agua, lo que aumenta su durabilidad y por lo tanto la vida útil de la estructura.

Según Kaefer *apud* Levy (2005), la resistencia del hormigón de altas prestaciones dosificado con humo de sílice u otras adiciones podría alcanzar entre 60MPa y 120MPa, mientras que el promedio brasileño al comienzo del siglo XXI, era de 20-25MPa. Así, el autor señala que un edificio podría tener columnas con dimensiones hasta 50% menores con la misma capacidad de carga.

En el caso en estudio se ha comprobado que las columnas modificadas sufrieron reducciones de área significativas, como se muestra en la Tabla 1. Debe destacarse que en el hormigón de altas prestaciones estudiado, se utilizó una cantidad de aproximadamente 35% de adiciones como sustitución de la cantidad total de cemento.

Tabla1. Datos obtenidos en el caso práctico estudiado sobre las columnas de hormigón de altas prestaciones del edificio *e-Tower*, con relación a las modificaciones del diseño

| | Proyecto Original | Proyecto Modificado | Reducción/aumento |
|--|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Resistencia a la compresión de las columnas estructurales f_{ck} (MPa) | 40 | 80 | 100% (aumento) |
| Dimensiones de la sección transversal de la columna (cm) | 90 x 100 | 60 x 70 | 53% (reducción) |
| Área de la sección transversal de la columna (m ²) | 0,90 | 0,42 | |

Del punto de vista del concepto de construcción sostenible, algunos parámetros importantes se lograron con este cambio de diseño: el aumento de la vida útil, la reducción del uso de recursos naturales, de los impactos ambientales, de la energía y del volumen total de hormigón en la obra (A pesar de que el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón fuese superior al del hormigón del proyecto original, con $f_{ck} = 40\text{MPa}$).

Específicamente, sobre el aumento de la vida útil, se adoptaron algunos valores estandarizados consagrados en la bibliografía⁸ para ilustrar la magnitud del crecimiento, como se muestra en la Tabla 2, donde se puede observar un aumento de diez veces de la vida útil de proyecto.

Tabla 2. Datos obtenidos en el caso práctico estudiado sobre las columnas de hormigón de altas prestaciones del edificio *e-Tower*, con relación al crecimiento de la vida útil

| | Cubrimiento característico⁽¹⁾ de proyecto (cm) | Constante de carbonatación adoptada⁽²⁾: k_{co2} (cm/año^{1/2}) | Vida útil de proyecto estimada (años) |
|---|--|---|--|
| Columna estructural (90 x 100 cm) con $f_{ck} = 40\text{MPa}$ | 3,0 | 0,245 | 150 |
| Columna estructural (60 x 70 cm) con $f_{ck} = 80\text{MPa}$ | 3,0 | 0,077 | 1500 |

(1) Se consideró como cubrimiento característico de proyecto al cubrimiento mínimo admitido por la norma ABNT NBR 6118:2014.

(2) Este valor se adoptó en función de la Práctica Recomendada del IBRACON sólo con el propósito de demostrar que la vida útil de la estructura aumenta diez veces al cambiar la resistencia del hormigón en este caso particular. Debe destacarse sin embargo, que estos coeficientes fueron estimados.

⁸ El coeficiente de carbonatación se estimó con base en la literatura: *Práctica recomendada IBRACON – Comentarios Técnicos NB-I*, publicado en 2003. El modelo adoptado se basa en el mecanismo simplificado de deterioro de la estructura por carbonatación, mediante la fórmula: $e = k_{co2} \bullet \sqrt{t}$, siendo e el cubrimiento de hormigón en cm, k_{co2} la constante de carbonatación en $\text{cm/año}^{1/2}$ y t en años (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

En cuanto al ahorro de recursos naturales, se encontró que hubo una reducción considerable de todos los materiales utilizados en la composición de hormigón $f_{ck} = 80\text{MPa}$, en comparación con el hormigón de 40MPa. El volumen de los agregados se redujo 70%, mientras que el cemento se redujo 20%, de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 3. Datos obtenidos en el caso práctico estudiado sobre las columnas de hormigón de altas prestaciones del edificio *e-Tower*, con relación a la reducción de los materiales por separado y del hormigón como un todo.

| Material | Reducción |
|-----------------|------------|
| Arena | 70% |
| Grava | 70% |
| Cemento | 20% |
| Agua | 53% |
| Hormigón | 53% |

4. CONSIDERACIONES FINALES

Con relación a los objetivos del estudio, la revisión de la literatura y el estudio de caso práctico permitieron obtener una visión general de cómo el hormigón - visto como un material - puede ser considerado atractivo desde el punto de vista de la concepción de una construcción sostenible.

Sin embargo, debe destacarse que a menudo se confunde cemento con el material hormigón. El cemento es un componente del hormigón y no se le puede analizar de forma aislada con respecto a los temas de la sostenibilidad. En la Figura 1 de este trabajo se expone claramente que el concepto de sostenibilidad se basa en tres campos fundamentales: social, económico y ambiental. Por lo tanto, cuando se usa el hormigón, parámetros tales como durabilidad y vida útil deben constituir una prioridad.

En el extranjero, principalmente en el Reino Unido, ha sido exhaustivo el programa de sostenibilidad que comprende al hormigón, a partir del análisis de los componentes que lo constituyen (cemento y agregados) hasta el material considerado como un todo. Diversos artículos de la literatura técnica sugieren iniciativas para minimizar el impacto ambiental, y tal como se ha comprobado, existen indicadores suficientes que muestran que se han alcanzado resultados positivos y significativos en los últimos 20 años. Algunos de estos indicadores han sido citados a lo largo de este trabajo.

Por último, puede considerarse que el uso de columnas de hormigón de altas prestaciones es una alternativa sostenible, porque conserva los recursos naturales, reduce el impacto ambiental, ahorra energía y aumenta el potencial de extracción de recursos naturales para otros fines. La reducción del volumen de hormigón y el considerable aumento de la vida útil - como se demuestra en este trabajo - satisfacen los principios de la construcción sostenible, incluso con un consumo de cemento por metro cúbico superior al del hormigón considerado "convencional". Por lo tanto no es correcto afirmar que cuanto mayor es el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón, menor será el potencial de la construcción sostenible, si se considera el hormigón de alta resistencia.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014), *Projeto de estruturas de concreto. Procedimento*. NBR 6118, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013), *Edificações habitacionais. Desempenho*. NBR 15575, Rio de Janeiro.
- BRITISH Standards Institution. (2006), BS 8500. *Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1*, BSI.
- Concrete Centre. (2005), *Civil Engineering: Sustainable solutions using concrete (TCC/05/04)*. ISBN: 1904818188. The Concrete Centre, 24p.
- Concrete Centre. (2007), *Sustainable: The environmental, social and economic sustainability credentials of concrete (TCC/05/03)*. ISBN: 1904818439. The Concrete Centre, 20p.
- Concrete Centre. (2009), *The concrete Industry: Sustainability performance report 1st Report (TCC/05/16)*. The Concrete Centre, 24p.
- Hartmann, C. & Helene, P. (2003), *HPCC in Brazilian Office Tower: High-performance colored concrete offers strength, thinner columns, more usable space, and aesthetics*. Concrete International, USA, december.
- Helene, P. (1986), *Corrosão em armaduras para concreto armado*. 1.ed. São Paulo: PINI, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Publicação IPT nº 1636. 47p.
- Helene, P. (1997), *Vida útil das estruturas de concreto*. 1997. IV Congresso Ibero-Americano de Patologia das Construções / VI Congresso de Controle da Qualidade, ANAIS, v.1, p.1-30, Porto Alegre.
- Helene, P. (2005), *Desempenho Elevado*. Entrevista fornecida à Revista TÉCHNE, Ed. nº 100. São Paulo – SP, em 13 jul. de 2005. p. 34-39.
- Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica - Idhea. São Paulo - SP. (2014) *Apresenta informações sobre desenvolvimento sustentável e habitação ecológica*. Disponível em: <<http://www.idhea.com.br>>. Acesso em: 03 de setembro de 2014.
- São Paulo – SP. (2014), *Nove passos para a Obra Sustentável - resumo*. Disponível em: <<http://www.idhea.com.br>>. Acesso em: 03 de setembro de 2014.
- Isaia, G.; Gastaldini A. (2004), *Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade*. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído, São Paulo, SP. Anais... CD-ROM.
- Klein, C. H. (2014), *Concreto e sustentabilidade*. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.instituto5dejulho.blogspot.com>>. Acesso em: 03 de setembro de 2014.
- Levy, S. (2005), *Sustentabilidade na construção civil: A contribuição do concreto*. In: ISAIA, G. C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON. Volume 2, Capítulo 50, p. 1551-1579.
- Medeiros, M. H. F.; Andrade, J. J. O.; Helene, P. (2011), *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto*. In: Geraldo C. Isaia (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, Capítulo 22, p. 773-808.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2008), *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini. 674p.
- Salvadori, M. (2006), *Por que os edifícios ficam de pé*. São Paulo: Martins Fontes. 371p.
- United Nations - UN. USA. (2014), *The World at Six Billion*. USA, 2009. Disponível em: <<http://www.un.org>>. Acesso em: 03 de setembro de 2014.