



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

KULAKOWSKI, M.; GUERREIRO, M.; GONZÁLEZ, M.

Viabilidad de utilización de aditivo estabilizador de hidratación (AEH) para el reciclaje del hormigón en
estado fresco – Estudio de caso en el sur de Brasil

Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 3, diciembre, 2012, pp. 99-111
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127628821009>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

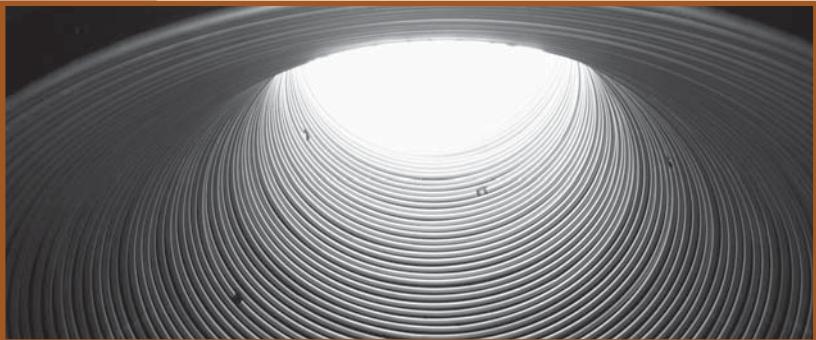
redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Viability of the hydration
control admixture employed
on fresh state concrete
recycling – A case study on
southern Brazil*

Viabilidad de utilización de aditivo estabilizador de hidratación (AEH) para el reciclaje del hormigón en estado fresco – Estudio de caso en el sur de Brasil



Autores

KULAKOWSKI, M. UNISINOS
marlovak@unisinos.br
São Leopoldo, Brasil

GUERREIRO, M. CIMPOR
Salvador, Brasil

GONZÁLEZ, M. UNISINOS
mgonzalez@unisinos.br
São Leopoldo, Brasil

Fecha de recepción 05/10/2012

Fecha de aceptación 11/12/2012

Resumen

La generación de residuos de hormigón en las Centrales Dosificadoras (CD) se produce debido a la devolución de los residuos de los camiones hormigoneras/mezcladores, pérdidas en la tubería y en el agitador de bombas de hormigón, limpieza de los camiones y en la propia Central. El objeto de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica y económica de utilización del aditivo estabilizador de hidratación (AEH) para la reutilización del hormigón retornado. La viabilidad técnica se evaluó midiendo el tiempo de fraguado en muestras de hormigón con diversas concentraciones de AEH añadidas en el momento de

la mezcla y también la medición del tiempo de fraguado cuando se añadió AEH a intervalos de tiempo de 1h y 3h después de mezclar con una misma tasa de AEH/cemento (0.30% en masa). Se observó la resistencia a compresión. Los resultados mostraron que los tiempos de fraguado aumentaran al incrementar los niveles de AEH. Fue posible reutilizar 88% del hormigón returned a la CD. La viabilidad económica demostró la posibilidad de beneficios económicos. Se concluyó que el aditivo estabilizador de hidratación (AEH) es un apoyo eficaz para el reciclaje de residuos de hormigón.

Palabras clave: Hormigón, aditivo estabilizador de hidratación, reciclaje, medio ambiente, costos.

Abstract

Residues generation at Ready-Mixed Concrete Plants (CPs) occurs due to concrete leavings in the drum mixer of concrete delivery trucks; waste in piping and pumps agitators; on truck's cleaning; and on the plant itself. The aim of this paper is to analyze technical and economic viability of employment of hydration control admixture (HCA) to permit reusing these residues. Technical viability was verified through setting times of samples with several HCA/cement ratios added to the concrete at the time of mixing, and also by setting times when

HCA was added in time lag intervals of 1h and 3h after the admixture with a HCA/cement ratio of 0.30% by mass. There was verified axial compressive strength of the samples. Results showed that setting time increased progressively as long as it was increased rates of HCA. It was possible to reuse 88% of concrete leaving. Economic analysis permits to conclude that there are economic gains to the CPs. It can be concluded that hydration control admixture technique is an efficient way to recycle ready-mixed concrete residues.

Key words: Ready-mixed concrete, hydration control admixture, recycling, environment, costs.

1. Introducción

El sector productivo es un gran consumidor de recursos naturales (Roaf, Fuentes y Thomas, 2012). El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo. Como 11 mil millones de toneladas de hormigón se consumen al año, según Mehta y Monteiro (2006). El hormigón involucra grandes cantidades de recursos naturales tales como arena, grava, agua, aditivos y cemento. De estos, el impacto ambiental del cemento tiene una mayor visibilidad, porque la producción de cemento genera una gran cantidad de CO₂ (Lima, 2010).

La producción mundial de cemento fue de 3,6 mil millones de toneladas en 2011, y se prevé aún crecimiento para los próximos años (European Cement Association, 2011). La fabricación de cemento contribuye con aproximadamente 2 Gt / año (2 mil millones de toneladas por año) de las emisiones de CO₂. Esto es 5% de la producción humana de gases de efecto invernadero - teniendo en cuenta las emisiones de fuentes estacionarias (IEA, 2010). Debido a los diferentes procesos y combustibles, hay un rango de emisiones de 0,65 a 0,92 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento, con un promedio mundial de 0,83 tonCO₂/ton cemento (IEA, 2007). Wang y Han (2012) afirman que el 50% de las emisiones proceden de la quema de combustible y otro 50% proviene de la calcinación del CaCO₃.

En Brasil, la producción de cemento fue 59,2 millones de toneladas en 2010 (SNIC, 2011) y se estima que se asocia con una menor generación de CO₂ (pues parte de la energía se genera en hidroeléctrico), alcanzando los 0,659 tonCO₂/ton cemento (Lima, 2010).

Además del cemento, la extracción de otras materias primas para la fabricación de hormigón como los áridos, también llevan a la transformación y degradación de grandes áreas. Por otra parte, también se pueden citar los impactos de la explotación de arena de río, que modifica la sección del mismo y que a menudo puede conducir a la erosión de las orillas y sedimentación, y la eliminación de residuos de hormigón, lo que generalmente ocurre de manera improvisada o irregular, con baja tasa de reciclaje de materiales (John y Zordan, 2001; Lima, 2010; Pinto, 1999).

En obras Brasileñas, Souza *et al.* (2004) descubrió que las pérdidas tienen un promedio alrededor del 9% del total de hormigón dosificado en centrales que fue recibido en las obras. En las propias Centrales Dosificadoras, hay indicios de pérdida de 1% a 2% en las plantas japonesas (Okawa, Yamamiya y Nishibayashi,

2000) y de 1% a 4% en centrales de Alemania (Rezende, Djanikian & Levy, 1996).

Así, uno puede darse cuenta de la importancia de buscar alternativas para reducir el impacto ambiental del sector. Entre los residuos de este segmento, el hormigón residual generado en Centrales Dosificadoras (CD) de hormigón tiene un buen potencial para su reutilización, con varios beneficios. Hay algunas técnicas probadas y aprobadas para su reciclaje. Uno de ellos es la reutilización del hormigón residual con uso de aditivos tales como el aditivo estabilizador de hidratación (AEH). En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo contribuir a la verificación de la viabilidad técnica y económica de la reutilización de hormigón con el uso del aditivo estabilizador de hidratación (AEH). El estudio se basó en un estudio de caso en una CD ubicada en el sur de Brasil.

2. Reutilización del hormigón residual con aditivo estabilizador de hidratación (AEH)

Una de las principales fuentes de residuos son las Centrales Dosificadoras de hormigón. Las pérdidas en las centrales se producen principalmente por el retorno de los restos de los camiones hormigonera, pérdidas en la tubería y bombas agitadoras de hormigón, así como limpieza de los camiones y en las propias Centrales Dosificadoras. Todavía es hormigón fresco, con un buen potencial para reutilización.

En general, estos residuos son dispuestos en una zona situada cerca de las instalaciones de la empresa. Posteriormente, estos residuos se eliminan por las compañías recogedoras de escombros y por lo general no se hace ningún tipo de reutilización.

Actualmente hay varios procedimientos para llevar a cabo el tratamiento o reciclado de residuos de hormigón en estado fresco. Entre los procedimientos para el reciclaje se destaca el cuadro de sedimentación, que consiste en una caja con una parte inferior inclinada donde son arrojados los restos de hormigón y el agua de lavado de los camiones. En esta caja que se produce la sedimentación de grava y arena en la parte inferior. Los residuos sedimentados se retiran y se utiliza para los servicios de terraplén. Para la reutilización del agua de lavado es necesario ejecutar de dos a cuatro cajas en serie, las cuales permiten el ajuste del cemento y los finos suspendidos en el agua. Es un procedimiento muy utilizado, debido a su simplicidad y la baja inversión (Buttler, 2003).

Otro procedimiento relativamente simple para reciclar el hormigón consiste en la separación mecánica de los áridos del agua de lavado (el cemento y las partículas finas en suspensión). En este método, la deposición del hormigón fresco se realiza en una tolva de alimentación, que lleva los residuos a la primera parte de la cubeta donde se incorpora agua corriente, lo que provoca la sedimentación de los agregados y la suspensión del cemento. Cuando alcanza el extremo de la cubeta, el agua y los residuos de hormigón todavía presentes se recogen y se llevan de nuevo al principio. Los agregados separados se seleccionan a partir de una tolva de descarga (Rezende, Levy & Djanikian, 1996). Este procedimiento tiene algunas ventajas como reutilizar los agregados en el proceso de lavado, reduciendo el coste de eliminación de residuos sólidos y la reutilización del agua de lavado de nuevo en la producción de hormigón teniendo en cuenta el cemento presente en el agua como material fino (Butler, 2003).

Como alternativa a los procedimientos citados, se puede utilizar el aditivo estabilizador de hidratación (*Hydration Control Admixture*). Pueden citarse algunos trabajos realizados con AEH, como el realizado por Benini (2005), que utilizó cementos CP III-RS y CP V ARI-RS, y otro por Paulon y Granato (2003), que utilizaron CP-V ARI-RS. Estos cementos se comercializan en la región sudeste de Brasil.

El aditivo estabilizador de hidratación (AEH) se compone de una tecnología que tiene como objetivo controlar la hidratación del cemento permitiendo que el hormigón permanezca en estado plástico/fresco durante más tiempo, lo que lo convierte en una alternativa viable para la reutilización de residuos de hormigón. Según Melbye (1994), las características de tiempo de fraguado, endurecimiento y resistencia del hormigón dependen de la reacción del cemento con el aditivo y el agua. El inicio de la reacción de hidratación produce C-S-H (hidrato de silicato de calcio), lo que resulta en una rápida liberación de iones de calcio en solución, formando una capa de gel de C-S-H alrededor de las partículas de cemento. Durante el inicio del endurecimiento del hormigón se produce la floculación de los productos de hidratación, que convierte el hormigón plástico en un material rígido. El aditivo estabilizador de hidratación se difiere de un aditivo retardador convencional por el intervalo de control sobre la variedad de reacciones en la superficie de los granos de cemento. Los aditivos retardadores actúan en el control de la hidratación principalmente en la etapa del C₃S en el clinkér, proporcionando mantenimiento de la consistencia y retardo de fraguado, que afecta más la resistencia inicial que la reología del hormigón fresco, causando un retraso de fraguado en la pasta de

cemento, y generalmente torna más lento el proceso de fraguado de la pasta.

El aditivo estabilizador de hidratación comprende ácido carboxílico y fósforo y contiene ácidos orgánicos y sales, siendo que el mecanismo de acción es diferente de los retardadores convencionales debido a que inhibe la nucleación de silicato de calcio hidratado de (C-S-H) e hidróxido de calcio (CH), impidiendo la hidratación de todas las etapas del cemento, incluyendo la fracción de aluminato de calcio (C₃A), pues reduce la concentración de sulfato de calcio en la solución (Paolini, Khurana, 1998). El AEH controla la hidratación del cemento formando una barrera protectora que impide el inicio del fraguado del cemento y actúa como un dispersante, permitiendo que el hormigón se mantenga estable en el estado fresco durante algunas horas o incluso por días. Después de este período puede ser reutilizado, manteniendo la trabajabilidad y según los fabricantes de aditivos, manteniendo al mismo tiempo la resistencia a la compresión axial (Paolini, Khurana, 1998).

Según Paolini y Khurana (1998) y Okawa, Yamamiya y Nishibayashi (2000) después del período de estabilización, el efecto de AEH se disipa o se consume químicamente al proceder la activación. El procedimiento que se emplea principalmente en la activación es la adición de hormigón fresco (nuevo), haciendo que la barrera química existente alrededor de las partículas de cemento estabilizado se pierda. Después de la pérdida de esta barrera, se reinicia la hidratación normal del cemento, con el crecimiento inicial de las resistencias y del fraguado. De acuerdo al contenido de AEH empleado, la mezcla se puede mantener en el estado de desactivación hasta por 72 horas.

De acuerdo con algunos autores (Kinney, 1989; Okawa, Yamamiya y Nishibayashi, 2000; Paolini y Khurana, 1998), la utilización del AEH no tiene efectos negativos en las propiedades mecánicas del hormigón cuando se usa apropiadamente. Corroborando los hallazgos de estos autores, Zozula (2009) señala que la temperatura ideal para el uso de AEH se encuentra en un rango de 25 hasta 40°C y que, en las condiciones estudiadas por el autor, el hormigón estabilizado no presenta pérdida de resistencia en relación al hormigón de referencia.

Pocos estudios incluyen el análisis económico de reciclaje de hormigón, que es también un elemento importante en la motivación para la adopción de procedimientos de reciclaje. También (2008) presenta un estudio sobre los costes y beneficios de las prácticas actuales de reciclaje de hormigón en centrales dosificadoras de Hong Kong, que se basan en la separación mecánica de los agregados y cemento. El estudio

indicó que los costos de la planta de reciclaje en sí representan alrededor del 50% del coste de eliminación de residuos en vertederos.

3. Metodología

Este estudio se basó en datos recogidos en un estudio de caso. El estudio se realizó en una Central Dosificadora de medio tamaño, con una producción de 20.000 m³ por mes, que se encuentra en la región del río Taquari, en el sur de Brasil, cuyo proceso de estabilización para la reutilización de los residuos de hormigón ya viene siendo adoptada hace cuatro años.

La viabilidad técnica se basó en estudios de laboratorio y análisis del control de resistencia del hormigón estabilizado en el laboratorio, centrándose principalmente en el mantenimiento de la estabilidad y la resistencia a compresión. La viabilidad económica se evaluó con la observación de los volúmenes de hormigón devueltos y estabilizados. Además, fueron recolectados datos de producción de cemento y hormigón en Brasil con el fin de realizar una proyección de generación de residuos de hormigón en Centrales del país.

3.1. Viabilidad técnica del reciclado con AEH

3.1.1. Metodología de estabilización de hormigón en Central Dosificadora

Teniendo en vista una mejor comprensión del proceso, se describe la rutina de reutilización de residuos de hormigón en la central dosificadora estudiada. Cuando el camión mezclador retorna a la Central con hormigón residual se llevan a cabo algunos procedimientos que verifican si el residuo es capaz de ser reutilizado. En primer lugar se verifica el tiempo de carga del hormigón, que es el intervalo de tiempo entre el momento de la salida del camión y el momento de retorno del mismo a la Central como también la temperatura del hormigón en el interior del globo, con un termómetro láser. Con estos datos, se evalúa el estado del hormigón, dependiendo del fraguado, para decidir si es capaz de ser utilizado. Se considera en condiciones de trabajo para la estabilización el hormigón residual con una temperatura máxima de 32°C (temperatura en el globo del camión) y con tiempo de carga igual o menor de cuatro horas después de la mezcla del hormigón en el camión mezclador. Estos parámetros se establecieron de acuerdo a las pruebas realizadas en la Central Dosificadora en función del tipo de cemento utilizado y las recomendaciones técnicas del fabricante de AEH.

En la CD en estudio se utiliza cemento CP-V-ARI-RS, de acuerdo con la NBR 5733/1991, lo que al hormigón cuatro horas antes del inicio de fraguado después de la mezcla del hormigón. El contenido de AEH empleado está relacionado con el contenido de cemento en el hormigón y con el tiempo que se desea que el hormigón residual permanezca en estado plástico. Para el estudio en cuestión, la estabilización intentaba volver a utilizar el hormigón en el mismo día, es decir, el hormigón se mantuvo estable durante unas pocas horas y poco después fue activado para ser redirigido a otro sitio. El volumen residual de hormigón devuelto en cada camión osciló de 0.5 hasta 2.5 m³. Como recomienda el fabricante del aditivo, el volumen devuelto debe permitir una carga adicional equivalente al doble del volumen que se desea estabilizar. Cuando el volumen devuelto es mayor que 2.5 m³ se sugiere que sea dividido en dos lotes, de modo que se pueda realizar el procedimiento recomendado.

En la CD estudiada, para la activación del hormigón estabilizado se añade hormigón fresco, y siendo que el hormigón es inmediatamente redireccionado a otro sitio. El hormigón reciclado llena el volumen del camión y los ajustes se hacen para cumplir con la característica de producir un hormigón con el fck solicitado por el cliente. Debido a esto, la compañía no considera la activación como un gasto en el cálculo del coste de hormigón, ya que el volumen retornado se estabiliza y el hormigón está destinado a otra obra pronto después de la activación.

3.1.2. Materiales y métodos

Para la ejecución de la mezcla de ensayo se utilizó una mezcla 1:2.49:2.98 con relación a/c de 0.54, con 54% de contenido de mortero, asiento de 90 ± 10 mm, contenido de aditivo plastificante de 0.60% sobre la masa de conglomerante y 25% de cenizas volantes en sustitución al cemento. Los materiales utilizados en la fabricación de la mezcla fueron: cemento CP-V-ARI-RS (ABNT, 1991), con una adición de aproximadamente un 12% de cenizas volantes, de acuerdo al contenido de residuo insoluble (Tabla 1). Se utilizó una arena de cuarzo natural de características presentadas en la Tabla 2, una grava basáltica, con dimensión máxima de 19 mm (Tabla 3), aditivo plastificante polifuncional de fraguado y aditivo estabilizador de hidratación (Tabla 4). La mezcla adoptada es una de las mezclas comunes empleadas por la Central Dosificadora del estudio de caso.

Tabla 1. Caracterización química y física del cemento utilizado (CP-V ARI RS)

Ensayos químicos (%)	Contenido	Normativa
Pérdida al fuego	3,65	NM 18
Residuo insoluble	11,98	NBR NM 15
Trióxido de azufre SO_3	3,23	NBR 14656
Óxido de calcio libre CaO	1,56	NBR NM 12
Óxido de magnesio MgO	4,89	NBR 14656
Óxido de aluminio Al_2O_3	6,31	NBR 14656
Óxido de silicio SiO_2	22,29	NBR 14656
Óxido de hierro Fe_2O_3	3,17	NBR 14656
Óxido de calcio CaO	53,95	NBR 14656
Equivalente alcalino	0,81	NBR 14656
Ensayos físicos	unidad	valor
Tiempo de inicio de fraguado	h:min	02:07
Tiempo de fin de fraguado	h:min	02:49
Consistencia normal	%	30,08
Blaine	cm^2/g	5,017
Retenido tamiz # 200	%	0,13
Retenido tamiz # 325	%	1,06
Resistencia a la compresión axial a 1 día	MPa	22,6
Resistencia a la compresión axial a los 3 días	MPa	33,5
Resistencia a la compresión axial a los 7 días	MPa	39,7
Resistencia a la compresión axial a los 28 días	MPa	49,70

Tabla 2. Distribución del tamaño de partículas del árido fino

Abertura de tamiz (mm)	Promedio retenido (%)	Promedio retenido acumulado (%)
4,8	0	0
2,4	5	5
1,2	12	17
0,6	18	35
0,3	43	78
0,15	21	99
<0,15	1	100
Dimensión máxima característica (mm):	4,8	
Módulo de finura:	2,34	
Masa específica (g/cm ³):	2,58	

Tabla 3. Distribución del tamaño de partícula del árido grueso

Abertura de tamiz (mm)	Promedio retenido (%)	Promedio retenido acumulado (%)
19	3	3
12,5	53	56
9,5	29	85
6,3	13	98
4,8	1	99
2,4	1	100
1,2		100
0,6		100
0,3		100
0,15		100
<0,15		
Dimensión máxima característica (mm)	19	
Módulo de finura	6,87	
Masa específica (g/cm ³)	2,81	

Tabla 4. Características de los aditivos químicos empleados

Aditivo	Base química	Contenido de sólidos %	PH	Densidad
Plastificante	Lignosulfonatos y aditivos especiales	42 a 46%	7 a 9	1,19 a 1,23 g/cm ³
AEH	Ácidos carboxílicos y fósforo	No fue fornecido	2,2 a 2,6	1,061 a 1,075 g/cm ³

Para evaluar la influencia del AEH en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido se llevaron a cabo diferentes pruebas, como: comprobar los tiempos de inicio y fin de fraguado, resistencia a la compresión y trabajabilidad del hormigón. La secuencia del desarrollo de los ensayos incluye los siguientes pasos llevados a cabo en la producción de las muestras de hormigón en el laboratorio y en la realización de las pruebas:

Paso 1:

En el Paso 1 fue producido el hormigón de referencia sin AEH. Una vez completada la mezcla se verificó el asiento del hormigón y a continuación fueron moldeadas 6 probetas de ensayo para la realización de ensayos de compresión a los 3, 7 y 28 días. También se midió el tiempo de inicio y final de la toma de cada muestra de hormigón.

Paso 2:

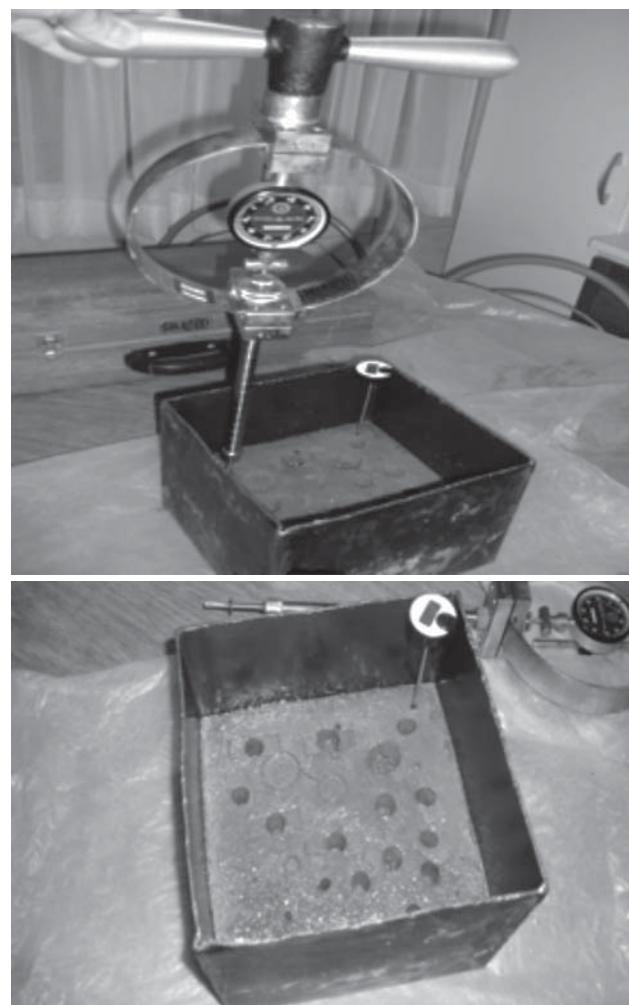
En el Paso 2 las muestras de hormigón se realizaron variando la concentración de AEH (0.10%, 0.20%, 0.30%, 0.60% y 0.90%) en relación con el peso de conglomerante, cuando se añade en el momento de la mezcla. Después de la toma de las muestras se verificó el asentamiento y fueron moldeadas 6 probetas para cada nivel de AEH, con verificación de la resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días. También se examinaron para cada contenido de AEH los tiempos de comienzo y final de fraguado. Tanto la resistencia como el tiempo de fraguado se compararon con los de la muestra de referencia.

Paso 3:

En el Paso 3 se realizaron mezclas de hormigón con un contenido de AEH fijado en 0.30% con respecto al peso de conglomerante (valor recomendado para el retorno en el mismo día). El AEH fue añadido al hormigón en tiempos de 1h y 3h después de la mezcla. Para cada muestra fue comprobado el asiento antes y después de la adición del AEH y tomadas 6 probetas para realizar el ensayo de la resistencia a compresión. También se midió el tiempo de inicio y el final de fraguado.

La determinación de los tiempos de inicio y de final de fraguado se realizó de acuerdo con la NBR NM 9/2003. Se retiró una muestra de cada mezcla y se tamizó en el tamiz de 4,8 mm. Así se obtuvo un mortero que se coloca dentro de un contenedor estándar y entonces se llevó a cabo la medición de los tiempos de inicio y el

final del fraguado. El ensayo se realizó en laboratorio con una temperatura de 24°C y se midió también la temperatura del mortero del lugar en que se produjo el hormigón. La Figura 1 muestra la medición de los tiempos de fraguado con un penetrómetro con anillo dinamométrico. A través de este ensayo, se observó el efecto estabilizante del AEH en muestras de hormigón con varios niveles de AEH y la comparación con la muestra de referencia, producida sin AEH.

Figura 1. Ensayo del tiempo de fraguado con penetrómetro

El chequeo del asentamiento para cada muestra se realizó de acuerdo con la NBR NM 67/1996 y después fueron moldeadas 6 probetas para cada muestra, de acuerdo con la NBR 5738/2003. Las probetas fueron sometidas a curado húmedo hasta la edad correspondiente a la prueba de resistencia. La prueba de resistencia a la compresión axial se realizó de acuerdo con la NBR NM 101/1996.

Después de la realización de cada mezcla, el hormigón se envasó en bolsas de plástico selladas para prevenir la pérdida de humedad en el medio ambiente. Después de los tiempos de 1h y 3h, las muestras de hormigón se colocaron de nuevo en el mezclador y se mezcló cada una durante un minuto. Después de este tiempo, se encontró el asiento de las muestras y después se añadió el AEH con la mezcladora en movimiento, para asegurar la uniformidad del AEH con la mezcla. A continuación, se retiró una muestra de hormigón y después la muestra se tamizó, como se describió anteriormente. Se midieron los tiempos de inicio y final de fraguado para cada intervalo de tiempo. Durante el procedimiento se verificó temperatura de la muestra y del medio ambiente. También para estas mezclas fueron moldeadas 6 probetas de cada muestra. En todos los casos, se siguieron las normas correspondientes y los resultados se compararon con los de la mezcla de referencia.

3.2. Análisis de la viabilidad económica del empleo de AEH

Los datos utilizados en el análisis de la viabilidad económica de este estudio se recogieron en la empresa. Se registraron los datos diarios de camiones mezcladores de regreso a Central con restos de hormigón. La recolección de datos fue de un trimestre, y se refiere solo al hormigón con la mezcla estudiada.

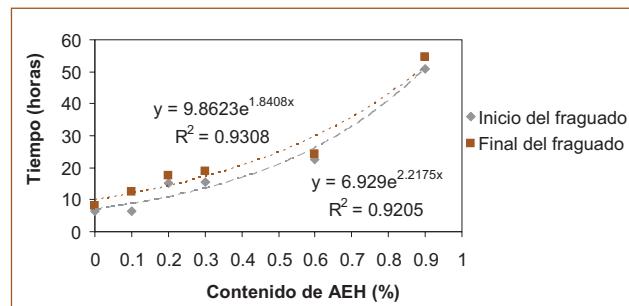
4. Presentación y discusión de los resultados

4.1 Análisis de la viabilidad técnica

Los resultados obtenidos para los tiempos de fraguado de las muestras de hormigón para diferentes concentraciones de AEH se muestran en la Figura 2. Las muestras con concentraciones de 0.10%, 0.30% y 0.60% de AEH, con temperaturas de 21°C, 22°C y 23°C, mostraron menor rango de tiempo de fraguado, los cuales son 1h15, 1h15 y 1h35, respectivamente. Las muestras con concentraciones de 0.20% y 0.90% de AEH, con temperaturas de 16°C y 18°C mostraron

un mayor intervalo entre el inicio y el final del fraguado, y los tiempos observados fueron de 2h y 3h35, lo que muestra la influencia que la temperatura tiene sobre los tiempos de fraguado del hormigón.

Figura 2. Tiempo de fraguado inicial y final con niveles variables de AEH



Los resultados (Figura 2) muestran que los tiempos de inicio y final de fraguado fueron proporcionales al contenido de AEH empleado en las muestras de hormigón. A la medida que el contenido de AEH se aumentó, los tiempos de fraguado aumentaron gradualmente a los tiempos de fraguado de la muestra de referencia (con un contenido de 0% AEH). El intervalo transcurrido entre la hora de inicio y fin de fraguado con los contenidos de 0.10%, 0.20%, 0.30% y 0.60% de AEH estaba cerca del intervalo correspondiente a la muestra de referencia.

Las Figuras 3 y 4 muestran la variación de los resultados de resistencia a la compresión como una función de la edad de las muestras (3, 7 y 28 días), y del contenido de AEH empleado (0%, 0.10%, 0.20%, 0.30%, 0.60% y 0.90%).

Los resultados obtenidos para las muestras estabilizadas mostraron resistencias cerca de la resistencia de la muestra de referencia a los 3 días, con la excepción del contenido de muestra correspondiente a 0.90%. En este ejemplo, a pesar de que la edad de moldeo fuera 3 días, en el momento de la prueba la edad de hidratación no se correspondía efectivamente a 3 días, ya que su inicio de fraguado ocurrió 51 horas después de la adición del AEH en la mezcla, y por lo tanto su edad real de hidratación era 1.5 días. Para las edades de 7 y 28 días todas las muestras estabilizadas presentaron resistencias por encima de la muestra de referencia, lo que muestra la acción dispersante del AEH, la cual resulta al final en una resistencia a la compresión mejorada.

Figura 3. Resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días

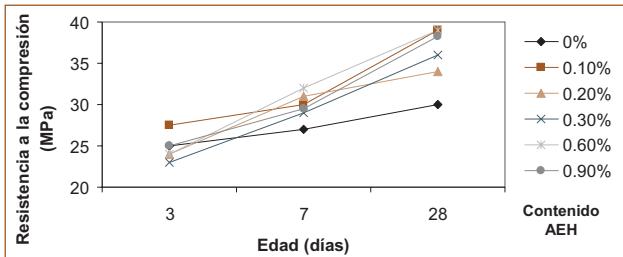
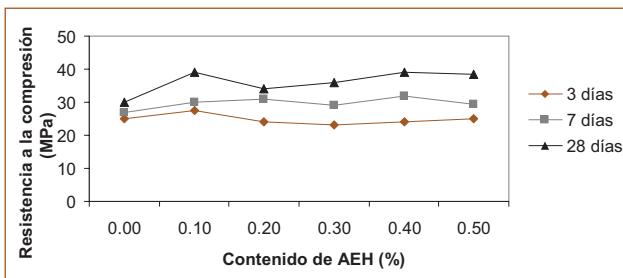


Figura 4. Resistencia a la compresión como una función de los niveles de AEH



Los resultados obtenidos para los tiempos de inicio y final de fraguado cuando el AEH fue añadido en 1h y 3h después de la mezcla de hormigón se muestran en la Figura 5. Los resultados presentados en la Figura 5 indican que cuando el AEH se añadió en tiempos posteriores a la mezcla inicial (0h) aparentemente el AEH perdió parte de su energía de estabilización en función de haber empezado ya el proceso de hidratación del cemento. Es posible que esto ocurra porque el AEH no tiene fuerza para deshacer las reacciones ya desarrolladas en el período de reposo, cuando se produce alguna floculación de los granos de cemento, y actúa solamente en las partículas de cemento que aún no han empezado la hidratación hasta el momento de su adición. La muestra de hormigón que ha recibido el AEH después de 1h obtuvo tiempo de inicio y final de fraguado mayor que la muestra que recibió el AEH después de 3h de la mezcla y las dos presentaron tiempos de fraguado por debajo de la muestra de referencia.

Los resultados obtenidos para las resistencias de las muestras que recibieron el AEH en 1h y 3h después de la mezcla de hormigón se muestran en la Figura 6. Los resultados demuestran que la adición de AEH después de la mezcla no afecta a la resistencia del hormigón. Las resistencias correspondientes a los tiempos de 1h y 3h tuvieron resultados cerca o poco más altos que

los de la muestra de referencia (0h). Los resultados obtenidos para tiempos de inicio y final de fraguado y resistencia a la compresión fueron similares a los obtenidos por Benini (2005) y por Paulon y Granato (2003), lo que también demuestra la viabilidad técnica de la AEH para hormigones producidos con cementos con adición de cenizas volantes.

Figura 5. Tiempos de inicio y fin de fraguado para adición en 0h, 1h y 3h con un 0.30% de contenido de AEH

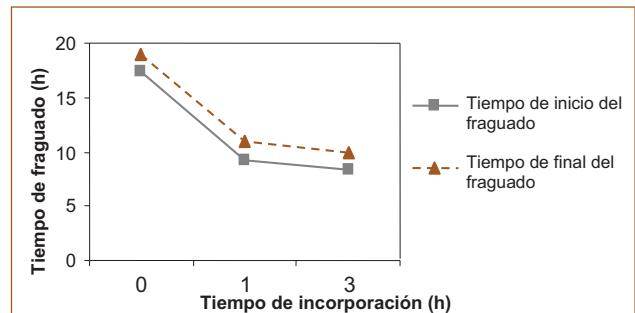
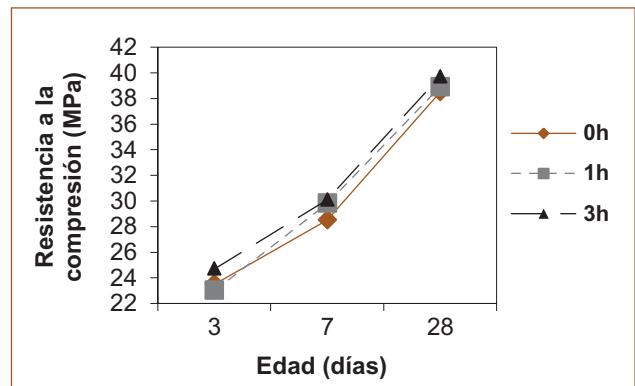


Figura 6. Resistencia a la compresión para el momento de la adición de 0h, 1h y 3h, que contiene un 0.30% de AEH



4.2 Análisis de la viabilidad económica

El análisis de viabilidad económica de la estabilización de hormigón devuelto se basó en informaciones recogidas en la Central Dosificadora. La Tabla 5 muestra las cantidades de producción mensual de hormigón (para la mezcla estudiada), hormigón devuelto, hormigón estabilizado y no estabilizado, y el consumo de aditivo estabilizador de hidratación. Se observa que el volumen devuelto corresponde a aproximadamente el 0.7% del volumen total producido en el período.

Tabla 5. *Mediciones en la Central Dosificadora estudiada*

Mes de coleta	Producción mensual de hormigón (m ³)	Volumen de hormigón devuelto (m ³)	Volumen de hormigón devuelto estabilizado (m ³)	Volumen de aditivo consumido (L)	Volumen de hormigón no estabilizado (m ³)
1	2,300	11.25	9.25	26.50	2.00
2	2,000	10.00	9.00	25.00	1.00
3	1,700	21.25	19.25	38.50	2.00
Totales	6,000	42.50	37.50	90.00	5.00

El análisis económico de los datos obtenidos de la medición contempla dos situaciones. Una es la reutilización del hormigón devuelto o estabilizado y otra es el desecho del mismo volumen en un vertedero de residuos inertes. Basándose en este análisis, se hizo una proyección de los valores de producción de hormigón en las CD en Brasil. Los precios de los insumos y servicios se obtuvieron para la región de la CD donde se realizó el estudio (Tabla 6).

Tabla 6. *Precio de los insumos y servicios que realizan en la región metropolitana de Porto Alegre, en junio de 2012*

Insumo / Servicio	Costo
Cemento	US\$ 200 / t
Arena	US\$ 21 / m ³
Grava	US\$ 21 / m ³
Hormigón dosificado en central	US\$ 150 / m ³
Aditivo estabilizador de hidratación	US\$ 3,50 / L
Remoción, transporte y destinación de los residuos	US\$ 52 / m ³
Entrenamiento y costos con la equipo operacional (de la CD estudiada)	US\$ 60 / mes

4.2.1 Análisis económico del hormigón devuelto a la Central Dosificadora

Como puede verse en la Tabla 5, durante el período en que se realizó el estudio de caso, el volumen total de hormigón devuelto a la dosificación central fue 42.5m³. Se reutilizó en el proceso de producción un volumen de 37.5m³, siendo que 5.0m³ no se han reu-

tilizado porque estaban fuera de las especificaciones. Así, en este estudio 88% del volumen total de hormigón devuelto se estabilizó y fue reutilizado en obras y 12% fue descartado.

Para la estabilización de hormigón residual en el trimestre estudiado, la CD tuvo costos de US\$ 315 con la compra de AEH y US\$ 155 con el personal operativo. Teniendo en cuenta también US\$ 255 para la remoción y eliminación de 5.0m³, los costos totalizaron US\$ 725.

Teniendo en cuenta el precio de venta promedio de un metro cúbico de hormigón de US\$ 150, el volumen devuelto representa un monto de US\$ 5,625, es decir, este valor será recibido por la venta de 37.5m³ de hormigón estabilizado.

Basándose en estos datos, se puede concluir que la dosificación central logra una ganancia de US\$ 4,900 con la reutilización de los residuos de hormigón en su proceso de producción, en el período estudiado. Esto representa US\$ 19,600 en un año de trabajo en condiciones similares.

Si la Central Dosificadora decide no volver a utilizar el hormigón devuelto, adoptando el sistema tradicional de suministro de hormigón en vertedero de residuos inertes, esto costaría –para el período estudiado– unos US\$ 2.200 para realizar la extracción, transporte y eliminación de 42.5m³ de residuos. Teniendo en cuenta el período de un año, el costo total sería de US\$ 8,800.

Al final, añadiendo el coste de la eliminación de los residuos con la pérdida de ingresos estimada para la opción de reutilización, la pérdida total de la CD sería de US\$ 7,100 para el trimestre estudiado o US\$ 28,400 por año. Esto es US\$ 167,06 por metro cúbico de hormigón devuelto en promedio. Este valor es mayor que el valor del hormigón nuevo (US\$ 150/m³) porque incluye los costos de eliminación de residuos en vertederos. Se verifica que la opción por la reutilización de

los materiales, con el apoyo del AEH, puede producir un ingreso anual significativo.

4.2.2 Proyección del análisis económico para Brasil

No existen datos fiables sobre la producción de hormigón dosificado en Brasil. A menudo se utiliza la producción de cemento –que está bastante controlada y difundida por sus fabricantes– como un indicador de la producción de hormigón. La producción brasileña de cemento en 2010 fue de 59.2 millones de toneladas, con un 18.6% asignado a las Centrales Dosificadoras, dando como resultado un consumo de cemento de 10.5 millones de toneladas en las CDs (SNIC, 2011). Considerando que existe un consumo general alrededor de 300 kg de cemento para producir un metro cúbico de hormigón, se puede estimar el volumen anual de hormigón producido en CDs brasileñas en 36.7 millones de m^3 .

Los datos apuntados por Rezende, Djanikian y Levy (1996) y Okawa, Yamamiya y Nishibayashi (2000) indican pérdidas de 1% a 4% en Centrales Dosificadoras. Dado que los estudios no son nuevos y se están realizando esfuerzos para reducir las pérdidas en el sector, se adoptó el valor más bajo (1%) para proyectar el volumen de los residuos generados en las CDs de Brasil. El cálculo del volumen correspondiente es 398,000 m^3 . Utilizando los parámetros del estudio de caso, en el que el 88% de hormigón devuelto fue reutilizado, son 350,000 m^3 de reutilización, dejando otros 48,000 m^3 para eliminación.

Aunque existen importantes variaciones regionales en estos gastos en Brasil a los efectos de la extrapolación de los valores, adoptamos un valor único para un metro cúbico de hormigón devuelto, y se adoptó el valor medio del estudio de caso (US\$ 167.06/ m^3), como se explicó anteriormente. Así, en términos económicos, teniendo en cuenta el período de un año, el volumen de los residuos generados en Centrales Dosificadoras de Brasil representa un valor de US\$ 58.5 millones. Basado en esta simulación, se puede concluir que las CDs tendrían una ganancia significativa, y podrían generar menos 350,000 m^3 de residuos de hormigón. Esta ventaja económica tiende a aumentar, frente a la creciente escasez de recursos naturales y áreas para la disposición de residuos, que aumentan gradualmente y en mayor proporción que los costos de mano de obra y de AEH.

4.3. Análisis de las ventajas ambientales

La CD en estudio produjo un volumen residual de hormigón listo para ser reutilizado de 37.5 m^3 durante un

periodo de 3 meses, y la cantidad de cemento utilizado en su producción fue de 11.25 toneladas. Durante la producción de cemento de hormigón fueron emitidos a la atmósfera alrededor de 7.8 toneladas de CO_2 . En el supuesto de utilización de este volumen, no se emitirían otras 7.8 toneladas de CO_2 , ya que la misma cantidad de cemento en el hormigón residual desecharido debe ser consumida para la producción de un hormigón nuevo. Teniendo en cuenta los residuos en un año, el procedimiento podría reducir la emisión de 31.2 toneladas de CO_2 .

En el estudio de simulación para todas las CDs de Brasil, el volumen residual de hormigón sería unos 350 mil metros cúbicos por año, y la cantidad de cemento utilizada en su producción como 105 mil toneladas. Con el mismo razonamiento, no se lanzarían a la atmósfera 73 mil toneladas de CO_2 al año.

La reutilización de los residuos de hormigón permite reducir el consumo de recursos no renovables naturales. Al reutilizar residuos de hormigón, están siendo reutilizados no solo el cemento sino también arena y grava, con la reducción de la extracción de estos materiales en la naturaleza y del gasto de energía para la obtención de ellos. También se debe considerar que esta forma de reciclaje puede reducir significativamente el volumen de residuos que se eliminan en vertederos o en áreas de la empresa, y estas superficies ya están escasas hoy en día.

5. Conclusiones

Se examinó la posibilidad de la CD reutilizar el hormigón devuelto con uso del AEH. Los resultados obtenidos en este estudio demostraron la viabilidad técnica y económica de reutilización de hormigón devuelto en el proceso de producción.

En general, la reutilización total de los residuos del hormigón no es factible, debido a las variaciones en temperatura y tiempo de inicio de fraguado, pero con la técnica de estabilización se reduce considerablemente el volumen de los residuos que se depositan en vertederos.

La verificación de la influencia de la cantidad de AEH en los tiempos de fraguado para los contenidos de 0%, 0.10%, 0.20%, 0.30%, 0.60% y 0.90%, indicó que los tiempos de inicio y final del fraguado aumentan proporcionales al contenido de AEH. La temperatura ambiente también influye en los rangos de tiempo de las muestras. Las muestras que se hicieron con una temperatura ambiente más alta presentaron un rango de tiempo de fraguado más corto, mientras

que las muestras que se llevaron a cabo a temperatura ambiente más baja mostraron un rango de tiempo mayor. Las muestras estabilizadas a la edad de 3 días exhibieron resistencia a la compresión axial solo 4% menor, en comparación con los resultados de la muestra de referencia. Para la edad de 7 días, la resistencia aumentó un promedio de 3.3% y a los 28 días la resistencia aumentó un promedio de 3%, todo en comparación con la muestra de referencia. Los resultados mostraron que el uso de AEH no interfiere negativamente en las propiedades mecánicas de muestras de hormigón estabilizadas, coincidiendo con los resultados encontrados por otros autores.

La verificación del efecto en el tiempo en el fraguado de la adición de AEH en diferentes intervalos de tiempo se encontró que cuando se añade el AEH después de la mezcla del hormigón, el efecto estabilizador del AEH disminuye y esta disminución es proporcional al retraso de tiempo en la adición. Cuando se añadió el AEH 1h después de mezclar el tiempo de inicio de fraguado disminuyó 4.5h. Con el tiempo de 3h la reducción fue de 5.5 h, en relación con el tiempo de inicio de fraguado cuando se añadió el AEH el momento de la mezcla (0h). La resistencia a la compresión indicó que la adición de AEH posteriormente a la mezcla no afecta a la resistencia del hormigón, siendo que a edades de 3, 7 y 28 días los resultados fueron casi idénticos a los de la muestra de referencia.

Los cálculos realizados para verificar la viabilidad económica en el caso estudio muestran que un volumen de 37.5 m³ de residuos de hormigón, los cuales corresponden al 88% del hormigón devuelto en un trimestre a la CD, fue reutilizado con soporte de AEH y generó una ganancia de más de US\$ 7,000 durante el período

estudiado (unos 28.000 dólares al año), en comparación con la opción tradicional para la eliminación en el vertedero de residuos inertes. La simulación de la producción total en Centrales de Brasil, con datos del año 2010, mostró que si la Central ha optado por la reutilización de sus residuos de hormigón –en volumen estimado de 350,000 m³ al año– tendría una ganancia anual de más de 58 millones de dólares.

En cuanto a los beneficios ambientales, se puede concluir que la reutilización del hormigón residual disminuye considerablemente el volumen de residuos. Por otra parte, la reutilización de los residuos reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En el estudio de caso, esta reducción es equivalente a 31.2 toneladas de CO₂ al año y para la simulación de todas las CDs en Brasil se indicó una reducción equivalente a 73 mil toneladas de CO₂ al año.

Se espera que este estudio contribuya para que las Centrales Dosificadoras tengan una nueva mirada a su sistema de producción, a través de la reutilización de los residuos de hormigón. Mediante el reciclaje, además del beneficio económico obtenido por el Central, se puede contribuir en forma sostenible con en el proceso de producción de la industria de la construcción.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Conpasul Construcción y Servicios Ltda. por proporcionar los materiales utilizados en la obra, y al Ing. Fabio A. Viecili, por el suministro de equipo y orientación técnica. Gracias a CNPq por el apoyo financiero en forma de becas de productividad. Por último, también las gracias a Feevale y UNISINOS, las cuales ofrecieron las condiciones de investigación.

Referencias Bibliográficas

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1991). *NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). *NBR NM 101- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). *NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de concreto*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 9 - Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

Benini, H. (2005). *Reaproveitamento de concreto fresco dosado em central com o uso de AEH*. Disertación de máster no publicada, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama (2002). *Resolução n.307*. Conama, Brasília.
- Buttler, A. M. (2003). *Concretos com agregados graúdos e reciclados de concreto: Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. Disertación de máster no publicada, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction (1999). Agenda 21 on Sustainable Construction, *CIB Report Publication n.237*. CIB, Rotterdam, The Netherlands.
- European Cement Association - Cembureau (2011). *Activity Report 2011*. Cembureau, Brussels, Belgium. Aceso en 2 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.cembureau.eu/sites/default/files/AR2011.pdf>.
- International Energy Agency – IEA (2007). *Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions*. OECD/IEA, Paris, France.
- International Energy Agency – IEA (2010). *Energy technology perspectives – 2010*. IEA, Paris, France.
- John, V. M. & Zordan, S. E. (2001). Research and development methodology for recycling residues as building materials - A proposal. *Waste Management*, 21 (3), 213-219.
- Kinney, F. D. (1989). Reuse of returned concrete by hydration control: Characterization of a new concept, 19-40. In: Malhotra, V. M. (Ed.) *Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete* (ACI SP119). Detroit: American Concrete Institute.
- Lima, J. A. R. (2010). *Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas*. Tesis de doctorado no publicada, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (3rded). New York: McGraw-Hill.
- Melbye, T. (1994). *Shotcrete para soporte de rocas*. International Underground Construction Group (MBT), Switzerland.
- Okawa, Y., Yamamiya, H. & Nishibayashi, S. (2000). Study on the reuse of returned concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52 (2), 109-115.
- Paolini, M. & Khurana, R. (1998). Admixtures for recycling of waste concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20, 221-229.
- Paulon, V. A. & Granato, G. S. (2003). *Reaproveitamento do concreto através do controle de hidratação do cimento com o uso de aditivo estabilizador*. Comunicação apresentada no 45º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, São Paulo.
- Pinto, T. P. (1999). *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. Tesis de doctorado no publicada, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Plessis, C., et al. (2002). *Agenda 21 for sustainable construction in developing countries – v.1*. CIB/UNEP-IETC, Pretoria, South Africa.
- Rezende, L., Levy, S. & Djanikian, J. G. (1996, agosto). *Tratamento e disposição de hormigón residual em centrais dosadoras*. Comunicação apresentada na 38^a Reunião Anual do IBRACON. Anais, 2, 499-506. Ribeirão Preto, Brasil.
- Roaf, S., Fuentes, M. & Thomas, S. (2012). *Ecohouse: A design guide* (4thed). Elsevier, Oxford, UK: Architectural Press.
- SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2012). *Press Kit SNIC 2011*. SNIC, Rio de Janeiro, Brasil. Aceso en 20 de junio de 2012. Disponible en: http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2011.pdf.
- Souza, U. E. L., Paliari, J. C., Agopyan, V. & Andrade, A. C. (2004). Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: Uma abordagem progressiva. *Ambiente Construído*, 4(4), 33-46.
- Tam, V. W. Y. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 821-828.
- Wang, S. & Han, X. (2012). Sustainable cement production with improved energy efficiency and emerging CO2 mitigation. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2, 123-128
- Zozula, T. W. (2009). *Teores ótimos de aditivos estabilizadores de hidratação para recuperação de concretos retornados*. Disertación de máster no publicada, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, Brasil.