

# Efecto de la carbonatación sobre las propiedades físicas de un agregado reciclado fino comercial

## Effect of carbonation on the physical properties of a commercial fine recycled aggregates

ÁLVARO GUZMÁN APONTE<sup>1</sup> - NANCY TORRES CASTELLANOS<sup>2</sup>

1. Ingeniero de Materiales. Doctorado en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniería Industrial. Centro de Investigaciones en Manufactura y Servicios (Cimser), Bogotá, Colombia.

2. Ingeniera civil. Maestría en Estructuras. Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales. Bogotá, Colombia.

alvaro.guzman@escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2017 Aceptado: 22/03/2017

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización física de agregado reciclado fino (ARF) comercial y el efecto del uso del proceso de carbonatación para mejorar sus propiedades físicas. Antes y después del proceso de carbonatación, se determinaron las propiedades físicas de los agregados reciclados finos comerciales, incluyendo la absorción de agua y la densidad. Se evidenció que la carbonatación no causa un cambio marcado en la densidad del ARF, pero sí ocasiona una reducción significativa de la absorción de los ARF (7,3 y 3,1 % en ARF y ARFC-20, respectivamente). Además, en las condiciones de carbonatación utilizadas en esta investigación (concentraciones de CO<sub>2</sub> del 10 %, humedad relativa del 65 % y temperatura de 25 °C), tiempos de exposición a carbonatación mayores de quince días (ARFC-15) no evidencian un cambio marcado en las propiedades físicas de absorción y densidad de los ARF.

**Palabras claves:** agregado reciclado fino comercial, carbonatación, absorción de agua, concreto.

### Abstract

In this paper, the results of the physical characterization of commercial fine recycled aggregates (FRA) and the use of a carbonation process to enhance their properties are presented. Before and after the laboratory carbonation process, the physical properties of the FRA, including water absorption and density were estimated. Carbonation showed no significant changes in density values, but resulted in reduction in water absorption values (7.3% and 3.1% in ARF and ARFC-20, respectively). Moreover, under the carbonation conditions (10% CO<sub>2</sub>, 65% HR and 25 °C) exposure times greater than 15 days (ARFC-15) did not show a marked change in the physical properties (absorption and density) of the RFA.

**Keywords:** commercial fine recycled aggregates, carbonation, water absorption, concrete.

## INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es una de las grandes fuentes de generación de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por lo que contribuye de manera significativa al calentamiento global (Yamasaki, 2003; Rehan & Nehdi, 2005). En Europa, por ejemplo, la construcción y la operación de las edificaciones representan entre el 36 y el 40 % del total de la energía consumida y del  $\text{CO}_2$  emitido en ese continente (Urge, 2007; Airaksinen & Matilainen, 2011), mientras que en Estados Unidos constituye el 54 % (Guggemos & Horvath, 2005). Por otra parte, dado que en el concreto los agregados ocupan entre el 60 y el 75 % de su volumen (Kosmatka et al., 2002), el sector de la construcción ha sido catalogado como uno de los grandes consumidores de recursos naturales. Bleischwitz & Bahn-Walkowiak (2011) estimaron que la demanda mundial de agregados es de casi 20.000 millones de toneladas al año, con un crecimiento proyectado del 4,7 % anual.

A escala mundial, cada año se producen millones de toneladas de residuos provenientes de las actividades de construcción y demolición (RC&D), de los cuales se considera que el 50 % corresponden a residuos de concreto (Li, 2002). En Bogotá, en el año 2009, se produjeron aproximadamente 12 millones de toneladas de RC&D, el equivalente a 70 torres Colpatria (Méndez, 2011), que ocasiona impactos negativos en la salud, el espacio público y el medio ambiente (Méndez, 2011; Pinzón, 2013).

Con el propósito de que los centros urbanos alcancen un escenario sustentable y resiliente, la industria de la construcción debe implementar prácticas sostenibles para minimizar los impactos ambientales en todas las fases del ciclo de vida de la estructura. Es así como el reciclaje de los residuos de demolición y construcción del concreto, para la manufacturación de agregados, se constituye en un valioso mecanismo que permite la preservación de los recursos naturales y el ahorro de energía incorporada en los materiales empleados en la obra, contribuyendo a la construcción de estructuras amigables con el medio ambiente (Roussat et al., 2009).

La producción y uso de agregados reciclados de concreto (ARC) es una práctica común en países desarrollados. En Europa, Alemania representa el país con mayor producción de ARC, con una tasa anual cercana a 60 millones de toneladas (Mt), seguida por el Reino Unido con 49 Mt, los Países Bajos con 20 Mt y Francia

con 17 Mt (European Aggregates Association, 2012). Dosho (2007) reportó que en Japón se registra una tasa de aproximadamente 98 % de reciclaje de RC&D de concreto, para manufacturar ARC. Sin embargo, varios autores han reportado que las propiedades mecánicas y de durabilidad de especímenes de concreto, elaborados con ARC, son inferiores en comparación con especímenes elaborados con agregados naturales (Ravindrarajah & Tam, 1985; Khatib, 2005; Poon & Chan, 2007; Liu et al., 2011).

En los últimos años, se han desarrollado varias investigaciones con el fin de implementar novedosas metodologías verdes que disminuyan las emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas por el sector de la construcción. El desarrollo e implementación de energías renovables, así como la fabricación de cementos ecológicos, contribuyen a reducir las emisiones de dióxido de carbono, pero no son suficientes para mitigar totalmente los impactos climáticos producidos por las actividades de la construcción (Fernández et al., 2004). Es así como se ha desarrollado una tecnología para captar y almacenar  $\text{CO}_2$  en residuos industriales alcalinos (DIA, por su sigla en inglés) para utilizarlos posteriormente en la fabricación de materiales de construcción, mediante un proceso innovador denominado tecnología de carbonatación acelerada (TCA), que permite fijar el dióxido de carbono en la estructura interna de los DIA ricos en óxidos de calcio ( $\text{CaO}$ ) y óxidos de magnesio ( $\text{MgO}$ ), con la ventaja de que los procesos térmicos involucrados en el procesamiento de los DIA, como la calcinación del clinker del cemento, aumentan la reactividad de sus componentes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ , entre otros), facilitando la fijación del  $\text{CO}_2$  (Huijgen et al., 2006; Sanna et al., 2012; Bobicki et al., 2012).

La carbonatación es un fenómeno natural que afecta con frecuencia los materiales cementicios y puede tener efectos perjudiciales sobre estructuras de concreto reforzadas con acero. Por otra parte, se ha demostrado que la carbonatación actúa positivamente en la inmovilización de suelos contaminados con metales pesados y otros residuos (Macías et al., 1997; Walton et al., 1997; Bin-Shafique et al., 1998; Valls & Vázquez, 2001; Venhuis & Reardon, 2001). La inmovilización de metales tóxicos se produce a través de varios mecanismos, ya sea debido al bajo ambiente alcalino proporcionado por las reacciones ocurridas durante la carbonatación, en la cual la mayoría de los metales exhiben su mínima

solubilidad; la conversión de metales en carbonatos ( $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{PbCO}_3$ ,  $\text{ZnCO}_3$ ), de menor solubilidad; la afinidad de ciertos metales por la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), con la subsecuente formación de nuevas fases minerales, o por medio de encapsulación física, en la que metales como Ni y Cr son retenidos en el sistema de poros refinado (la calcita bloquea y rellena el sistema de poros) (Fernández et al., 2004).

La carbonatación acelerada de desechos peligrosos es una versión acelerada y controlada del proceso que ocurre naturalmente. La mezcla sólida es carbonatada en un ambiente gaseoso rico en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el cual promueve el rápido endurecimiento del producto en minutos (Lange, 1997). En Inglaterra se ha construido una planta para la producción de agregados carbonatados elaborados con diferentes clases de desechos industriales ricos en CaO, en un sitio dispuesto para botadero de basuras domésticas y comerciales. El dióxido de carbono generado por dichas basuras se recolecta en reactores, con el fin de usar este  $\text{CO}_2$  para el procesamiento de los agregados (Gunning, 2011); así, los ARC representan una alternativa interesante para almacenar dióxido de carbono, debido a que el alto contenido de calcio presente en el mortero adherido al agregado le permite fijar  $\text{CO}_2$  hasta un 16,5 % de su peso propio, siguiendo el mecanismo de reacción reportado por Fernández et al. (2004) y Sanna et al. (2012).

Bobicki et al. (2012) estimaron que los ARC pueden captar hasta 60 Mt de  $\text{CO}_2$  cada año (cálculos realizados teniendo en cuenta los RD&C de concreto generados en la Unión Europea, China y Estados Unidos). Autores como Engelsen et al. (2005) y Jonsson y Wallevik (2005) demostraron en sus investigaciones el mejoramiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ARC después de haber sido expuestos al proceso de carbonatación acelerada, presentando cambios en la estructura de poros, acompañados por un ligero incremento en la densidad, y una disminución de la porosidad y absorción de agua (Kou & Poon, 2012; Kou et al., 2012; Kou et al., 2014). El cambio en el sistema de poros puede explicarse por el incremento en volumen de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), compuesto resultante de la reacción entre el  $\text{CO}_2$  y las fases que contienen calcio, de aproximadamente 11,7 % en relación con el volumen del hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (Pan et al., 2012). Adicionalmente, la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) bloquea el sistema de poros debido a su baja solubilidad (Fernández et al., 2004).

Kou et al. (2014) evaluaron el comportamiento de mezclas de concreto elaboradas con agregados gruesos reciclados carbonatados (AGRC) y no carbonatados (AGR), observando que las mezclas de concreto preparadas con AGRC presentaron mejores resistencias que las mezclas de concreto confeccionadas con AGR, registrando valores ligeramente inferiores a la muestra control (100 % de agregados gruesos naturales). Por otra parte, Kou y Poon (2012) estudiaron diferentes factores que tienen influencia en el proceso de carbonatación de los ARC, tales como el tiempo de curado, el tamaño de las partículas y el contenido de humedad de los agregados reciclados, y encontraron que los mayores valores de absorción de agua logran mayor relación de ganancia de masa y porcentaje de carbonatación a causa de la mayor cantidad de porosidad abierta de los ARC, que facilita el acceso para que el  $\text{CO}_2$  penetre dentro del ARC. Además, los ARC con tamaño de partícula más fina y mayor superficie específica pueden absorber un mayor porcentaje de  $\text{CO}_2$  durante el proceso de carbonatación.

La carbonatación del mortero adherido al ARC es posible debido a que la porción de cemento antiguo contiene hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), por lo que puede reaccionar con el dióxido de carbono. Básicamente, la reacción se describe como se indica a continuación (Johannesson & Utgenannt, 2001):



Otros productos de hidratación, tales como el gel de CSH (silicato de calcio hidratado), también parecen convertirse a carbonato de calcio y agua, y un gel de CSH modificado con una relación rebajada de Ca/Si (Richardson et al., 1993) o un mayor grado de gel de sílice polimerizada (Slegers & Rouxhet, 1976; Yousuf et al., 1993).

Por otra parte, teniendo en cuenta que la industria cementera es responsable de generar aproximadamente un 5 % del total de las emisiones globales antropogénicas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Hendriks et al., 1998; Humphreys & Mahasenan, 2002). Investigadores han enfatizado en la habilidad que tienen los materiales basados en cemento, de absorber casi la misma cantidad de  $\text{CO}_2$ , que fue químicamente liberada a la atmósfera durante el proceso de calcinación del cemento. Se sugiere así que la cantidad captada de  $\text{CO}_2$  en el concreto

debería considerarse en las evaluaciones ambientales, de la misma manera como la absorción de CO<sub>2</sub> (por proceso de fotosíntesis) es estimada en el análisis del ciclo de vida de las estructuras construidas con materiales de madera (Lagerblad, 2005; Collins, 2010). Por ello es de considerar la inminente necesidad de implementar estrategias que ayuden a combatir el cambio climático en Colombia, y debido a la inexistente información en la región acerca del comportamiento de los ARC carbonatados que mejoran sus propiedades físicas y químicas, se podría facilitar su reutilización en una variedad de aplicaciones de construcción, como losas de concreto para pavimentos. Con base en lo anterior se planteó la presente investigación, que se enfocó en evaluar las principales propiedades físicas de los agregados reciclados finos (ARF) comerciales, tratados con la innovadora tecnología de “carbonatación acelerada”, con respecto a agregados finos naturales ordinariamente empleados en la fabricación de concretos convencionales, y así poder evaluar la viabilidad de su uso. Esto permite considerar la carbonatación de los ARF como una posible alternativa que contribuya a su valorización sostenible y al cerramiento del ciclo de carbono en las estructuras de concreto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

El RC&D empleado en esta investigación fue agregado fino comercializado en Bogotá por una empresa de la región. El agregado fino natural (AFN) correspondió a un agregado fino proveniente del municipio de Tabio (Cundinamarca).

### Metodología

La metodología desarrollada en la presente investigación consistió en un muestreo y una homogeneización de los agregados finos reciclados comerciales. Una vez homogeneizados, se sometieron a carbonatación (agregado reciclado fino comercial carbonatado (ARFC)) haciendo uso de una cámara de carbonatación de laboratorio cuyas condiciones se mencionan a continuación: concentraciones de CO<sub>2</sub> del 10 %, temperatura de 25 °C y una humedad relativa del 65 %. Se escogieron estas condiciones porque el Grupo de Investigación

en Estructuras y Materiales de la Escuela ya las había trabajado en investigaciones anteriores.

En aras de evidenciar el impacto de la carbonatación sobre los ARF, y conocer el tiempo óptimo de carbonatación, se determinaron sus propiedades físicas (densidad y absorción) a tiempos de exposición de 0, 3, 5, 10, 15 y 20 días. La caracterización de los ARF, AFN y aquellos ARFC, se hizo con base en las normas técnicas mencionadas seguidamente (tabla 1).

**Tabla 1**  
Normas empleadas en la caracterización de los agregados

Ensayo	Ensayo
Análisis granulométrico	NTC 77, ASTM C136
Masa unitaria de los agregados	NTC 92
Impurezas orgánicas	NTC 127
Densidad, absorción y porosidad	NTC 237
Contenido de humedad	NTC 1776

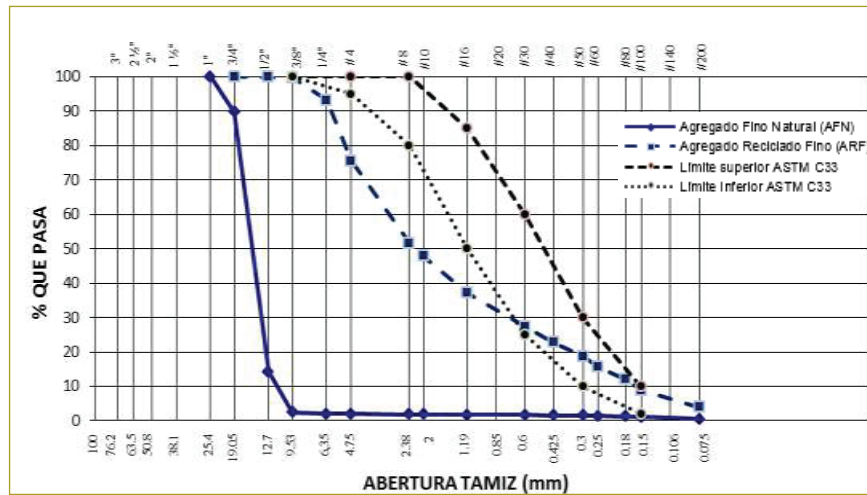
## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Caracterización física de los agregados finos sin carbonatar

Macroscópicamente, los agregados reciclados finos comerciales presentan similitudes con los agregados finos naturales; sin embargo, es importante conocer su distribución granulométrica para saber si se encuentran dentro de las curvas límites para agregado fino que deben utilizarse para concreto (acorde con la norma ASTM C-33).

En la figura siguiente se puede ver que el ARF muestra una curva de distribución similar a aquella especificada por la norma ASTM C-33, lo que permite denotar que el ARF presenta una distribución granulométrica adecuada para emplearlo en la fabricación de concretos; igualmente, es posible observar que la distribución granulométrica del AFN posee gran cantidad de partículas gruesas, encontrándose alejada del comportamiento especificado para el agregado fino empleado en concreto (norma ASTM C-33) (figura 1).

Varios autores han mencionado que el mortero de cemento adherido en los agregados reciclados lleva a un agregado de calidad inferior (menor densidad, mayor absorción, mayor porosidad) en comparación con el agregado natural, particularmente en la fracción más



**Figura 1.** Curvas de distribución granulométrica de los agregados finos empleados (ARF y AFN). Fuente: Autores.

fina (Geng & Sun, 2013; McNeil & Kang, 2013; Kou et al., 2014). En la tabla siguiente se puede corroborar lo anteriormente mencionado, evidenciando que el ARF presenta menor valor de densidad y mayor absorción (2,59 g/cm<sup>3</sup> y 7,3 %, en ese orden), en comparación con los AFN (2,64 g/cm<sup>3</sup> y 2,1 %, respectivamente (tabla 2).

La mayor absorción de agua de los ARF llevará a que las mezclas de concreto en estado fresco que los incorporen requieran mayor contenido de agua que aquellas mezclas de concreto con agregado natural, lo que probablemente conduzca a una alta porosidad en el concreto. Como resultado de esto, el concreto endurecido que incorpore ARF tendrá una pobre durabilidad, baja resistencia y bajo módulo elástico (Geng & Sun, 2013). Con base en lo anterior, sería importante

poder reducir la absorción de agua de los ARF al valor mínimo permisible.

### Caracterización física de los agregados finos reciclados carbonatados

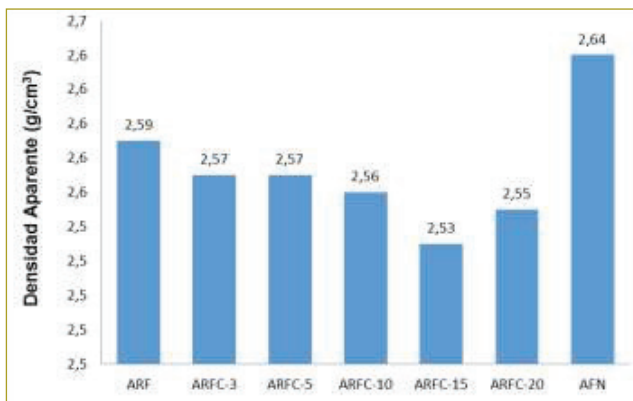
Dado que uno de los factores con mayor relevancia en la caracterización de los ARF es su elevada capacidad de absorción de agua en comparación con los AFN, (es de esperar que la carbonatación de los ARF disminuya la absorción de agua de éstos (Kou & Poon, 2012; Kou et al., 2012; Kou et al., 2014), por lo que el menor valor de absorción de agua se estableció como el parámetro óptimo para mejorar físicamente los ARF.

**Tabla 2**  
Características físicas de los agregados finos (AFN y ARF)

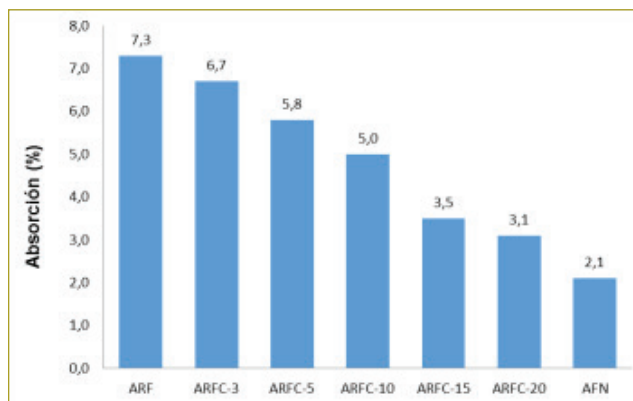
Ensayo	Norma	AFN	ARF
Densidad aparente (Bulk) (g/cm <sup>3</sup> )	NTC 237	2,64	2,59
Absorción (%)	NTC 237	2,1	7,3
Masa unitaria suelta	NTC 92	1,58	1,40
Masa unitaria compacta	NTC 92	1,70	1,74
Módulo de finura	NTC 77	3,4	3,8
Tamaño máximo nominal	NTC 77	3/8" (9,5 mm)	3/8" (9,5 mm)
Tamaño máximo	NTC 77	1/2" (12,7 mm)	3/8" (9,5 mm)
Impurezas orgánicas	NTC 127	#2	#2

Fuente: Autores.

A renglón seguido se aprecian las propiedades físicas (densidad y absorción) de los ARF, AFN y aquellos ARF expuestos a carbonatación a tiempos de 3, 5, 10, 15 y 20 días (ARFC-3, ARFC-5, ARFC-10, ARFC-15 y ARFC-20, respectivamente) (figuras 2 y 3).



**Figura 2.** Densidad de los agregados finos (ARF, AFN y ARFC). Fuente: Autores.



**Figura 3.** Absorción de los agregados finos (ARF, AFN y ARFC). Fuente: Autores.

En general, se observa que el incremento del tiempo de carbonatación de los ARF no conduce a cambios marcados en la densidad, pero sí en la reducción de la absorción de agua del ARF (figuras 2 y 3). Este comportamiento es acorde con el mencionado por autores como Zhang et al. (2014), quienes indicaron que no hay cambios marcados en la densidad de los agregados reciclados después de ser carbonatados, mientras que propiedades como la absorción de agua y la porosidad se ven reducidas. Se evidencia, por tanto, que la absorción de agua se reduce hasta un mínimo de 3,1 %, a tiempos

de exposición a carbonatación de 20 días; no obstante, comparada con la absorción a 15 días de exposición a carbonatación (3,5 %), no muestra un cambio marcado. Este comportamiento podría atribuirse al hecho de que los productos de la carbonatación llenan los poros por carbonatación del hidróxido de calcio, que es una de las principales reacciones, acompañada por un 11,8 % de incremento en el volumen del sólido (acorde con la ecuación 1) (Johannesson & Utgenannt, 2001).

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de las propiedades físicas (densidad y absorción), resulta viable pensar en el uso de agregados reciclados finos (ARF) comerciales y aquellos carbonatados (ARFC), para la fabricación de concretos convencionales, ya que esto permite generar beneficio económico y reducir el impacto sobre el medio ambiente.

Los resultados experimentales permitieron confirmar que el tratamiento de carbonatación no causa un cambio marcado en la densidad del ARF, pero sí ocasiona una reducción significativa de la absorción de los ARF.

Tiempos de exposición a carbonatación de los ARF superiores a 15 días (ARFC-15) no evidencian un cambio marcado en las propiedades físicas de absorción y densidad de los ARF.

## FINANCIAMIENTO

Para el desarrollo de este proyecto se contó con el apoyo económico de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia), en particular de la investigación “Valoración de agregados reciclados de concreto a través de la técnica de carbonatación acelerada” (convocatoria interna de 2015).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia) por el apoyo brindado para la financiación y el desarrollo de este estudio, sin lo cual el proyecto no habría podido desarrollarse.

## REFERENCIAS

- Airaksinen, M. & Matilainen, P. (2011). A carbon footprint of an office building. *Energies*, 4, 1197-1210.
- Bin-Shafique, S., Walton, J., Gutiérrez, N., Smith, R. & Tarquin, A. (1998). Influence of carbonation on leaching of cementitious waste forms. *J. Environ. Eng*, 22, 463-467.
- Bleischwitz, R. & Bahn-Walkowiak, B. (2011). Aggregates and construction markets in Europe: towards a sectorial action plan on sustainable resource management. *Miner Eng*, 22, 159-176.
- Bobicki, E., Liu, Q., Xu, Z. & Zeng, H. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 302-320.
- Collins, F. (2010). Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 549-556.
- Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing Method. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27-42.
- Engelsen, C., Mehus, J. & Pade, C. (2005). Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete. Disponible en <[http://nordicinnovation.org/Global/\\_Publications/Reports/2005/03018\\_carbon\\_dioxide\\_uptake\\_in\\_demolished\\_and\\_crushed\\_concrete.pdf](http://nordicinnovation.org/Global/_Publications/Reports/2005/03018_carbon_dioxide_uptake_in_demolished_and_crushed_concrete.pdf)>, Consultado el 10 de marzo de 2017. In Tech. Rep., Oslo: Norwegian Building Research Institute.
- European Aggregates Association Annual Review (2012). Brussels, Belgium.
- Fernández, M., Simons S., Hills, C. & Carey, P. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. *Journal of Hazardous Materials*, 112(3), 193-205.
- Geng, J. & Sun, J. (2013). Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 814-820.
- Guggemos, A. & Horvath A. (2005). Comparison of environmental effects of steel and concrete-framed buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(8), 93-101.
- Gunning, J. (2011). Accelerated carbonation of hazardous wastes. Disponible en <[http://gala.gre.ac.uk/7135/1/Peter\\_John\\_Gunning\\_Accelerated\\_carbonation\\_2011.pdf](http://gala.gre.ac.uk/7135/1/Peter_John_Gunning_Accelerated_carbonation_2011.pdf)>. Consultado el 20 de marzo de 2017. In School of Science, University of Greenwich, p. 236.
- Hendriks, C., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K. & Riemer, P. (1998). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. in Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Disponible en <<http://www.wbcscement.org/pdf/tf1/prghgt42.pdf>>. Consultado el 5 de marzo de 2017. Austria: IEA GHG R&D Program.
- Huijgen, G.R., Comans, R. & Witkamp, G. (2006). Energy Consumption and Net CO<sub>2</sub> Sequestration of Aqueous Mineral Carbonation. *Industry Engineering Chemistry*, 45, 184-194.
- Humphreys, K. & Mahasenan, M. (2002). Toward a sustainable cement industry. Substudy 8, climate change. Disponible en <[http://www.cement.ca/images/stories/wbcscd-batelle\\_2002\\_climate\\_change\\_-\\_substudy\\_8.pdf](http://www.cement.ca/images/stories/wbcscd-batelle_2002_climate_change_-_substudy_8.pdf)>, Consultado el 5 de marzo de 2017. World Business Council for Sustainable Development.
- Johannesson, B. & Utgenannt, P. (2001). Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 31, 925-931.
- Jonsson, G. & Wallevik, O. (2005). Information on the use of concrete in Denmark, Sweden, Norway and Iceland. Disponible en <[http://www.nordicinnovation.org/Global/\\_Publications/Reports/2005/03018\\_background\\_report\\_information\\_on\\_the\\_use\\_of\\_concrete\\_in\\_nordic\\_countries.pdf](http://www.nordicinnovation.org/Global/_Publications/Reports/2005/03018_background_report_information_on_the_use_of_concrete_in_nordic_countries.pdf)>, Consultado el 5 de marzo de 2017. In Tech. Rep. Reykjavik: Icelandic Building Research Institute.
- Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement & Concrete*, 35, 763-769.
- Kosmatka, S., Kherkhoff, B. & Panarese, W. (2002). Design and control of concrete mixtures. Chapter 5.
- Kou, S. & Poon, C. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76.
- Kou, S., Zhan, B. & Poon, C. (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction Building Materials*, 28, 549-56.
- Kou, S., Zhan, B. & Poon, C. (2014). Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 45, 22-28.
- Lagerblad, B. (2005). Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle: State of the Art. Disponible en <[https://www.dti.dk/\\_media/21043\\_769417\\_Task%201\\_final%20report\\_CBI\\_Bjorn%20Lagerblad.pdf](https://www.dti.dk/_media/21043_769417_Task%201_final%20report_CBI_Bjorn%20Lagerblad.pdf)>. Consultado el 8 de marzo de 2017. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Lange, L.C. (1997). Carbonation of Cement Solidified Hazardous Wastes. Queen Mary and Westfield College.
- Li, W. (2002). Composition Analysis of Construction and Demolition Waste and Enhancing Waste Reduction and Recycling in Construction Industry in Hong Kong. Hong Kong: Department of Building and Real Estate. The Hong Kong Polytechnic University.
- Liu, Q., Xiao, J. & Sun, Z. (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement & Concrete*, 241, 1050-1057.
- Macias, A., Kindness, A. & Glasser, F.P. (1997). Impact of carbon dioxide on the immobilisation potential of cemented wastes: chromium. *Cement & Concrete Research*, 27(2), 215-225.
- McNeil, K. & Kang, T. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 61-71.
- Méndez, S. (2011). Aprovechamiento de escombros: una oportunidad para mejorar la infraestructura de las comunidades marginadas. In II Conferencia Internacional "Gestión de Residuos en América Latina (GRAL)".
- Pan, S., Chang, E., & Chiang, P. (2012). CO<sub>2</sub> Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 770-791.
- Pinzón, A. (2013). *Formulación de lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Poon, C. & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling*, 50(3), 293-305.
- Ravindrarajah, R.S. & Tam, T.C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 29-38.
- Rehan, R. & Nehdi, M. (2005). Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*, 8(2), 105-114.
- Richardson, G., Groves, G., Brought, A. & Dobson, C. (1993). The carbonation of OPC and OPC/silica fume hardened cement pastes in air under conditions of fixed humidity. *Advances in Cement Research*, 5(18), 81-86.
- Roussat, N., Dujet, C. & Méhu, J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. *Waste Management*, 29(1), 12-20.

Sanna, A., Dri, M., Hall, M. & Maroto-Valer, M. (2012). Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) – A UK perspective. *Applied Energy*, 99, 545-554.

Slegers, P. & Rouxhet, P. (1976). Carbonation of the hydration products of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*, 6(3), 381-388.

Urge, D. (2007). Climate change mitigation in the building sector: the findings of the 4th Assessment report of the IPCC. Disponible en <<https://www.ipcc.ch/pdf/presentations/poznan-COP-14/diane-urge-vorsatz.pdf>>. Consultado el 1 de marzo de 2017. Center for climate change and sustainable energy policy.

Valls, S. & Vázquez, E. (2001). Accelerated carbonation of sewage sludge–cement–sand mortars and its environmental impact. *Cement & Concrete Research*, 31(9), 1271-1276.

Venhuis, M.A. & Reardon, E.J. (2001). Vacuum method for carbonation of cementitious waste forms. *Environ. Sci. Technol*, 35(20), 4120-4125.

Walton, J., Bin-Shafique, S., Smith, R., Gutiérrez, N. & Tarquin, A. (1997). Role of carbonation in transient leaching of cementitious waste forms. *Environ. Sci. Technol*, 31(8), 2345-2349.

Yamasaki, A. (2003). An Overview of CO<sub>2</sub> Mitigation Options for Global Warming-Emphasizing CO<sub>2</sub> Sequestration Options. *Journal of Chemical engineering of Japan*, 36 (4), 361-375.

Yousuf, M., Mollah, A., Hess, R., Tsai, Y. & Cocke, D. (1993). An FTIR and XPS investigations of the effects of carbonation on the solidification/stabilization of cement based systems-Portland type V with zinc. *Cement and Concrete Research*, 23(4), 773-784.