

*Properties of
recycled aggregates
concrete using active
and inert additions*

Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte



Autores

E. PAVÓN Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría,
La Habana, Cuba.

M. ETXEBERRIA Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
Contacto: miren.etxeberria@upc.edu

I. MARTÍNEZ Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría,
La Habana, Cuba.

Fecha de recepción 08/08/2011

Fecha de aceptación 15/11/2011

Resumen

El trabajo de investigación presentado en este artículo describe las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones fabricados con el 25% y 100% de árido grueso reciclado utilizando adiciones activa e inerte (microsilice y filler de escoria de arco eléctrico).

La fase experimental realizada consta de dos etapas: En la etapa 1 se realizó un estudio físico-mecánico (resistencia a compresión y velocidad de ultrasonido); En la etapa 2 se evaluó la durabilidad de los hormigones reciclados

fabricados con adiciones mediante los ensayos de difusión de cloruros, resistividad, absorción y porosidad, lo que permitió comparar los resultados con el hormigón convencional fabricado con similar dosificación. Los resultados demuestran que los hormigones reciclados obtienen propiedades físicas y mecánicas inferiores al hormigón convencional. Sin embargo, la durabilidad del hormigón reciclado fabricado con adiciones activas mejora las propiedades del hormigón convencional.

Palabras clave: Reciclado, hormigón y adición.

Abstract

The research work presented in this paper describes the physical, mechanical and durability properties of concrete made with 25% and 100% of recycled coarse aggregates using active and inert additions. The experimental phase was carried by two stages: in stage 1, physical- mechanical properties (compressive strength and ultrasonic pulse velocity) were determined; in stage 2, the resistance to chloride ion

penetration, resistivity, absorption and porosity were analysed. The obtained results of recycled aggregate concrete were compared to those of conventional concrete. The results show that the physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete were lower than conventional concrete. However, the recycled aggregate concrete made with active additions improved the durability of conventional concrete.

Key words: Palabra, palabra y palabra.

1. Introducción

La fabricación de hormigón reciclado constituye una de las principales formas de lograr un uso eficiente de los residuos de construcción y demolición, especialmente cuando estas provienen de los escombros de hormigón. La lejanía de las canteras en La Habana y el grado de explotación de las más cercanas a ella, hace que el empleo del árido grueso reciclado se convierta en una alternativa que consiga la conservación de los recursos naturales, disminuya los costes de transporte, minimice el impacto ambiental que produce la deposición irregular de estos residuos y se logre su valorización (Pavón, 2010a; Pavón, Etxeberria & Díaz, 2010; Pavón, Etxeberria, Díaz & Acosta, 2008; Soler, Soto & Pavón, 2008).

En numerosos estudios internacionales se ha demostrado que los hormigones fabricados con 25% de árido grueso reciclado en sustitución al árido natural no sufre diferencias en las propiedades físico-mecánicas respecto a un hormigón convencional cuando las dos se fabrican con la misma dosificación (Etxeberria, Vázquez, Mari & Barra, 2007; Pavón, 2010b; Grupo de Trabajo, 2006; Sánchez, 2004). Los hormigones fabricados con 50% de árido reciclado o superior obtienen propiedades físicas como mecánicas inferiores al hormigón convencional siendo necesario utilizar mayor cantidad de cemento y una relación agua cemento inferior al hormigón convencional para conseguir propiedades similares al mismo.

Se ha de tener presente que en un país como Cuba, donde el clima es bastante agresivo en buena parte del mismo, por su forma alargada y estrecha y su situación geográfica, hacen que la presencia del aerosol marino y la humedad del ambiente afecte seriamente la durabilidad de las estructuras de hormigón. La utilización de adiciones mejora las propiedades del hormigón. De acuerdo a las propiedades mecánicas de los hormigones reciclados fabricados con adiciones, diversos investigadores concluyeron que la utilización de adiciones activas mejora dichas propiedades (Ann, Moon, Kim & Ryou, 2008; Berndt, 2009; Corinaldesi & Moriconi, 2009).

González-Fonteboa & Martínez-Abella (2008) demostraron que los hormigones fabricados con 50% de árido reciclado habiendo utilizado humo de sílice como adición obtenía resistencias superiores al hormigón convencional como al hormigón fabricado con 50% de árido reciclado y sin adiciones. Por otro lado los investigadores Kou, Poon, Lam & Chan (2008) ilustraron que la resistencia a compresión y a tracción del hormigón se reducía a medida que aumentaba el contenido de los áridos reciclados y las cenizas volantes.

De acuerdo al comportamiento a durabilidad, Olorunsogo & Padayachee (2002) demostraron que la conductividad de los cloruros aumenta al incrementar el porcentaje de árido reciclado utilizado. Sin embargo a media que se alarga la duración del curado, la conductividad del hormigón es menor. Kou, Poon, Lam & Chan (2008), encontraron que el uso de la ceniza volante en sustitución parcial al cemento incrementa la resistencia ante la penetración de cloruros. No obstante, esta resistencia disminuye a medida que incrementa el contenido de árido reciclado. De acuerdo con Tu, Hwang & Chao-Lung (2006), la resistencia a la penetración de cloruros fabricados con áridos reciclados puede llegar a ser muy alta, pero no recomienda utilizar áridos reciclados para hormigones de alta resistencia debido a problemas de durabilidad que pudieran sufrir.

Ann, Moon, Kim & Ryou (2008) indicaron que el uso de las escorias como las cenizas volantes como material cementiceo aumenta la resistencia a la penetración de cloruros. Se concluyó que la resistencia a los cloruros disminuye a medida que aumenta la cantidad de árido reciclado y reduce su calidad, sin embargo, la presencia tanto de ceniza volante como de escorias pudieran rellenar los poros de la matriz cementicea bloqueando el paso a los iones externos.

De acuerdo a la capacidad de absorción de agua, González-Fonteboa & Martínez-Abella (2008) encontraron que el hormigón fabricado con árido reciclado y utilizando o no humo de sílice tenía mayor capacidad de absorción de agua que el hormigón convencional. Además, concluyeron que el hormigón fabricado con árido reciclado humo de sílice tenía mayor capacidad de absorción que el no utilizado árido reciclado.

El trabajo que se presenta tiene como objetivo evaluar la influencia del empleo de adiciones activa e inerte (microsílice y filler de escoria de arco eléctrico) en el hormigón reciclado. Para ello se llevaron a cabo dos etapas experimentales. En la etapa 1 se realizó un estudio físico-mecánico (resistencia a compresión y velocidad de ultrasonido) de los hormigones fabricados con el 25% y 100% con o sin empleo de adiciones, los resultados fueron comparados con los obtenidos por un hormigón convencional. En la etapa 2 se evaluó la durabilidad de los hormigones reciclados fabricados con adiciones mediante los ensayos de difusión de cloruros, resistividad, absorción y porosidad, lo que permitió comparar los resultados obtenidos en estos hormigones, con el hormigón convencional fabricado con similar dosificación.

2. Materiales

2.1 Áridos

Tipología de áridos

Árido grueso reciclado (AR)

Se utilizó un árido reciclado proveniente de los escombros de elementos prefabricados (paneles de fachadas y pisos de hormigón). Estos escombros fueron triturados mediante una pequeña máquina de mandíbula a escala de laboratorio y posteriormente se separó la fracción gruesa mediante tamizado mecánico. La máquina empleada produce aproximadamente entre un 70 y 90% de árido grueso del peso total del escombro (Pavón, 2010b; I. Soto, O. Soto, Pavón & Díaz, 2009) y es la que tiene concebida el Ministerio de la Construcción para el tratamiento de los volúmenes de residuos producidos en la ciudad, ya que actualmente no existe ninguna planta de tratamiento a escala industrial destinada a la obtención de árido grueso reciclado (I. Soto, 2008).

Árido grueso natural (AN)

Se utilizó árido grueso natural calizo, proveniente de la cantera de Alacranes, en la provincia de Matanzas.

Las propiedades del árido grueso reciclado y natural se determinaron a través de las normativas cubanas que se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Normas utilizadas en la caracterización de los áridos gruesos

Propiedades	Norma
Granulometría	NC 178: 2002
Densidad y absorción de agua	NC 187: 2002
Masa volumétrica	NC 181: 2002
Índice de lajas	NC 189: 2002
Material más fino que el tamiz #200	NC 182: 2002

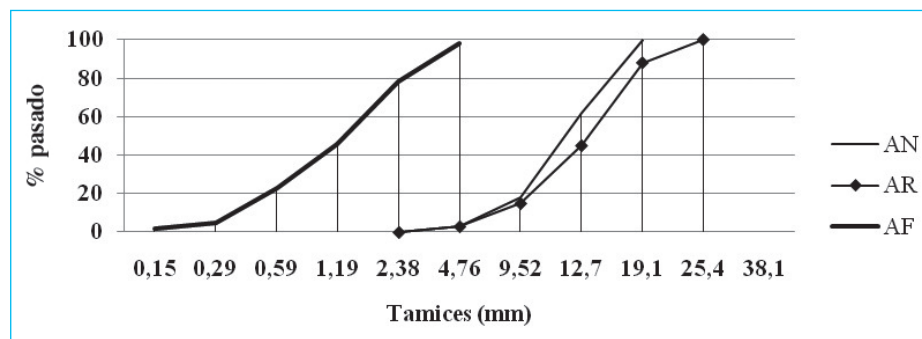
Árido fino (AF)

El árido fino empleado fue calizo proveniente de la cantera "La Victoria", se caracterizó de acuerdo con las normativas cubanas mostradas en la tabla, exceptuando la densidad y la absorción de agua en la cual se utilizó la NC 186: 2002.

Propiedades de los áridos

La figura 1 muestra la granulometría de los áridos empleados en el estudio. Se puede comprobar que el árido fino corresponde con una arena gruesa de módulo de finura superior a 3 y los áridos gruesos, tanto el natural como el reciclado, corresponden con gravas de 19 mm de tamaño máximo, y tienen granulometría similares.

Figura 1. Granulometría de los áridos



La tabla 2 muestra un resumen de las propiedades que se le evaluaron a los áridos. Los valores se corresponden con la media de tres muestras tomadas de cada material.

Tabla 2. Propiedades de los áridos

Propiedad	AF	AN	AR
Densidad (kg/dm ³)	2,45	2,61	2,25
Absorción de agua (%)	2,4	1,6	6,8
Masa volumétrica suelta (kg/dm ³)		1,38	1,20
Índice de lajas (%)		9	3
Material más fino que el tamiz #200 (%)	0,9	0,5	0,8

La absorción del árido reciclado supera en más de 4 veces a la del árido grueso natural, lo que constituye la mayor diferencia entre ambos. Debido a ello, el árido natural se utilizó en estado de presaturación en el momento de fabricación del hormigón. Por otra parte la forma del árido reciclado tiende a ser más redondeada que en el caso del árido grueso natural.

2.2 Cemento

El cemento utilizado fue un portland P-350 (35MPa de resistencia media a compresión a los 28 días), proveniente de la fábrica de Mariel, en la provincia de La Habana. Los ensayos de caracterización se realizaron de acuerdo con la normativa cubana NC 54-207:2000 y NC 54-206:2000, para los ensayos físico-mecánicos y químicos respectivamente. En la tabla 3 se muestran los resultados de la caracterización de dicho cemento.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas del cemento

Físicos	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	3100
Peso específico (kg/dm ³)	3,12
Mecánicos	
Resistencia-flexo tracción 28 días/ Flexion strength at 28 days (MPa)	7
Resistencia-compresión 28días/ Compressive strength at 28 days (MPa)	38

2.3 Adiciones

Filler de escoria de arco eléctrico

La escoria de arco eléctrico estudiada procede de la empresa siderúrgica Antillana de Acero, ubicada en el capitalino municipio del cotorro en Ciudad Habana, Cuba (O. Soto, I. Soto & Díaz, 2008). Este residuo abarca grandes áreas dentro del patio de la empresa ya que se generan elevados volúmenes (18.500 toneladas/año) (Raza, 2009).

El material utilizado como adición es la escoria que pasa por el tamiz de 50 micras. El peso específico de este material (filler de escoria) es de 2,93 kg/dm³ y la composición química se muestra en la tabla 4.

Microsilíce

Es la adición activa de las más disponibles en la ciudad.

La microsilíce utilizada se corresponde con el producto denominado MAPEPLAST SF de MAPEI. La densidad de la misma es de 2.3 kg/dm³ y su composición se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química del filler de escoria y la microsilíce

	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
Filler escoria	6,45	0,56	0,39	49,2	0,06	0,05	21,24	6,17	7,21	0,26
Microsilíce	0,12	0,03	0,01	1,04	0,48	0,07	98,67	0,28	0,29	0,23

2.4 Aditivo

El aditivo empleado es un superfluidificante (N100 RC), de Mapei de 1,16 g/l, uno de los más empleados en la fabricación de hormigón en la ciudad.

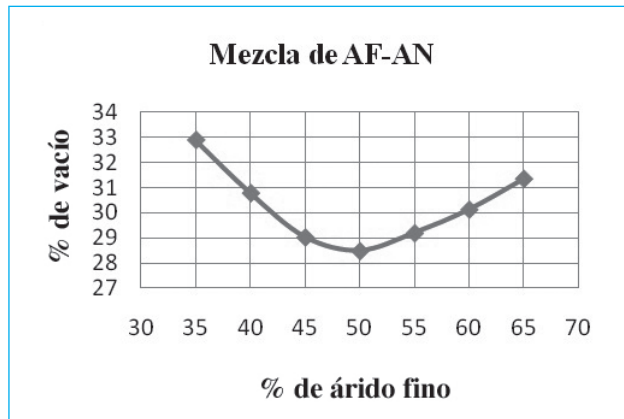
3. Fase experimental

El estudio experimental tuvo como objetivo determinar el comportamiento físico-mecánico y la durabilidad del hormigón reciclado de 25 y 100% de sustitución de árido grueso natural, con empleo de adiciones activa e inerte.

3.1 Fabricación de hormigón

Los hormigones se fabricaron con una relación agua/cemento de 0,45 correspondiente al valor máximo que establece la normativa cubana para ambientes de agresividad alta. La relación en que se mezclan los áridos se determinó a partir del método experimental para la determinación del por ciento de vacío mínimo. La figura 2 muestra el comportamiento de los áridos para los diferentes por cientos en peso de la arena.

Figura 2. Mezcla de árido fino (AF) y grueso (AN)



Al ser una gravilla con una granulometría bastante uniforme y el árido fino relativamente grueso, se obtuvieron valores de por ciento de vacíos elevados, superiores a 25% en todas las combinaciones de áridos. De ahí que se decidió utilizar el por ciento de vacío mínimo que se logra con una relación AF/AN de 0,5. La

cantidad de agua utilizada estuvo en función de lograr una consistencia plástica, con un contenido de cemento (P-350) que permitiese lograr con una relación agua/cemento 0,45, una resistencia para el hormigón patrón de 35 MPa a los 28 días. Una vez obtenido al patrón, se utilizó un aditivo superfluidificante para trabajar todos los hormigones con un asentamiento de 12 ± 2 cm en el cono de Abrams.

Para la fabricación de hormigones con árido reciclado, la sustitución del 25% y 100% de árido natural por el reciclado se realizó en peso teniendo en cuenta la densidad del material. Las adiciones se utilizaron en sustitución al 5% y 10% del peso del cemento, luego, teniendo en cuenta su densidad, se ajustó el valor del árido fino.

Tal y como se puede ver en la tabla 5, se fabricaron hormigones de 25% de árido grueso reciclado (HR-25), con 5 y 10% de sustitución de filler de escoria de arco eléctrico (E) y microsílíce (M), hormigones con 100% de árido grueso reciclado (HR-100) con sustitución de un 5% de filler de escoria (E) y microsílíce (M), además del hormigón convencional (HP).

3.2 Ensayos realizados

La fase experimental se llevó a cabo mediante dos etapas (etapa 1 y etapa 2). Todos los ensayos se realizaron de acuerdo a las especificaciones de la normativa ASTM.

Etapa 1

En esta etapa se evaluó la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido de los hormigones convencional y reciclado, se verificó las diferencias existentes entre ambos tipos de hormigones y se determinó la influencia que produce el empleo de las adiciones activas e inertes en los hormigones reciclados, así como el efecto de la sustitución de 25 y 100% de árido reciclado.

Etapa 2

Considerando que la normativa cubana define la agresividad como: alta y muy alta por la presencia de un fuerte ambiente marino o contacto con agua de mar, se decidió evaluar la durabilidad de los hormigones reciclados en los que se emplean adiciones, a partir de ensayos de resistividad, penetrabilidad de los iones cloruros, porosidad y absorción. Los resultados que se obtuvieron de forma experimental se comparan con los encontrados por diversos autores en la bibliografía internacional.

Tabla 5. Dosificación de los hormigones reciclados

Hormigón	Cemento (kg)	Agua (kg)	Escoria (kg)	Micro-sílice (kg)	a/aglom	AF (kg)	AN (kg)	AR(kg)	Aditivo (%)aglom
HP	420	189	0	0	0,45	859	859	0	1,5
HR-25	420	189	0	0	0,45	859	644	185	1,5
HRE5-25	399	189	21	0	0,45	858	644	185	1,5
HRM5-25	399	189	0	21	0,45	853	644	185	1,7
HRE10-25	378	189	42	0	0,45	857	644	185	1,5
HRM10-25	378	189	0	42	0,45	847	644	185	2,0
HR-100	420	189	0	0	0,45	859	0	741	1,5
HRE5-100	399	189	0	21	0,45	858	0	741	1,5
HRM5-100	399	189	21	0	0,45	853	0	741	1,7

4. Resultados y discusión

4.1 Etapa 1

Resistencia a compresión

En los resultados obtenidos experimentalmente se comprobó, tal y como se puede ver en la figura 3, que el hormigón fabricado con 25% de árido reciclado y sin adición, obtuvo la misma resistencia que el HP tal y como determinaron otros investigadores (Etxeberria, 2004; Poon, Shui, Lam, Fok & Kou, 2004; Grupo de Trabajo, 2006). Los hormigones con 100% de árido reciclado sufrieron una reducción del 12% respecto al HP a 28 días de curado.

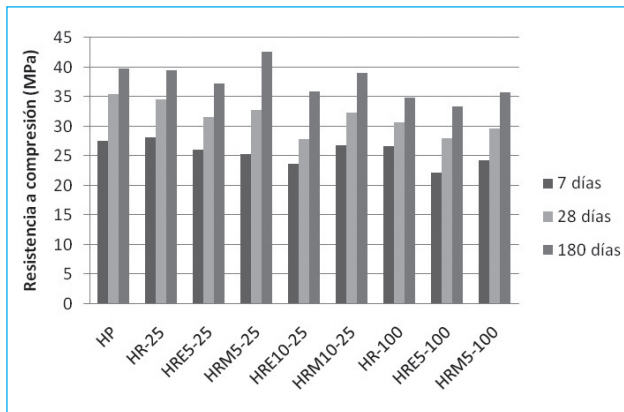
Tal y como se puede ver en la figura 3, el hormigón fabricado con 25% de árido reciclado y 5% de microsilíce en sustitución al cemento alcanzó el 90, 95 y 108% de la resistencia del hormigón patrón a 7, 28 y 180 días. El hormigón con 25% de árido reciclado y 10% de microsilíce alcanzó el 95, 95 y 99% de la resistencia del hormigón patrón a las mismas edades.

En la utilización de filler de escoria como adición en un 5% y 10% en hormigones con 25% de árido reciclado se obtuvo una reducción del 9 y 19%, mientras que en hormigones de 100% de árido reciclado, obtuvieron pérdidas del 9% y 20%, respectivamente, comparado con el hormigón patrón (HP) a 28 días. En todos los casos, supera los 25 MPa, que se corresponde con la resistencia mínima establecida para utilizar estos hormigones en funciones estructurales.

A 180 días de curado, el hormigón fabricado con 100% de árido reciclado y 5% de filler de escoria (HRE5-100) obtuvo 4% menos de resistencia a compresión que el hormigón reciclado con 100% de árido reciclado (HR-100), mientras que el hormigón fabricado con 5% de microsilíce (HRM5-100) superó en un 3% la resistencia a compresión del HR-100 debido a la reactividad de la microsilíce. En estudios previos realizados por otros investigadores (González-Fonteboa & Martínez-Abella (2008) obtuvieron que el hormigón reciclado con un 8% de humo sílice mejora la resistencia a compresión a edades avanzadas en un 7% al obtenido por el hormigón con 25% de árido reciclado y sin humo de sílice cuando los dos hormigones estaban fabricados con una relación agua-cemento de 0.55. En un estudio realizado (Poon, Kou & Lam, 2006) en hormigones convencionales se logra 114 y 104% a los 7 y 28 días, respectivamente, para una relación agua cemento de 0,5.

Se ha de recalcar que un hormigón fabricado con 100% de árido reciclado y un 5% de microsilíce (HRM5-100) obtiene una reducción de la resistencia del 10 y 15% a 28 y 180 días, respecto al hormigón fabricado con el 25% y la misma adición (HRM5-25). Cuando es utilizado 5% de filler de escoria como adición, la reducción que produce el uso del 100% de árido reciclado respecto a la utilización del 25% es del 11 y 10% a los 28 y 180 días respectivamente. Tal y como se ha comentado por otros investigadores (Kou, Poon, Lam & Chan, 2008), a mayor cantidad de árido reciclado la resistencia a compresión es menor independientemente a la adición utilizada.

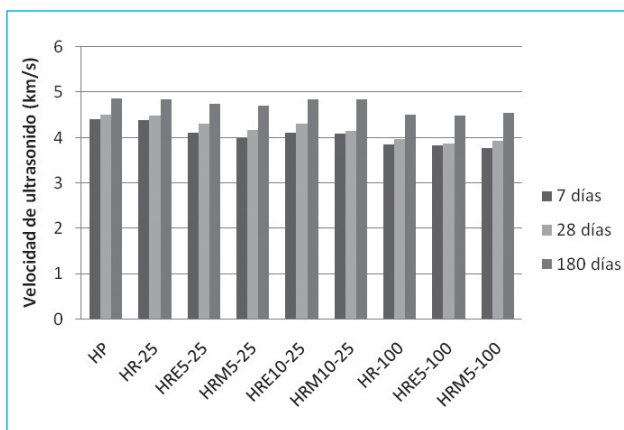
Figura 3. Resistencia a compresión de los hormigones



Velocidad de ultrasonido

La figura 4 muestra los valores obtenidos de velocidad de ultrasonido en los hormigones. Se puede apreciar como en el caso de los hormigones de 25% de árido reciclado independientemente del tipo de sustitución, los valores de esta propiedad superan los 4 km/s, lo que los clasifica, de acuerdo con diferentes bibliografías, como hormigones de buena calidad (Colectivo, 1997; Solís-Carcaño & Moreno, 2008). Hasta los 28 días, los hormigones fabricados con 25% de árido reciclado utilizando como adición filler de escoria en un 5 ó 10%, la velocidad de ultrasonido obtenida era 4% inferior al alcanzando por el hormigón patrón. Los hormigones con 25% de árido reciclado y 5 ó 10% de microsílíce sufrían una reducción del 7% respecto al valor alcanzado por el hormigón patrón.

Figura 4. Velocidad de ultrasonido en los hormigones



A los 180 días, en los hormigones de 5% de microsílíce (HRM5-25) se mantenía la diferencia con respecto al hormigón patrón, mientras que en los hormigones con sustituciones del 10% disminuyen estas diferencias. Los hormigones HRM10-25 y HRE10-25 lograron una resistencia similar al HP.

Todos los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado obtuvieron las menores velocidades siendo estas inferiores a 4 km/s y 4.5 km/s a los 28 y 180 días respectivamente.

El incremento del porcentaje de árido reciclado utilizado del 25% a 100% en hormigones fabricados con 5% de adición (filler de escoria como microsílíce), produce una reducción de la velocidad de ultrasonido del 10%, debido a la porosidad del árido reciclado.

4.2 Etapa 2

Resistividad

La figura 5 muestra los valores obtenidos como resultado del ensayo de resistividad eléctrica. Se puede determinar que los hormigones fabricados con 25% de árido reciclado, utilizando 5 y 10% de filler de escoria en sustitución al cemento (HRE5-25 y HRE10-25), sufrieron una reducción del 10% de la resistividad respecto al hormigón reciclado sin adición (HR-25). Sin embargo, tal y como se puede ver en la figura 3, la resistencia a compresión del HRE10-25 sufre una reducción del 20% respecto al HR-25.

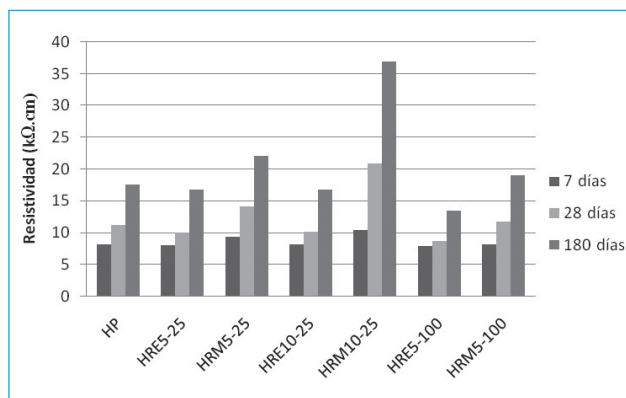
El uso de la microsílíce mejora en gran medida la durabilidad de los hormigones, tal y como se puede ver en los resultados obtenidos (figura 5). La resistividad incrementa a medida que pasa el tiempo y las diferencias se hacen más notables a partir de los 28 días. A 180 días, el hormigón fabricado con 25% de árido reciclado y 5% de microsílíce obtuvo 29% más de resistividad que el hormigón patrón, mientras que el hormigón fabricado con el 10% de microsílíce (HRM10-25) obtuvo una resistividad 2 veces mayor al obtenido por el hormigón patrón (HP). El hormigón fabricado con 100% de árido reciclado y 5% de microsílíce (HRM5-100) obtuvo valores superiores al obtenido por el hormigón patrón a partir de los 28 días. Por lo que se verifica que con el uso de la microsílíce mejora considerablemente la durabilidad de los hormigones fabricados con árido reciclado. Sin embargo, se ha de tener presente que el incremento del uso del árido reciclado del 25% al 100% produce una reducción de la resistividad del 17%.

El uso del 100% de árido reciclado en hormigones fabricados con 5% de filler de escoria (HRE5-100)

conlleva a una reducción de la resistividad del 20% respecto al hormigón con 25% de árido reciclado (HRE5-25) debido a la mayor presencia de árido reciclado, el cual presenta mortero adherido incorporando gran cantidad de poros permeables en el hormigón.

Es importante destacar que todos los hormigones se fabricaron con cemento Portland de 35MPa de resistencia media a los 28 días y se encontraban 100% saturados sin humedad superficial a la hora de realizar el ensayo de resistividad. Los valores experimentales obtenidos por los hormigones reciclados ensayados en este trabajo fueron similares a los obtenidos por Yildirim (Yildirim, Ilica & Sengul, 2011), donde el hormigón patrón fabricado con un cemento I 42,5R y una relación agua-cemento de 0.45, habiendo realizado los ensayos en las mismas condiciones, obtuvo una resistividad de unos 12 kOhm.cm (similar valor obtenido por HP) y unos 24 kOhm.cm en el hormigón con cenizas volantes, mejorando considerablemente la resistividad del hormigón tal y como se ha demostrado en este trabajo.

Figura 5. Resistividad eléctrica de los hormigones



Penetrabilidad de los iones cloruros

La figura 6 muestra los resultados obtenidos en los diferentes hormigones. De forma general los valores de carga obtenidos fueron altos, si se tiene en cuenta que superan los 4.000 *Coulombs*, inclusive en el caso del hormigón patrón (HP). Sin embargo, los valores obtenidos permiten evaluar la influencia de las adiciones en los diferentes hormigones reciclados estudiados. En todos los hormigones evaluados, los valores experimentales estaban por encima de los encontrados en la bibliografía, posiblemente debido al empleo

de un cemento de menor resistencia (P-35 MPa) en comparación con el cemento I 42.5R mayoritariamente utilizado. Tal y como demuestra Yildirim (Yildirim, Ilica & Sengul, 2011), existen grandes diferencias en esta propiedad cuando se cambia el tipo de cemento o se emplea alguna adición.

Como se puede ver en la figura 6, el hormigón fabricado con 25% de árido reciclado y 5% y 10% de microsílíce (HRM5-25 y HRM10-25) mejoran considerablemente la penetrabilidad de los iones de cloruro del hormigón patrón. El HRM5-25 y HRM10-25 alcanzaron una reducción del 10% y 38%, respectivamente, con respecto al HP. El hormigón fabricado con 10% de microsílíce, HRM10-25, obtuvo un valor inferior a los 3.000 *Coulombs* siendo el único hormigón que alcanzó el valor de la carga por debajo de los 4.000 *Coulombs* lo que indica, según la norma ASTM C1202, que este hormigón presenta penetrabilidad moderada ante el paso de los iones cloruros.

El uso del 100% de árido reciclado en hormigones fabricados con 5% de microsílíce (HRM5-100) conlleva un incremento del valor de la carga del 17% respecto al hormigón con 25% de árido reciclado (HRM5-25) debido a la mayor presencia de árido reciclado y en consecuencia del incremento de la porosidad. El mismo rango de valores fue encontrado por Shicong (Shicong & Poon, 2006), donde los hormigones de 20 y 100% de sustitución de áridos reciclados y relación a/c de 0.45, tuvieron unas cargas de 3.643 y 4.957 *Coulombs*. Por otro lado en las investigaciones llevadas a cabo por Kou & Poon, 2010, los hormigones fabricados con 100% fabricados con una relación a/c de 0.5 llegaron a alcanzar el valor de cercano a los 5.000 *Coulombs*.

Por otra parte, tal y como se puede ver en la figura 6, la utilización de una adición inerte como el filler de escoria en sustitución al cemento, no mejora la calidad del hormigón de acuerdo a este ensayo. Cuando se emplea una sustitución de 5% de escoria en los hormigones de 25% de árido reciclado, la carga aumenta, respecto al HP, en un 8% y en un 45% cuando la sustitución es de 10%.

En la medida que un hormigón es más resistivo, debe oponerse más al paso de los iones cloruros, lo que da como resultado un hormigón más durable. De acuerdo a la figura 5 y figura 6, estas propiedades son inversamente proporcionales y existe cierta correlación entre ellas tal y como se expresa en la figura 7.

El coeficiente de regresión es bastante cercano a uno, lo que indica que sería posible determinar a partir de la resistividad del hormigón (ensayo no destructivo), la habilidad de este de resistir la penetración de los

iones cloruros, muy importante en las condiciones del ambiente en el país. El estudio realizado por Yildirim, Ilica & Sengul, 2011, encontró correlaciones similares a esta, donde se correlacionan hormigones con diferentes tipos de cemento.

Figura 6. Resultado del ensayo ASTM C1202 en los hormigones

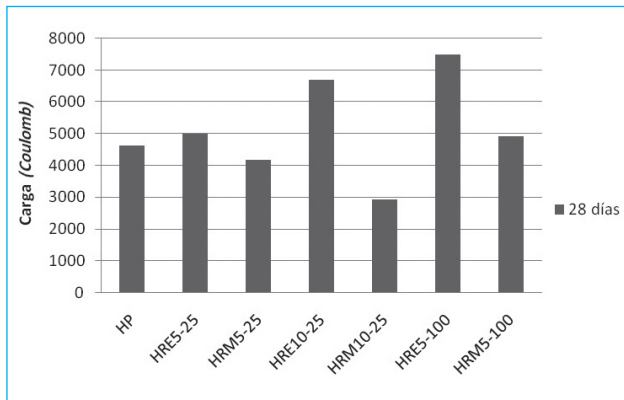
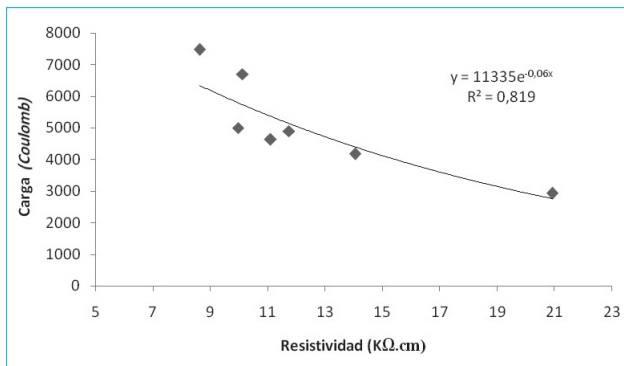


Figura 7. Relación resistividad eléctrica vs carga a 28 días

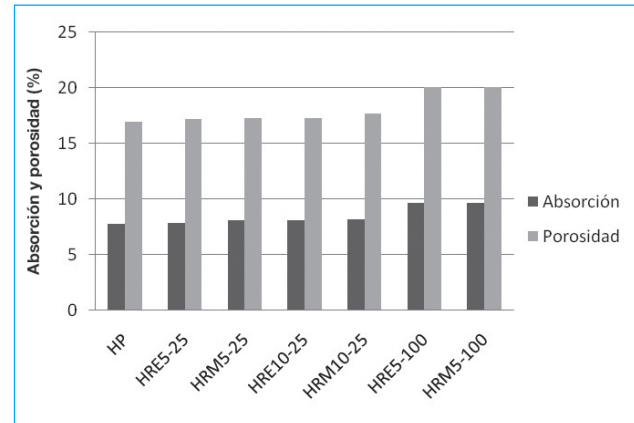


Absorción y Porosidad

De acuerdo a los valores obtenidos de la absorción y la porosidad de los diferentes hormigones a los 28 días de edad, se determinó que el efecto negativo que produce el incremento del uso del árido reciclado del 25% al 100%, es superior a la acción de la adición activa, tal y como se puede observar en la figura 8. El aumento de la absorción y la porosidad de los hormi-

gones con 100% de árido reciclado están en el orden de un 20% respecto a un hormigón con 25% de árido reciclado y el hormigón patrón.

Figura 8. Absorción y porosidad de los hormigones



Estas dos propiedades no aportan diferencias que permitan evaluar con precisión las ganancias o las pérdidas en la durabilidad de los hormigones con sustituciones hasta un 10% de filler de escoria o microsílíce. El HRE10-25 no presenta diferencias notables con el hormigón patrón, y además no se puede apreciar a través de estas dos propiedades como el efecto de la microsílíce mejora la durabilidad de los hormigones reciclados.

5. Conclusiones

De acuerdo a los análisis realizados, las conclusiones obtenidas respecto a las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad son:

Propiedades físico-mecánicas:

- Los hormigones fabricados con 25% de árido reciclado sin ningún tipo de adición igualan la resistencia a compresión del hormigón convencional.
- La sustitución del 5 ó 10% del cemento por filler de escoria reduce la resistencia del hormigón en todas las edades evaluadas. Es posible utilizar hormigones reciclados de 25% de sustitución de árido grueso, con filler de escoria de arco eléctrico en sustitución por cemento hasta un 10% con fines estructurales, ya que se logra superar los 25 MPa de resistencia a los 28 días.

- La utilización de microsilíce en sustitución del cemento disminuye la resistencia a compresión hasta los 28 días de edad, a edades avanzadas (180 días) los hormigones reciclados fabricados con 5% y 10% de microsilíce superan e igualan la resistencia a compresión obtenida por el hormigón patrón, respectivamente.
- La resistencia a compresión de hormigones fabricados con 100% de árido reciclado con o sin adiciones, es inferior al obtenido tanto por el hormigón patrón como por los hormigones fabricados con 25% de sustitución de árido reciclado. La utilización de microsilíce en un 5% mejora la resistencia a compresión respecto al hormigón fabricado con 100% de árido reciclado sin adición.
- Los valores obtenidos de velocidad de ultrasonido en los hormigones permiten clasificar todos los hormigones de 25% de árido reciclado independientemente del tipo de adición utilizado, como hormigón de buena calidad al superar los 4 km/s a los 28 días.

Propiedades de durabilidad:

- Los hormigones fabricados con 25% de árido reciclado con un 5 y 10% de adición de microsilíce mejora considerablemente la resistividad y

la resistencia a la penetración de iones cloruros obtenidos por el hormigón patrón. En ambientes con presencia de iones cloruros, se recomienda utilizar un 10% de sustitución de microsilíce por cemento por la disminución que se logra en el valor de la carga en el ensayo C1202 de la ASTM (<3000).

- El incremento del uso del árido reciclado del 25% al 100% produce una reducción de la resistividad del 17%, siendo esta todavía superior al hormigón patrón cuando el hormigón ha sido fabricado con un 5% de adición de microsilíce.
- Los hormigones de reciclados de 100% de sustitución de árido grueso, logran valores similares al hormigón patrón, en propiedades tales como la resistividad y la penetrabilidad de iones cloruros, con la sustitución de un 5% de microsilíce, a pesar de las pérdidas que se producen en propiedades como la resistencia a compresión, la absorción, porosidad y velocidad de ultrasonido, debido a la presencia de poros en el mortero adherido al árido natural.
- En las propiedades de absorción y porosidad el efecto negativo que produce el incremento del uso del árido reciclado del 25% al 100%, es superior a la acción de la adición activa.

6. Referencias

Ann, K. Y., Moon, H. Y., Kim, Y. B. & Ryou, J. (2008). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*, 28(6), 993-999.

Berndt, M. L. (2009). Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2606-2613.

Colectivo (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Río de Janeiro, Brasil: Subprograma XV, red CYTED.

Corinaldesi, V. & Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2869-2876.

Etxeberria, M. (2004). *Estudios experimentales sobre el comportamiento microestructural y estructural en*

hormigones con agregados reciclados. Unpublished. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, E. & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) (7 February 2007), 735-742.

González-Fontebo, B. & Martínez-Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 43(4), 429-437.

Grupo de Trabajo 2/5 Hormigón Reciclado (2006). *Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural* (ACHE ed.).

Kou, S.C., Poon, C.S., Lam, L., Chan, D. (2008). Hardened Properties of Recycled Aggregate Concrete Prepared with Fly Ash, *Materials and Structural* 41, pp. 1191-1201.

- Kou, S.C. & Poon, C.-S. (2010). Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites, In Press, Corrected Proof*.
- Pavón, E. (2010a). *Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural*. Unpublished Maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana.
- Pavón, E. (2010b). *Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural*. Unpublished maestría, CUJAE.
- Pavón, E., Etxeberria, M. y Díaz, N. (2010). *Situación actual de la generación de Residuos de Construcción y Demolición en Ciudad Habana y su comparación con índices internacionales*. Paper presented at the II Convención internacional de ingeniería en Cuba, Varadero, Cuba.
- Pavón, E., Etxeberria, M., Díaz, N. y Acosta, C. (2008). *Utilización de árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural en La Habana, Cuba*. Paper presented at the Nom Conventional Materials and Technologies, Colombia.
- Poon, C. S., Kou, S. C. & Lam, L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials, 20*(10), 858-865.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H. & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research, 34*(1), 31-36.
- Raza, M. (2009). *Empleo de la escoria de arco eléctrico de la empresa Antillana de Acero como adición en la fabricación de morteros*. Unpublished Diploma, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad Habana.
- Shicong, K. & Poon, C. S. (2006). Compressive Strength, Pore Size Distribution and Chloride-ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Class-F Fly Ash. *Journal of Wuhan University of Technology, 21*(4).
- Soler, Y., Soto, I. y Pavón, E. (2008). Reciclado de Materiales de Construcción, *Ecomateriales-14 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. Cuba.
- Solís-Carcaño, R. & Moreno, E. I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials, 22*(6), 1225-1231.
- Soto, I. (2008). *Estudio de viabilidad sobre la utilización de los residuos de construcción y demolición en Ciudad de La Habana*. Unpublished Diploma, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad Habana.
- Soto, I., Soto, O., Pavón, E. y Díaz, N. (2009). *Uso de RCDs como áridos reciclados y su empleo en hormigones estructurales*. Paper presented at the IX Seminario de Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil Brasil.
- Soto, O., Soto, I. y Díaz, N. (2008). *Caracterización de la escoria de acería de la empresa metalúrgica antillana de acero José Martí de La Habana para su empleo como árido y adición de morteros, hormigones y productos de la construcción*. Paper presented at the Nom Conventional Materials and Technologies, Colombia.
- Tu, T.Y. C., Yuen-Yuen Hwang, Chao-Lung. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research, 36*(5), 943-950.
- Yildirim, H., Ilica, T. & Sengul, O. (2011). Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. *Construction and Building Materials, 25*, 1282-1288.