

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Resistencia de los hormigones elaborados con árido reciclado frente a ciclos de hielo-deshielo

Andrés Juan-Valdés ⁽¹⁾, Desirée Rodríguez-Robles ⁽¹⁾, Julia García-González ⁽¹⁾, Julia M^a Morán-del Pozo ⁽¹⁾, M. Ignacio Guerra-Romero ⁽¹⁾ y Nele De Belie ⁽²⁾

⁽¹⁾ Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria, Universidad de León, España.

⁽²⁾ Magnel Laboratory for Concrete Research, Universidad de Gante, Bélgica.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6559>

RESUMEN

Los prometedores resultados alcanzados por los hormigones que incorporan áridos reciclados procedentes de hormigón en el sector de los pavimentos, han fomentado el interés por aumentar el espectro de materiales susceptibles de ser reciclados. Atendiendo al significativo volumen que supone en países como España y Portugal la fracción cerámica del total de los residuos de construcción y demolición, este estudio analiza el comportamiento de los hormigones que incorporan áridos reciclados mixtos y cerámicos frente a ciclos de hielo-deshielo. Para ello se elaboran 3 tipos de hormigón: un hormigón convencional con árido 100% natural, un hormigón reciclado donde el 50% del árido grueso natural es sustituido por árido reciclado mixto, y otro hormigón reciclado, donde el porcentaje de sustitución se mantiene en 50%, pero se utiliza árido reciclado cerámico. Los resultados alcanzados demuestran que las caras moldeadas de los hormigones reciclados mantienen los niveles de resistencia a hielo-deshielo experimentados por el hormigón convencional cuando el porcentaje de material cerámico es bajo, y superan dichos niveles cuando el porcentaje de cerámica aumenta. En las superficies enrasadas, la presencia de árido reciclado supone una pérdida de resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, siendo menos intensa esta pérdida cuanto mayor es el contenido cerámico.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reciclado, hielo-deshielo, sales descongelantes.

1.- INTRODUCCIÓN

El sector de los pavimentos es una de las aplicaciones del hormigón donde mejor aceptación ha experimentado la utilización de áridos reciclados. Centrándose principalmente en la incorporación de áridos reciclados procedentes de hormigón en su totalidad, debido a que se trata de un material inerte y con un gran potencial de reutilización. Los prometedores resultados alcanzados por esta aplicación han fomentado el interés por aumentar el espectro de materiales susceptibles de ser reciclados. Teniendo en cuenta el significativo volumen que supone en países como España y Portugal la fracción

cerámica del total de los residuos de construcción y demolición [1], resulta de especial interés en estos lugares analizar el comportamiento de los hormigones que incorporan áridos reciclados en distintas aplicaciones, como es el sector de los pavimentos. Son diversos los países que permiten y regulan el uso de áridos reciclados de hormigón en este tipo de aplicaciones, por lo que existen diversas publicaciones que han estudiado la durabilidad de los hormigones que incorporan este tipo de árido frente a condiciones atmosféricas caracterizadas por bajas temperaturas. Algunos autores [2-4] han sostenido un peor desempeño de los hormigones debido a la presencia de mortero adherido, especialmente cuando su procedencia es un hormigón original elaborado sin aditivos aireantes [5], o a la saturación total de los áridos reciclados, con el objetivo de alcanzar unas consistencias adecuadas [6]. Sin embargo, Yildirim et al. [7] y de Oliveira and Vazquez [8] observaron mejoras en el comportamiento del material frente a este tipo de condiciones atmosféricas cuando los áridos reciclados se incorporan a la mezcla en un estado de saturación parcial. Otros autores [9-14], aplicando diferentes técnicas (eliminación de mortero adherido, uso de aditivos, ajustes de la dosificación en base al contenido de mortero equivalente o la eliminación de impurezas), han logrado obtener hormigones con áridos reciclados de hormigón y similares o mejores durabilidades a las mostradas por hormigones convencionales. Para el caso de hormigones que incorporen árido reciclado con contenidos altos de material cerámico, son muchos menos los estudios que se han llevado a cabo. Topçu y Canbaz [15] y Adamson et al. [16] alcanzaron un aumento de la resistencia frente a ciclos hielo-deshielo cuando utilizaban tejas y ladrillos en sustituciones totales o parciales de los áridos naturales. Medina et al. [17] registraron degradaciones de material similares para hormigones convencionales y para sustituciones del 20 y 25%. Topçu y Sengel [18] y Bazaz y Khayati [19] obtuvieron leves disminuciones de resistencia cuando incorporaban ladrillo triturado. Cuando se emplean áridos reciclados mixtos, algunos autores como Dhir y Paine [20] alcanzaron disminuciones apreciables de resistencia ante ciclos de hielo-deshielo por parte de los hormigones reciclados frente a los convencionales. Sin embargo, autores como Richardson et al. [21] afirmaron que el uso de áridos reciclados con contenidos elevados de material cerámico mejoraba la durabilidad de los hormigones elaborados. Por lo tanto, resulta de gran interés analizar el comportamiento durable de los hormigones elaborados con un contenido significativo de fracción cerámica reciclada como árido grueso.

2.- MATERIAL Y MÉTODOS

Para la elaboración de las muestras de hormigón se ha empleado cemento tipo CEM III/B 42.5 N SR LH LA, agua de grifo y áridos naturales silíceos. Como árido reciclado se emplean dos muestras de material procedentes de plantas de gestión de residuos de construcción y demolición españolas. En la Tabla 1 se pueden observar los distintos componentes que integran la muestra ARM (procedente de la empresa madrileña TEC-REC) y la muestra ARC (suministrada por la empresa Bierzo Recicla con localización en Castilla y León), determinados según la norma EN 933-11/AC (2009) [22]. La caracterización de los áridos (Tabla 1) se ha llevado a cabo de acuerdo a las normas UNE-EN 933-1: 2012 [23], UNE-EN 933-3: 2012 [24], UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006 [25] y UNE-EN 1097-2: 2010 [26].

Tabla 1. Composición y caracterización física y mecánica de los áridos reciclados

	<i>ARM</i>	<i>ARC</i>
Composición		
Ru (piedra natural) (%)	17.51	0.00
Rc (hormigón) (%)	44.11	0.00
Rb (ladrillos y tejas) (%)	33.56	100.00
Ra (mat. bituminoso) (%)	0.44	0.00
Rg (vidrio) (%)	0.75	0.00
X (yeso e impurezas) (%)	3.64	0.00
Caracterización física y mecánica		
Contenido de finos (%)	0.06	0.08
Índice de lajas (%)	14.75	32.13
Densidad de partículas secadas en estufa (Mg/m ³)	2.08	1.80
Absorción de agua (%)	8.53	10.77
Coefficiente de Los Ángeles (%)	40.99	40.00

Tanto las dosificaciones de los hormigones reciclados (hormigón que incorpora ARM, HRM y hormigón que incorpora ARC, HRC) como la del hormigón convencional (HC) (Tabla 2) se han calculado en base al método De la Peña [27] y la parábola de Fuller [28], para una relación a/c de 0.55 y un contenido de cemento de 390.91 kg/m³. En las muestras de hormigón reciclado, se sustituye un 50% del árido grueso natural por árido reciclado.

Tabla 2. Dosificación de los hormigones elaborados

	<i>HC</i>	<i>HRM</i>	<i>HRC</i>
Agua (l/m ³)	215	215	215
Cemento (kg/m ³)	390.91	390.91	390.91
Arena (kg/m ³)	480.48	703.46	821.06
Grava 2-8 mm (kg/m ³)	1000.3	368.32	307.79
Grava 8-16 mm (kg/m ³)	250.07	92.08	76.95
Árido reciclado (kg/m ³)	0	460.4	384.74

El comportamiento de los hormigones frente a los ciclos hielo-deshielo en combinación con el efecto de las sales descongelantes se evalúa según la norma UNE EN 1339:2004 [29]. Las probetas ensayadas de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura son extraídas de una pieza poliédrica de 400x400x100 mm, obteniéndose 3 probetas con una superficie de ensayo enrasada manualmente y otras 3 con superficies moldeadas hacia la cara inferior del molde durante el encofrado. Las probetas se colocan en el interior de segmentos de tubo de PVC quedando embebidas exteriormente en resina epoxi a excepción de su cara de ensayo, sobre la que se colocará una lámina de la solución de ensayo. Tras comprobar la estanqueidad del conjunto, las muestras se aíslan térmicamente y se vierte la solución de ensayo con base acuosa y 3% de NaCl. Posteriormente, las probetas se introducen en la

cámara de hielo-deshielo, modelo WT3 y marca Weiss Technik, para ser sometidas a 28 ciclos. Transcurridos 7, 14, 21 y 28 ciclos, se recoge en un filtro de papel la cantidad de material desprendido, para obtener la tendencia de degradación.

La distribución de tamaños de poro presente en cada una de las muestras de hormigón se determina según el procedimiento descrito en la norma ASTM D4404-10 [30] y haciendo uso de un porosímetro de intrusión de mercurio modelo Micromeritics Autopore IV 9500.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El deterioro superficial experimentado por las muestras de hormigón sometidas a 7, 14, 21 y 28 ciclos de hielo-deshielo se presenta en la Figura 1. En ella se puede observar como las caras moldeadas de la muestra HRC conservan en gran medida su capa de pasta cementante superficial, sin embargo, el resto de las muestras no han conservado dicha capa desde el ciclo 14 o incluso llegando a perderla en algunos casos antes del ciclo 7. También se aprecia como en la mayoría de las caras enrasadas manualmente se han desprendido áridos completos a partir del ciclo 14, lo cual se debe a los incrementos de presión generados en las zonas de transición árido-pasta durante las fases de congelación del agua en presencia de NaCl, resultando en el desprendimiento completo de algunos áridos localizados en la zona superficial [31]. Sin embargo, el desprendimiento gradual de áridos que han experimentado los distintos hormigones ha seguido una simultaneidad cronológica para las tres muestras, pudiéndose interpretar por lo tanto que a pesar de la mayor absorción de agua presentada por los áridos reciclados, estos alcanzan niveles de resistencia similares a los áridos naturales en atmósferas caracterizadas por las bajas temperaturas.

La Figura 2, muestra cuantitativamente la cantidad de material desprendido en cada uno de los hormigones, representando por un lado las caras moldeadas y por otro lado las caras enrasadas manualmente. Para los dos tipos de acabado superficial, la pérdida de masa es superior en los primeros ciclos ensayados y tiende a disminuir a medida que el ensayo avanza. Este comportamiento se debe a la existencia de la estrecha capa de mortero que se crea en las zonas superficiales de las probetas de hormigón, donde la microestructura de la pasta cementante es diferente a la constituida en zonas más internas [32]. Medina et al. [17] también apuntan a una menor resistencia del material durante los primeros ciclos del ensayo. Analizando los resultados obtenidos para los distintos acabados, se puede observar como al final del ensayo, las caras enrasadas manualmente presentan un 44%, 66% y 95% más de material desprendido que las caras moldeadas para las muestras HC, HRM y RHC respectivamente. La gran variación observada entre los distintos tipos de acabado superficial para la muestra RHC se debe principalmente al desprendimiento de áridos gruesos completos que se desprenden en el caso de las caras enrasadas, mientras que para las caras moldeadas, el material desprendido únicamente incluye pasta cementante y árido fino. Autores como Van den Heede [33] también han observado como hormigones elaborados sin aditivos aireantes presentan grandes diferencias de comportamiento entre los distintos tipos de acabado superficial.

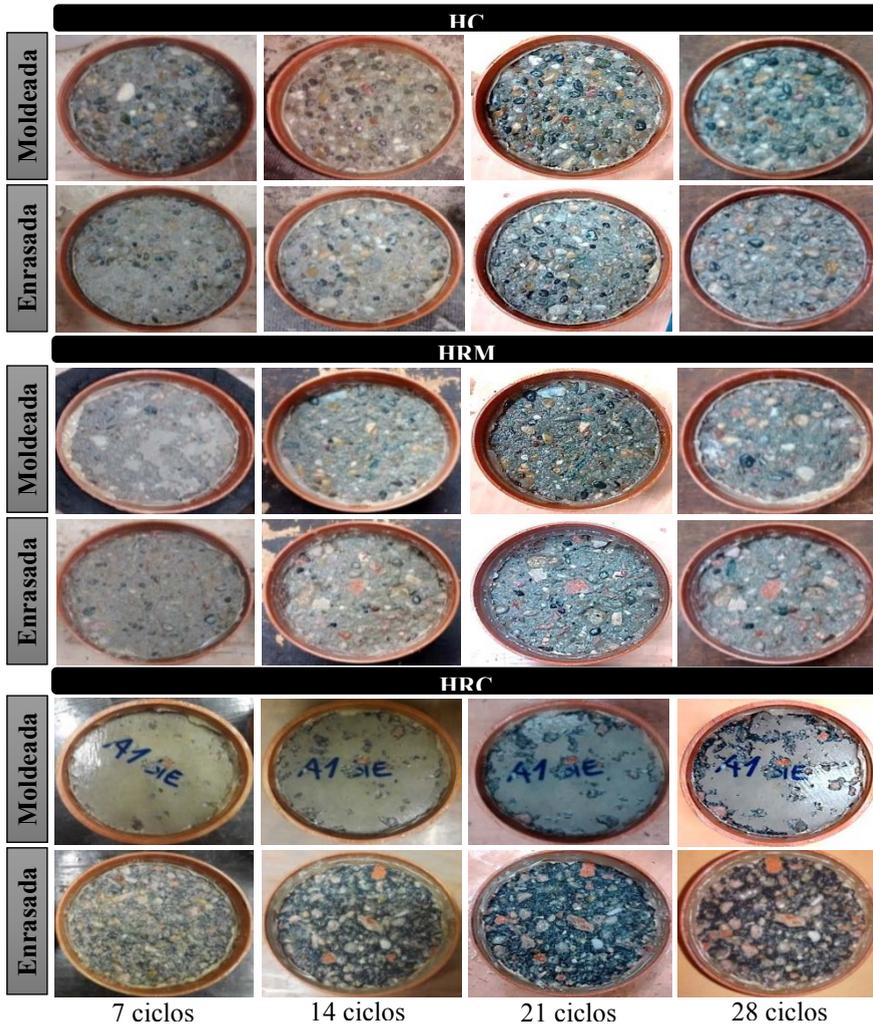


Figura 1. Superficie de las probetas de hormigón sometidas a ciclos de hielo-deshielo

Atendiendo a las caras moldeadas, la mezcla HRC experimenta la menor pérdida de masa (72% menor que la muestra HC). Al final del ensayo las muestras HC y HRM presentan pérdidas similares de material, sin embargo, las cantidades de material desprendido han sido ligeramente inferiores para el caso de la muestra HRM durante los primeros ciclos. Tratándose de un comportamiento similar al publicado por Medina et al. [17], quienes atribuyen estos resultados a una estructura de poros más fina existente en los hormigones reciclados. El análisis de los resultados sugiere que para el caso de las caras moldeadas existe una relación lineal entre el daño provocado por los ciclos de hielo-deshielo y la cantidad de material cerámico presente en el volumen total de áridos gruesos (Fig. 3), lo cual indica que la composición del árido reciclado juega un papel fundamental en la

resistencia del hormigón frente a las bajas temperaturas. Por el contrario, en el caso de las caras enrasadas, los hormigones reciclados presentaron un peor comportamiento que el hormigón convencional. Tras 28 ciclos de hielo-deshielo, la muestra CC presentó una pérdida de masa 26% menor que HRM y 8% menor que HRC. Por lo que no se ha encontrado relación entre la resistencia de las caras enrasadas de los hormigones y la cantidad de material cerámico de los áridos.

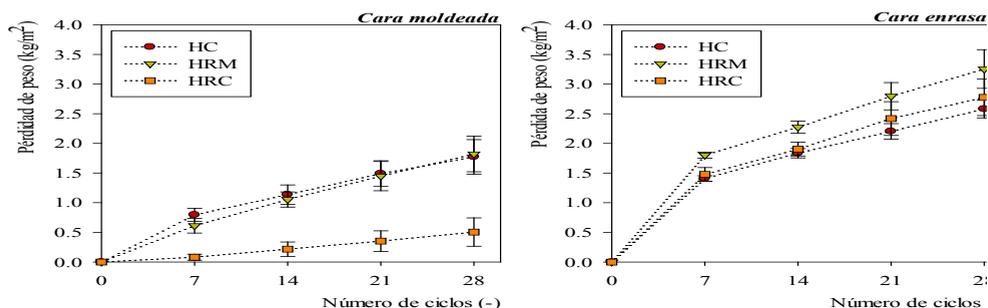


Figura 2. Pérdida de masa acumulada de los hormigones sometidos a ciclos de hielo-deshielo

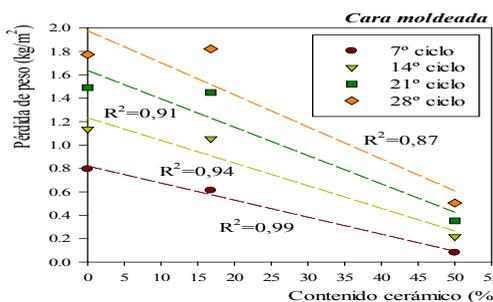


Figura 3. Relación entre la cantidad de material desprendido y el contenido de material cerámico

La Figura 4 presenta la distribución porosa de cada muestra y en ella se observa como el mayor volumen de poros para los hormigones reciclados se localiza en diámetros inferiores a 1 mm. Similares resultados fueron publicados por Medina et al. [17], quienes afirman que la estructura porosa que presentan los hormigones elaborados con áridos reciclados cerámicos contribuye a un buen comportamiento bajo condiciones de hielo-deshielo, porque el volumen ocupado por los cristales de agua solidificada en la fase de congelación es inferior [32,34] y redistribuye los puntos con incrementos de presión, de manera que el daño provocado disminuye [32,35]. Aunque la porosidad presentada por los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición se relaciona con un mejor comportamiento de los hormigones frente a los ciclos de hielo-deshielo [21] debido a su alta capacidad para disipar las presiones hidráulicas generadas en la estructura porosa del hormigón [36], este efecto solo se ha observado en las caras moldeadas de la muestra HRC. Diversos autores [37–40] mantienen que la distribución de poros presentada por los áridos cerámicos provoca un efecto similar al de los aditivos aireantes en cuanto a su formación de

espacios adicionales que permiten la disipación de presiones desarrolladas dentro de las estructuras de hormigón a causa de la expansión del agua durante su congelación.

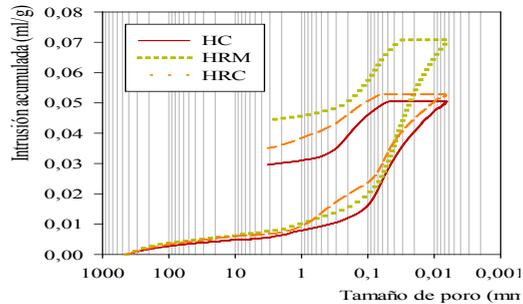


Figura 4. Distribución del tamaño de poros de las muestras HC, HRM y HRC.

4.- CONCLUSIONES

El uso de áridos reciclados mixtos y cerámicos como sustitución de áridos gruesos naturales permite obtener hormigones con prestaciones similares o incluso superiores a las conseguidas por hormigones convencionales cuando estos son sometidos a ciclos de hielo-deshielo en presencia de sales descongelantes, siempre y cuando las caras expuestas hayan sido moldeadas hacia las piezas de encofrado. Su comportamiento resistente tiende a aumentar a medida que el contenido cerámico asciende, ya que la red porosa presentada por los áridos cerámicos mejora la resistencia de los elementos de hormigón frente a ciclos de hielo-deshielo debido a su capacidad para disipar las presiones hidráulicas generadas. Sin embargo, cuando la superficie expuesta a las condiciones ambientales descritas se enrasa mediante técnicas manuales o de tratamiento mecánico aplicadas directamente sobre la superficie que no mantiene contacto con los moldes, los resultados alcanzados por los hormigones se invierten, desarrollándose las mejores prestaciones en el hormigón convencional. Comparando entre sí los dos hormigones con áridos reciclados, resulta en un mejor comportamiento la muestra con mayor contenido cerámico.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido desarrollado gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto BIA2013-48876-C3-3-R, así como de la ayuda FPI BES-2011-047159 asociada al proyecto BIA2010-21194-C03-02. También se agradece la financiación del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda FPU AP2010-0613. Finalmente, los autores agradecen la desinteresada participación de las empresas TEC-REC de Madrid y Bierzo Recicla de Castilla y León.

REFERENCIAS

- [1] de Brito, J., Pereira, A.S., and Correia, J.R., 'Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates', *Cement and Concrete Composites* 27 (4) (2005) 429–433.

- [2] Zaharieva,R., Buyle-Bodin,F., and Wirquin,E., 'Frost resistance of recycled aggregate concrete', *Cement and Concrete Research* **34** (10) (2004) 1927–1932.
- [3] Tuyan,M., Mardani-Aghabaglou,A., and Ramyar,K., 'Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate', *Materials & Design* **53** (2014) 983–991.
- [4] Salem,R.M. and Burdette,E.G., 'Role of Chemical and Mineral Admixtures on the Physical Properties and Frost-Resistance of Recycled Aggregate Concrete', *Materials Journal* **95** (5) (1998) 558–563.
- [5] Gokce,A., Nagataki,S., Saeki,T., and Hisada,M., 'Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete', *Cement and Concrete Research* **34** (5) (2004) 799–806.
- [6] Olanike,A.O., 'Experimental Investigation into the Freeze-Thaw Resistance of Concrete Using Recycled Concrete Aggregates and Admixtures', *Civil Engineering and Architecture* **2** (4) (2014) 176–180.
- [7] Yildirim,S.T., Meyer,C., and Herfellner,S., 'Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates', *Construction and Building Materials* **91** (2015) 288–296.
- [8] Barra de Oliveira,M. and Vazquez,E., 'The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete', *Waste Management* **16** (1–3) (1996) 113–117.
- [9] Andal,J., Shehata,M., and Zacarias,P., 'Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality', *Construction and Building Materials* **125** (2016) 842–855.
- [10] Abbas,A., Fathifazl,G., Isgor,O.B., Razaqpur,A.G., Fournier,B., and Foo,S., 'Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method', *Cement and Concrete Composites* **31** (8) (2009) 555–563.
- [11] Güneysi,E., Gesoğlu,M., Algin,Z., and Yazıcı,H., 'Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates', *Construction and Building Materials* **64** (2014) 172–183.
- [12] Lotfy,A. and Al-Fayez,M., 'Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate', *Cement and Concrete Composites* **61** (2015) 36–43.
- [13] Limbachiya,M.C., Leelawat,T., and Dhir,R.K., 'Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete', *Materials and Structures* **33** (9) (2000) 574–580.

- [14] Jain,J., Verian,K., Olek,J., and Whiting,N., 'Durability of Pavement Concretes Made with Recycled Concrete Aggregates', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2290** (2012) 44–51.
- [15] Topçu,I. and Canbaz,M., 'Utilization of crushed tile as aggregate in concrete', *Iranian Journal of Science and Technology* **31** (B5) (2007) 561.
- [16] Adamson,M., Razmjoo,A., and Poursaee,A., 'Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate', *Construction and Building Materials* **94** (2015) 426–432.
- [17] Medina,C., Sánchez,M.I., and Frías,M., 'Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate', *Journal of Cleaner Production* **40** (2013) 151–160.
- [18] Topçu,İ.B. and Canbaz,M., 'Properties of concrete containing waste glass', *Cement and Concrete Research* **34** (2) (2004) 267–274.
- [19] Bolouri Bazaz,J. and Khayati,M., 'Properties and Performance of Concrete Made with Recycled Low-Quality Crushed Brick', *Journal of Materials in Civil Engineering* **24** (4) (2012) 330–338.
- [20] Dhir,R.K. and Paine,K.A., 'Performance related approach to use of recycled aggregates', (WRAP, 2007).
- [21] Richardson,A., Coventry,K., and Bacon,J., 'Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete', *Journal of Cleaner Production* **19** (2–3) (2011) 272–277.
- [22] UNE-EN 933-11:2009/AC: 2010. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. AENOR. Madrid. España. 2010.
- [23] UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. AENOR. Madrid. España. 2012.
- [24] UNE-EN 933-3. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. AENOR. Madrid. España. 2012.
- [25] UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. AENOR. Madrid. España. 2014.
- [26] UNE-EN 1097-2: 2010. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. AENOR. Madrid. España. 2010.

- [27] Jiménez Montoya,P., Arroyo Portero,J.C., Morán Cabré,F., and García Meseguer,Á., 'Hormigón Armado: basado en la EHE-2008. Adaptada al Código Modelo y al Eurocódigo. EC-2', (Gustavo Gili, España, 2009).
- [28] Fuller,W.B. and Thompson,S.E., 'The laws of proportioning concrete', Transactions of the American Society of Civil Engineers **59** (2) (1907) 67–143.
- [29] UNE-EN 1339:2004. Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo. AENOR. Madrid. España. 2004.
- [30] ASTM D4404-10. Test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry. ASTM International. Pensilvania. EE.UU. 2010.
- [31] Mehta,P.K. and Monteiro,P.J., 'Concrete: microstructure, properties, and materials', (McGraw-Hill, New York, 2006).
- [32] Pigeon,M., Talbot,C., Marchand,J., and Hornain,H., 'Surface microstructure and scaling resistance of concrete', Cement and Concrete Research **26** (10) (1996) 1555–1566.
- [33] Van den Heede,P., 'Durability and sustainability of concrete with high volumes of fly ash', (Universidad de Gante, Gante, 2011).
- [34] Liu,Z. and Hansen,W., 'Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt', Cement and Concrete Research **74** (2015) 10–18.
- [35] Zhou,Z.Y. and Mihashi,H., 'Micromechanics model to describe strain behavior of concrete in freezing process', Journal of Materials in Civil Engineering **20** (1) (2008) 46–53.
- [36] Verbeck,G.J. and Landgren,R., 'Influence of physical characteristics of aggregates on frost resistance of concrete', (Portland Cement Association, 1960).
- [37] Al-Assadi,G., Casati,M.J., Fernandez,J.A., and Gálvez,J., 'Evaluación del deterioro del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo'. 'Anales de mecánica de la fractura **26** (2) (2009) 472–477.
- [38] Foy,C., Pigeon,M., and Banthia,N., 'Freeze-thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0,25 water-cement ratio concrete', Cement and Concrete Research **18** (4) (1988) 604–614.
- [39] Pigeon,M., Marchand,J., and Pleau,R., 'Frost resistant concrete', Construction and Building Materials **10** (5) (1996) 339–348.
- [40] Bektas,F., Wang,K., and Ceylan,H., 'Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability', Construction and Building Materials **23** (5) (2009) 1909–1914.