

DURABILIDAD EN AMBIENTE MARINO DE HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE LA TRITURACIÓN DE HORMIGÓN

C. Thomas⁽¹⁾, *J. A. Polanco*⁽¹⁾, *J. Setién*⁽¹⁾, *I. Lombillo*⁽²⁾

⁽¹⁾ Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España. carlos.thomas@unican.es

⁽²⁾ Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.

Resumen: El propósito de la presente investigación es valorar la influencia que supone utilizar áridos reciclados sobre la durabilidad de hormigones elaborados con ellos. El objetivo final es proponer un grado de sustitución óptimo a la hora de diseñar hormigones de aplicación estructural. En este trabajo, se han estudiado reemplazos del 0% (hormigón de control), 20%, 50% y 100% del árido grueso natural calizo, de un hormigón convencional, por áridos gruesos reciclados procedentes de la trituración de hormigones de demolición [1-5]. La técnica experimental utilizada se ha basado en el estudio de la permeabilidad al agua y a los gases, caracterizando también sus propiedades físicas y mecánicas para hormigones reciclados curados, por una parte, en cámara de humedad y, por otra, en ambiente marino IIIa. En cuanto a los resultados obtenidos, se ha encontrado que la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón en la fabricación de hormigones reciclados, dosificados con la misma relación agua/cemento, no supone una pérdida de la durabilidad de los mismos.

Palabras clave: RCD, árido reciclado, hormigón reciclado, durabilidad, ambiente marino.

1. INTRODUCCIÓN.

El hormigón reciclado es aquél en el cuál se realiza una sustitución parcial o total de los áridos, que conforman el esqueleto del hormigón, por otros materiales susceptibles de ser reutilizados.

En el presente trabajo se pretende estudiar la durabilidad de los hormigones reciclados de aplicación estructural expuestos a ambientes marinos. Para ello se compararán las principales propiedades que afectan a la estabilidad de los hormigones, por un lado, expuestos directamente durante 1 año a las condiciones climáticas de la ciudad de Santander y, por otro lado, las proporcionadas por hormigones curados en una cámara de humedad a una temperatura de 23° C y una humedad del 99%: ambiente IIIa frente a ambiente de curado ideal.

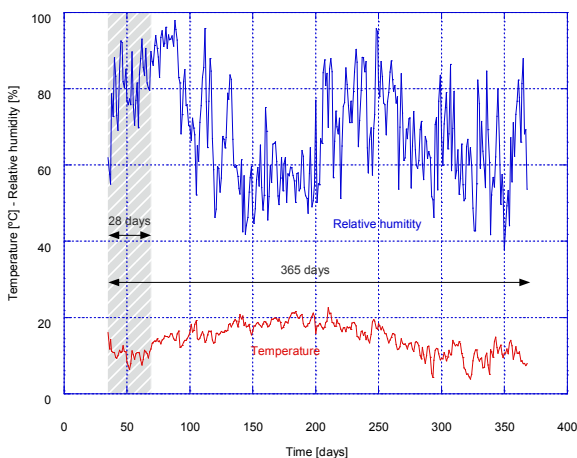


Figura 1. Condiciones climáticas en la ciudad de Santander (ambiente marino), España, en el periodo enero de 2007 – enero de 2008.

2. MATERIALES.

Se han estudiado sustituciones del 20%, 50% y 100% de árido grueso natural (AN) (mayor de 2 mm) calizo por áridos gruesos reciclados (AR) formados, en su mayor parte, por residuos de hormigón procedentes de derribo. Así mismo, se han preparado hormigones de control, fabricados exclusivamente con árido natural, a fin de comparar sus prestaciones con las de los primeros. Cada dosificación se ha estudiado a la edad de 28 y 365 días y en los dos ambientes de curado ya mencionados: cámara de humedad e intemperie marina, Figura 1.

En cuanto a la naturaleza de cada uno de los áridos: todos ellos, salvo el AR, proceden del machaqueo de roca caliza. El AR utilizado resulta de la trituración de residuos clasificados de construcción y demolición (RCD), de la deconstrucción de hormigones estructurales, procesados con trituradoras y eliminadas la mayor parte de impurezas. Los componentes y proporciones encontrados en el AR son: 95.9 % de árido cuyo origen es exclusivamente hormigón, del cual el 44.4 % corresponde a AN (del hormigón de origen) y el 51.5 % a mortero y árido natural con un volumen de mortero adherido mayor que el suyo propio; el 1.6 % corresponde a AN con contaminación por bituminosos; el 1.4 % a material cerámico (AC); el 0.6 % son yesos; y, finalmente, el 0.4 % corresponde a fino menor de 0.063 mm.

La granulometría del AR (2-20 mm) permite sustituir una parte de gravilla (2-16 mm) y otra de grava (8-20 mm) de la dosificación de control a fin de obtener las distintas dosificaciones de hormigón reciclado.

En cuanto a las propiedades físicas de los áridos, la grava y gravilla naturales presentan una densidad de

entorno a los 2.70 g/cm^3 , un coeficiente de absorción de un 1.5 % en peso y una porosidad del 3.6 % en volumen; valores típicos para la roca natural caliza. Por otro lado, el AR presenta una densidad de 2.24 g/cm^3 , un coeficiente de absorción de 5.1 % en peso y una porosidad del 11 % en volumen. Los valores obtenidos en la caracterización de este AR son muy parecidos a los que presenta un hormigón de aplicación estructural.

Como puede comprobarse, la porosidad del árido reciclado es muy superior a la de los áridos naturales, y este hecho tendrá una importancia crucial en las propiedades finales de la pasta de cemento hidratada [1-7].

Se han podido estudiar dos clases resistentes de hormigón de aplicación estructural bien diferenciadas, por un lado, con 275 kg/m^3 de cemento y una relación agua/cemento de 0.65 se ha obtenido un hormigón de control H25 y, por otro lado, utilizando 380 kg/m^3 de cemento y una relación agua/cemento de 0.5 se ha preparado un hormigón H40, obteniéndose en los dos casos resultados similares.

Las diferentes dosificaciones de los hormigones reciclados se definieron partiendo de una sustitución de grava y gravilla en unas proporciones que mantuvieran la granulometría del conjunto invariante y sustituyeran la misma cantidad en volumen de árido reciclado [1].

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL.

En cuanto al estudio experimental, se han llevado a cabo, sobre cada una de las 32 variantes de hormigón (4 sustituciones, 2 clases resistentes, 2 edades y 2 ambientes de curado), una completa caracterización siguiendo las correspondientes normas UNE. En primer lugar, ensayos de caracterización mecánica: resistencia a compresión simple y resistencia a tracción por el método indirecto. En lo referente a la caracterización física, se han determinado las densidades, porosidades y absorciones de cada uno de los hormigones endurecidos.

Paralelamente a los ensayos mecánicos y físicos, se ha determinado el coeficiente de permeabilidad a los gases y la penetración máxima de agua, tal y como establecen las correspondientes normativas, como indicadores de la durabilidad de los hormigones.

De la ecuación de Darcy para los fluidos se puede despejar, con carácter general, el Coeficiente de Permeabilidad del material:

$$K = \frac{2 \cdot P_1 \cdot R \cdot l \cdot \eta}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (1)$$

donde:

K = Coeficiente de permeabilidad [m^2]

η = Viscosidad del gas utilizado [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]

l = Longitud de la muestra [m]

R = Caudal de gas a la salida de la muestra [m^3/s]

A = Área de la sección transversal [m^2]

P_1 = Presión absoluta a la salida de la muestra [N/m^2]

P_2 = Presión absoluta a la entrada de la muestra [N/m^2]

El valor de la permeabilidad obtenido directamente con un gas, depende tanto de la presión como del tipo de gas utilizado. En este sentido, y con el objetivo de poder comparar la permeabilidad obtenida mediante líquidos, se utilizaros, en el caso que nos ocupa, al menos, tres presiones de entrada diferentes para un mismo gas. En nuestro caso, el gas utilizado es oxígeno con una viscosidad de $2.02 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, en condiciones normales, y la presión a la salida es igual a la presión atmosférica. Así, la ecuación (1) se transforma en:

$$K = \frac{4.04 \cdot 10^{-10} \cdot R \cdot l}{A(P_2^2 - 1)} \quad (2)$$

donde la presión, ahora, viene expresada en bares.

Con el objetivo del máximo aprovechamiento del material, a excepción de las muestras de compresión, de cada una de las probetas normalizadas de hormigón se han obtenido 3 submuestras (A, B y C) mediante cortes transversales en sierra de disco. Con la submuestras A (tercio superior de la probeta) se ha podido realizar ensayos de densidad, porosidad, absorción y tracción; con las submuestras B (tercio central) se ha determinado el coeficiente de permeabilidad a los gases, la penetración máxima de agua bajo presión y resistencia a tracción; las submuestras C (tercio inferior), al igual que las A, han servido para completar los resultados de densidad, porosidad, absorción y tracción del material.

4. RESULTADOS.

En las Figuras 2 y 3 se muestra la comparativa de las propiedades mecánicas de los hormigones patrón y reciclado, curados en cámara e intemperie.

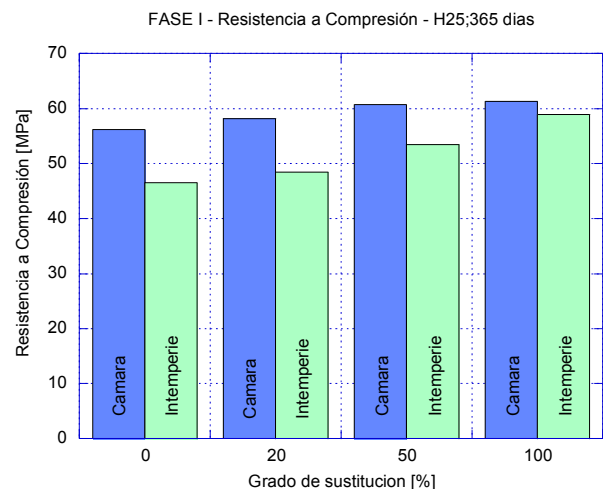


Figura 2. Resistencia a compresión del hormigón H25 con 365 días de edad.

La resistencia del hormigón reciclado es claramente superior a la resistencia del hormigón de referencia, aumentando proporcionalmente a la cantidad de árido sustituido debido, principalmente, a que la relación agua/cemento de la matriz cementicia se ve reducida, también, a causa de la mayor porosidad y absorción que posee el RCD [2].

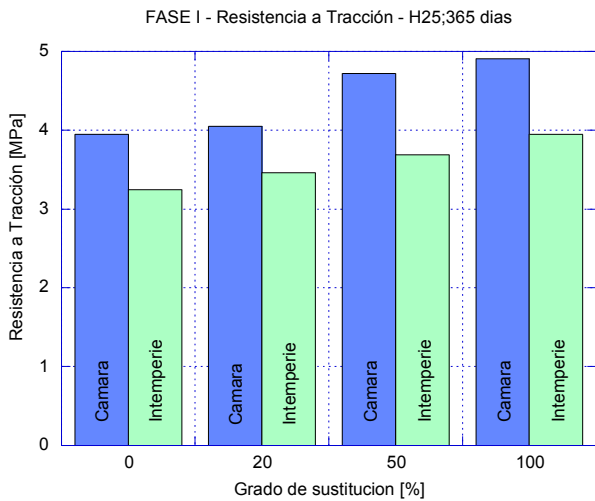


Figura 3. Resistencia a tracción del hormigón H25 con 365 días de edad.

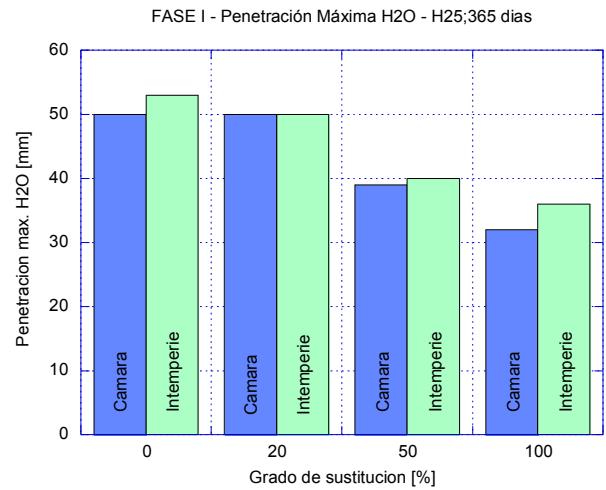


Figura 6. Profundidad de penetración máxima de agua en el hormigón H25 con 365 días de edad.

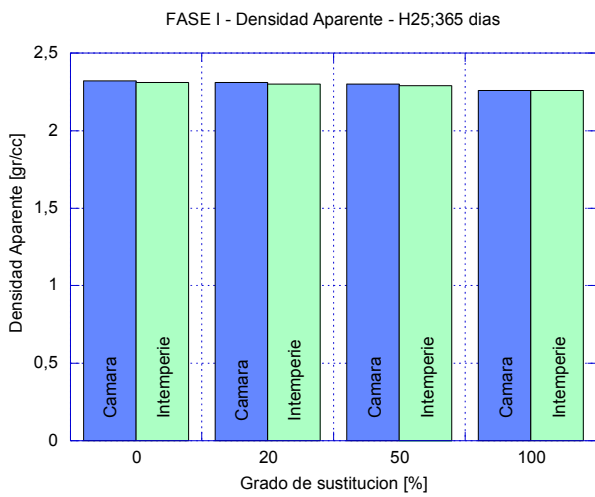


Figura 4. Densidad aparente del hormigón H25 con 365 días de edad.

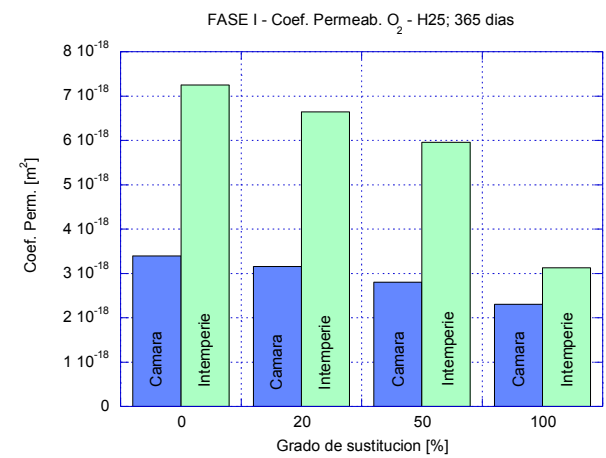


Figura 7. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno del hormigón H25 con 365 días de edad.

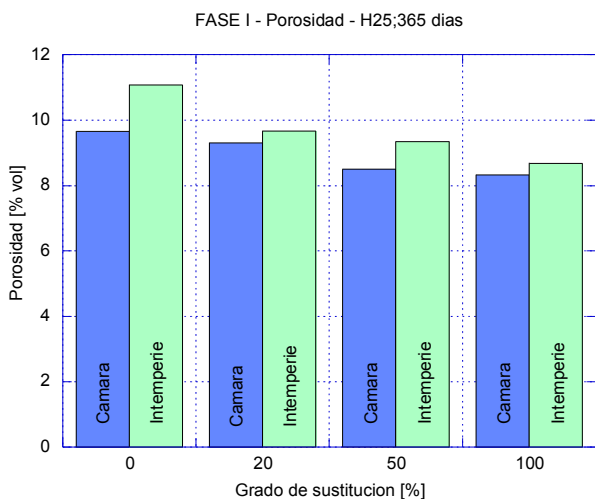


Figura 5. Porosidad del hormigón H25 con 365 días de edad.

5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En cuanto a las propiedades mecánicas de los hormigones, conviene hacer una distinción entre la resistencia a compresión simple y la resistencia a tracción indirecta. En los resultados obtenidos para la primera de las propiedades, se observa una pérdida de capacidad resistente, entre los hormigones curados en cámara e intemperie, de entre un 20% y un 5%, a favor de los primeros, siendo, ésta diferencia menor cuando mayor es el grado de sustitución. Por el contrario, en el caso de la resistencia a tracción indirecta, la diferencia encontrada entre los hormigones curados en los dos distintos ambientes, es mayor que en el primero de los casos y, además, se ve acentuada cuando mayor es el porcentaje de árido reciclado incorporado en el hormigón.

La diferencia encontrada entre la capacidad a compresión y a tracción, puede ser debida a los diferentes mecanismos resistentes que actúan en los dos casos. En el primero de los casos, la resistencia de los áridos influye hasta el punto de que no se aprecia una diferencia mayor del 10% entre los hormigones curados en cámara e intemperie. Esta característica puede ser explicada por la absorción de los AR que, tras la

fabricación, ha impedido que el agua de amasado se evapore con facilidad. Por el contrario, la notable diferencia encontrada en la resistencia a tracción indirecta entre los hormigones curados en cámara e intemperie, se ve acentuada a medida que aumenta el grado de reciclaje debido a que los procesos que gobiernan esta característica están íntimamente relacionados con la porosidad y microfisuras, presentes en mayor medida en el AR frente al AN.

En lo referente a la densidad aparente del hormigón endurecido, no se aprecian grandes diferencias entre los hormigones curados en cámara y los curados en intemperie, siendo la diferencia entre ellos mínima en el caso de los hormigones con alto grado de sustitución.

Se ha hallado poca diferencia en cuanto a las densidades aparentes de los distintos hormigones reciclados estudiados. Al introducir un material de menor densidad (AR) se obtiene un HR de menor densidad. Sin embargo, no sucede lo mismo al considerar la porosidad accesible de los hormigones reciclados ya que disminuye con el grado de sustitución. Este efecto es debido a las mejores características de la pasta de cemento, menos porosa, y a la capacidad impermeabilizante que esta misma pasta ejerce sobre la propia porosidad de los AR. En este sentido, la porosidad observada es debida a la porosidad de la pasta y en menor medida a la porosidad del árido. Igualmente a lo observado en la resistencia a compresión, la pasta de cemento de los HR es de mejores características que la de los HC.

Los hormigones expuestos a ambiente IIIa presentan una porosidad abierta mayor de entre 1.5% y 0.3 % que los hormigones curados en ambiente ideal. La diferencia es tanto mayor cuanto menor es el grado de sustitución.

No se observa una gran diferencia, debida al ambiente de curado, en la permeabilidad al agua. Sin embargo, la durabilidad de los hormigones expuestos a ambientes marinos está limitada por la red capilar permeable a los gases. Los hormigones de control expuestos a la intemperie duplican su permeabilidad a los gases, haciéndose ésta diferencia menor cuanto mayor es el grado de sustitución.

La permeabilidad de los hormigones reciclados depende notablemente del tipo de fluido al que se sometan. Nuevamente es la pasta de cemento la responsable de esta característica, como se puede observar en la capilaridad que permite el paso de los gases se ve, en gran medida, afectada por el ambiente de curado siendo más cerrada en el caso del ambiente de curado ideal y en matrices de hormigón que incorporan AR. En el caso de la capilaridad que hace de mecanismo de transporte para agua, la diferencia que arrojan los dos tipos de ambientes no es tan relevante.

5.- CONCLUSIONES.

Todas las propiedades analizadas se ven influenciadas por las mejores características de las pastas de cemento nuevas que aglutinan los hormigones reciclados. Éstas, por efecto de la mayor porosidad de los AR han dispuesto de una cantidad de agua efectiva menor,

reduciéndose con ello la relación agua/cemento efectiva, sin embargo, se ha conseguido mantener la fluidez mediante la incorporación de una cantidad mayor de aditivo superplastificante.

Como conclusión final, puede afirmarse que hormigones reciclados de aplicación estructural elaborados con iguales relaciones agua/cemento que sus hormigones de control, ofrecen una protección frente a la penetración de agentes externos, mayor que los hormigones tradicionales debido a las mejores características de la pasta de cemento. No obstante, al verse reducida la cantidad de agua efectiva, se hace necesario utilizar productos aditivos superplastificantes que mantengan la fluidez de la masa fresca.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Medio Ambiente la financiación, así como la coordinación por parte del CEDEX, del proyecto RECNHOR y CLEAM.

9.- REFERENCIAS

- [1] Comisión 2 Grupo de trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado, Utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural", ACHE 2006.
- [2] C Thomas, J Setién, JA Polanco, "Comparación de las prestaciones mecánicas entre hormigones reciclados con residuos de construcción y demolición (RCDs) y hormigones convencionales", *Materiales Compuestos*. 1 (2007) 221.
- [3] C Thomas, J Setién, JA Polanco. "Determinación de la macroporosidad accesible y no accesible mediante análisis digital de imágenes en hormigones reciclados de aplicación estructural", *X Congreso nacional de Materiales*. II (2008) 923-926.
- [4] C Thomas, J Setién, JA Polanco. "Determinación del límite a fatiga en hormigones reciclados de aplicación estructural", *Anales de Mecánica de la Fractura*. 1 (2009) 283-289.
- [5] C. Thomas, J. Sánchez, J. Setién, J. A. Polanco, F. Ballester. "Sustainable management of construction and demolition waste: generation, recovery and applications", *RECIMAT'09*. 1 (2009) 156-159.
- [6] M Sánchez, P Alaejos, Estudio sobre las propiedades del árido reciclado. Utilización en hormigón estructural, 2006.
- [7] SW Tabsh, AS Abdelfatah. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr.Build.Mater.* 23 (2009) 1163-1167.