

INFLUENCIA DE LA RELACIÓN ÁRIDO/CEMENTO EN LAS PROPIEDADES DE HORMIGONES POROSOS EMPLEADOS EN PANTALLAS ACÚSTICAS DE CARRETERA

PACS:43.55.Ev

García Arenas C.; Vilches L.F.; Leiva C.; Vale J.; Fernández Pereira C.

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, España, Tel +34954882274, Fax +34954461775, cgarcia4@esi.us.es

ABSTRACT

This communication presents sound absorption results as well as some physical (density, void ratio) and mechanical properties (compressive strength) for a porous concrete composed of cement and crushed granite and a porous concrete modified by replacing crushed granite with coal bottom ash. This study examines the influence of the dosage of crushed granite on the various properties, in view of future uses as road noise barriers, in order to achieve the greatest acoustic absorption of the product keeping the mechanical requirements that make it possible to place and operate during its life cycle.

RESUMEN

En esta comunicación se presentan los resultados de absorción acústica así como algunas propiedades físicas (densidad, porosidad) y mecánicas (resistencia a compresión), para un hormigón poroso compuesto por cemento y grava, y un hormigón poroso modificado producto de la sustitución de grava por escoria. Se analiza la influencia de la dosificación de grava en las distintas propiedades de los hormigones, de cara a su empleo futuro en pantallas acústicas, con el objeto de conseguir la mayor absorción acústica posible, manteniendo unas exigencias mecánicas que hagan posible su puesta en obra y el funcionamiento correcto a lo largo de su ciclo de vida.

1. INTRODUCCIÓN

Incluida en los problemas medioambientales, la contaminación acústica constituye un elemento más de la degradación medioambiental. En la actualidad, el ruido de tráfico urbano es una de las principales causas de preocupación entre la población, por ser considerado como uno de los mayores responsables del deterioro del nivel de calidad de vida, de tal forma que los

cambios en los reglamentos han llevado a la creación de programas bajo la Directiva Europea sobre evaluación y gestión del ruido ambiental [1]. Estos programas conducen al aumento en el uso de barreras acústicas como dispositivos de reducción del ruido de tráfico.

En zonas urbanas, las barreras acústicas convencionales están construidas de hormigón, metal o de vidrio, y están diseñadas para reflejar una alta proporción del ruido de tráfico. Sin embargo, estos dispositivos no atenúan el ruido, mientras que los materiales absorbentes acústicos sí lo hacen. Uno de los materiales absorbentes acústicos más utilizados en esta aplicación es el hormigón poroso de cemento. Se trata de un hormigón convencional al que se le ha quitado una gran parte, o por completo, el árido fino. Como consecuencia de ello, se desarrolla una matriz de poros interconectados que disipan la energía acústica en forma de calor por fricción con las paredes de los poros.

Algunos estudios han analizado el uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigón, debido al crecimiento cada vez mayor de las estructuras y a la escasez y protección de los recursos naturales. Las escorias procedentes de centrales térmicas de co-combustión de carbón se espera que puedan ser recicladas como árido en hormigones dadas sus propiedades físico-químicas. Las escorias representan el 10-15% de la cantidad de ceniza generada en una central térmica, sin embargo, su reciclado es bastante menor comparado con el de las cenizas volantes. La mayor parte de las escorias suelen ser depositadas en vertederos [2, 3].

El objetivo de este estudio es analizar la proporción óptima árido grueso/cemento en el desarrollo de un hormigón poroso, atendiendo a que se pretende que el producto final tenga una aplicación como material acústico absorbente. Además, se va a examinar la posibilidad de usar escorias como sustitutivo de la grava en un hormigón poroso modificado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para la fabricación de las muestras de hormigón poroso, se ha empleado cemento Portland tipo II comercial (CPII) y grava de río (GR). Además, se ha elaborado un hormigón poroso modificado a base de escorias de co-combustión de carbón (ESC). La composición química del cemento, la grava y la escoria, así como la distribución de tamaños de partícula, se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 1, respectivamente. Según los datos indicados en la Tabla 1, el cemento está compuesto por un alto contenido en óxido de calcio, y en menor proporción de óxido de silicio. En el caso de la grava, la composición es fundamentalmente óxido de silicio. La composición química de las escorias muestra un alto contenido en óxido de silicio, así como valores inferiores de óxido de aluminio y hierro. Atendiendo a la gravedad específica de cada material, se ha determinado que el valor medido en el cemento es mayor que el medido en la grava y ambos superiores al medido en la escoria. Los valores de la distribución de tamaños de partícula de los materiales revelan que la grava tiene una distribución de mayores tamaños de partícula que la escoria. La grava está formada en un 90% de partículas mayores de 4,3 mm, mientras que el 90% de las escorias son partículas mayores de 0,6 mm. En el caso del cemento, lo forman partículas de tamaños comprendidos entre 2,2 y 42 μm en el 80%.

	CP II (%)	GR (%)	ESC (%)
SiO ₂	13,83	85,73	52,32
Al ₂ O ₃	3,53	4,96	25,14
Fe ₂ O ₃	2,26	2,92	9,23
MnO	0,06	0,04	0,07
MgO	0,7	0,3	1,84
CaO	59,33	0,46	2,37
Na ₂ O	0,08	1,14	0,66
K ₂ O	0,48	0,99	3,72
TiO ₂	0,19	0,23	1,45
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,25
SO ₃	1,68	0,03	0,03
Pérdida por calcinación	15,5	0,95	1,07
Gravedad específica (g/cm ³)	3,1	2,6	2,2

Tabla 1. Composición química (% p/p)

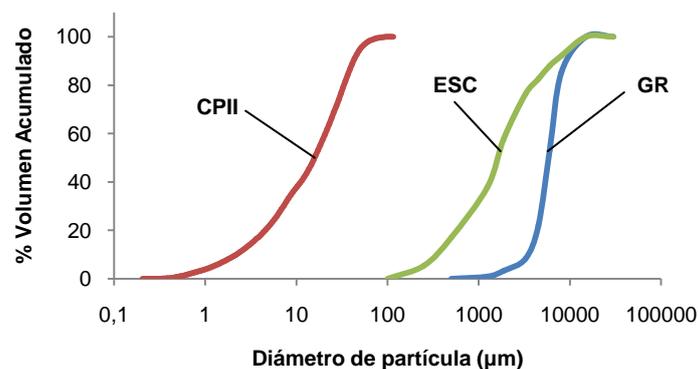


Figura 1. Distribución de tamaños de partícula

2.2 Preparación de las Muestras

Lo que se pretende en una primera fase de este estudio es analizar el efecto de la variación de la proporción de árido grueso en las propiedades de un hormigón poroso, conformado a partir de cemento y grava. Una vez determinada la proporción óptima árido grueso/cemento, se procederá a la sustitución gradual de la grava por escoria en una segunda fase. Para ello, se han elaborado probetas en las que se ha variado en su composición la relación grava/cemento. La nomenclatura utilizada, composición y proporción de agua añadida en los distintos morteros queda recogida en la Tabla 2. Cabe resaltar la variación en los requerimientos de agua para la elaboración de cada composición, que tienden a disminuir cuando la proporción de grava aumenta, siempre manteniendo la misma consistencia del mortero.

La preparación de los morteros descritos en esta investigación requiere que los materiales que los conforman sean dosificados, mezclados, amasados y conformados. Se han fabricado probetas cilíndricas (d=33,3mm; h=40,0mm). Los materiales, dosificados según la composición, se añaden a una mezcladora planetaria junto con el agua de mezclado suficiente para alcanzar una pasta de consistencia y trabajabilidad adecuada. Preparada la pasta, esta se añade a los moldes, compactando ligeramente en la medida de lo posible, a fin de aumentar el índice de poros, y con ello asegurar el mejor comportamiento de absorción acústica del hormigón [4]. Todas las probetas se curan en una cámara de saturación durante 21 días en las que se

mantiene hidratadas (20°C y 95% humedad relativa), y luego 7 días en condiciones ambientales (25°C y 40-50% de humedad) para su estabilización.

	Cemento Portland II (%)	Grava (%)	Relación agua / sólidos (% p/p)
HP 0	100	0	30,0
HP 10	90	10	27,0
HP 20	80	20	20,0
HP 40	60	40	16,0
HP 60	40	60	10,0
HP 70	30	70	9,5
HP 80	20	80	9,0
HP 85	15	85	7,3

Tabla 2. Composición de las probetas de hormigón poroso

2.3 Parámetros y Métodos de Medida

La caracterización de los diferentes productos elaborados en esta investigación se ha llevado a cabo atendiendo a parámetros físicos, mecánicos y acústicos. Referente a la caracterización física se ha determinado porosidad abierta, por ser una propiedad íntimamente ligada al comportamiento acústico de un producto, y densidad aparente. Para la determinación de la porosidad abierta se ha seguido el método de saturación a vacío [5], mientras que la densidad aparente ha sido establecida como la relación entre la masa seca de la probeta y su volumen aparente. De cara a la caracterización mecánica de los productos se ha medido la resistencia a compresión, usando una máquina de compresión (Supezcar, MEM-102/50t) y atendiendo al procedimiento indicado en la norma ASTM E761-92 [6]. Para la caracterización acústica se ha evaluado el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal, según el método del tubo de impedancia y siguiendo las especificaciones que se indican en las normas EN 10534-2 y ASTM E1050 [7, 8]. Se ha empleado el sistema ACUPRO implementado por "Spectronics Inc.", con dos micrófonos y un equipo amplificador de señal SAMSON, con un rango de frecuencia comprendido entre 50-5000 Hz. El montaje de la muestra se ha realizado de modo que el ajuste entre la probeta y el tubo sea perfecto. A través de los valores del coeficiente de absorción se ha calculado el coeficiente de reducción de ruido (NRC), de gran utilidad a la hora de analizar variaciones de comportamiento de absorción acústica por ser un descriptor de un solo número. Está definido por la norma ASTM C 423-90 [9] como la media aritmética de los coeficientes de absorción acústica medidos en las cuatro frecuencias de centro de banda de un tercio de octava de 250, 500, 1000 y 2000 Hz.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estudio de la Proporción Grava/Cemento en las Propiedades de un Hormigón Poroso

En este apartado se presenta la influencia de la proporción árido/cemento en las propiedades físicas, mecánicas y acústicas en probetas a base de cemento y distintas proporciones de grava.

Los resultados de porosidad abierta de las probetas de hormigón poroso están representados en la Figura 2. Al aumentar el contenido de grava en los productos, los valores medidos de porosidad aumentan. Esto es debido a que la grava presenta un mayor tamaño de partícula que el cemento y va formando una matriz de poros, que será mayor conforme la proporción de

grava añadida es mayor. Se puede apreciar un salto en la tendencia cuando se pasa de un 70% a un 80% en el contenido de grava del producto.

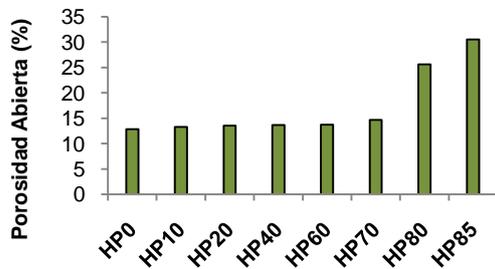


Figura 2. Variación de la porosidad abierta con la proporción de grava

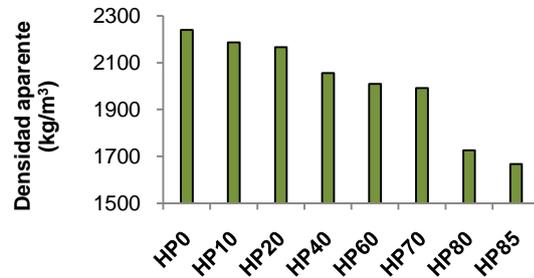


Figura 3. Variación de la densidad con la proporción de grava

El análisis de la Figura 3 manifiesta que conforme la proporción de grava aumenta en los productos, la densidad aparente de los mismos disminuye. Esto es lo que cabe esperar en un material con más poros, y debido también a que se está sustituyendo cemento por grava, la cual tiene una menor gravedad específica.

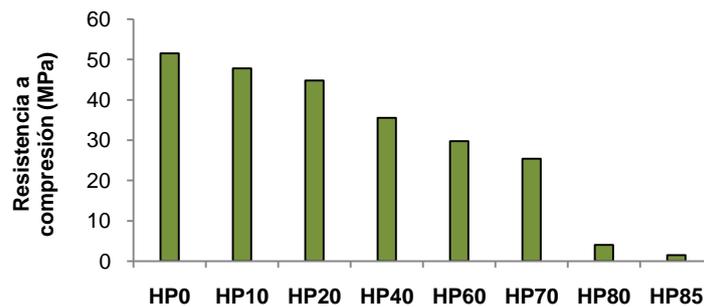


Figura 4. Variación de la resistencia a compresión con la proporción de grava

La resistencia a compresión de los productos de hormigón poroso disminuye conforme la proporción de grava es mayor, tal y como se puede observar en la Figura 4. La razón es que al aumentar el contenido de grava añadida, la matriz porosa generada produce una disminución de la cohesión entre las partículas, provocada por una reducción del número de puntos de contacto por unidad de área entre el árido y la pasta de cemento y, por tanto, resistiendo menos a los esfuerzos de compresión. Este resultado es inversamente proporcional a la tendencia observada en los valores de densidad aparente.

En la Figura 5 se muestran las curvas del coeficiente de absorción acústica a incidencia normal, donde se han representado los valores obtenidos para las frecuencias preferentes en tercios de bandas de octava. El análisis de la figura desvela que hasta un contenido en grava del 70%, los niveles de absorción acústica que se alcanzan son muy bajos y, en todos los casos, las curvas obtenidas son bastante similares entre sí. Para contenidos de grava mayores, el coeficiente de absorción acústica aumenta, alcanzándose valores próximos a 1 para ciertas frecuencias, y siendo mayores en la composición de un 85% de proporción de grava añadida. Estos resultados concuerdan con los valores medidos de porosidad abierta, donde se producía un salto significativo al pasar de un 70% en el contenido de grava. La absorción acústica es la pérdida de energía de la onda sonora por disipación en forma de calor causada por la interacción de la onda con las paredes de las cavidades del producto sobre el que incide. De este modo se explica que conforme mayor sea la proporción de grava, la matriz del producto

será más porosa y, por consiguiente, los coeficientes de absorción acústica medidos para el rango de frecuencias serán mayores.

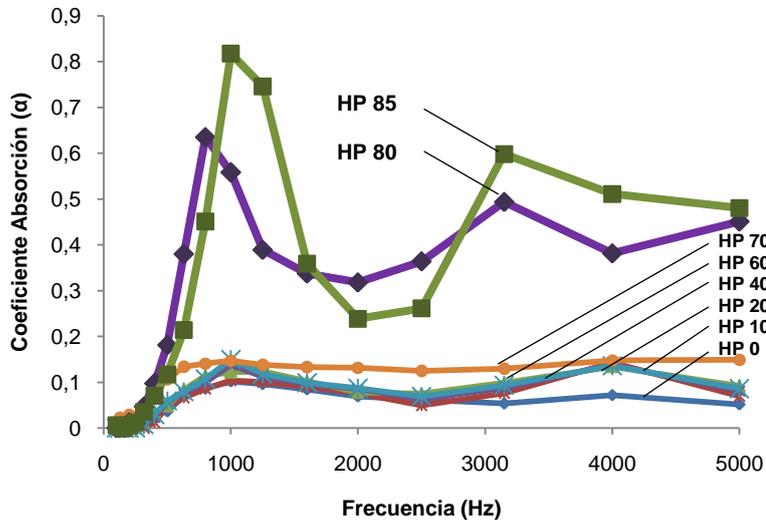


Figura 5. Curvas del coeficiente de absorción acústica en probetas de hormigón poroso con distinto contenido en grava

	NRC
HP0	0,05
HP10	0,06
HP20	0,06
HP40	0,07
HP60	0,07
HP70	0,11
HP80	0,27
HP85	0,30

Tabla 3. Variación del NRC con la proporción de grava

La Tabla 3 muestra la variación de los valores de los NRC calculados. Se puede apreciar la misma tendencia en la variación de los NRC que en las curvas del coeficiente de absorción acústica, quedando patente que los mayores valores del NRC se han calculado para proporciones de grava mayores al 70%. Del mismo modo, la probeta con un 85% de contenido en grava es la que mayor valor de NRC ha presentado.

A la vista de los resultados obtenidos y, atendiendo a que se pretende alcanzar los máximos valores de absorción acústica manteniendo una resistencia mecánica que permita su trabajabilidad y puesta en obra, la proporción óptima grava/cemento se ha fijado en un 80/20. El mortero elaborado con esta composición ha mostrado valores elevados del coeficiente de absorción acústica en el rango de frecuencias medido y, además, una resistencia mecánica similar a la de otros hormigones porosos con la misma densidad [4].

3.2 Estudio de la Sustitución de Grava por Escoria en la Elaboración de un Hormigón Poroso Modificado

Una vez se ha fijado la proporción óptima árido grueso/cemento, la siguiente fase de la investigación ha consistido en el desarrollo de un hormigón poroso modificado a base de la sustitución gradual de grava por escoria, y analizándose como afecta la adición de escorias a las propiedades del producto. Para ello, se han elaborado probetas con diferente proporción escoria/grava, manteniendo siempre la proporción árido grueso/cemento en 80/20. La nomenclatura utilizada, composición y proporción de agua añadida en los distintos morteros queda recogida en la Tabla 3.

	ESC (%)	GR (%)	CPII (%)	Relación agua / sólidos (% p/p)
ESC40	40	40	20	12,5
ESC60	60	20	20	16,0
ESC80	80	-	20	20,0

Tabla 3. Composición de las probetas de hormigón poroso modificado a base de escorias

A las probetas de hormigón poroso modificado con distinta proporción escoria/grava se les ha determinado la densidad, resistencia a compresión, coeficiente de absorción acústica en el rango de frecuencias de medida y el NRC. En la Tabla 4 y en la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos.

	Densidad (kg/m ³)	Rc (MPa)	NRC
HP80	1725	4,1	0,27
ESC40	1695	4,9	0,26
ESC60	1625	5,8	0,20
ESC80	1495	6,5	0,19

Tabla 4. Propiedades hormigón poroso modificado a base de escorias

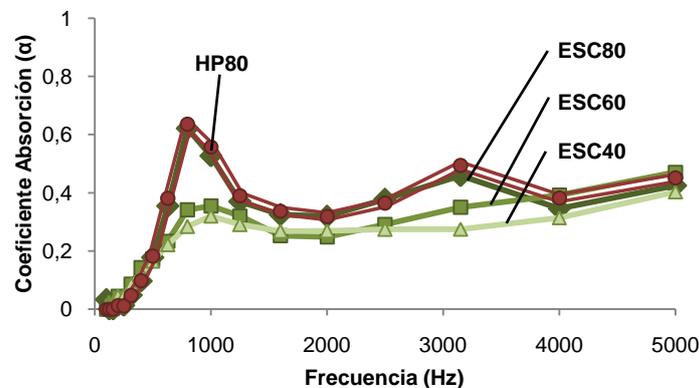


Figura 7. Curvas del coeficiente de absorción acústica en probetas de hormigón poroso modificado a base de escorias

Un análisis de los datos anteriores, permiten establecer que la densidad de los productos de hormigón poroso modificado a base de escorias tiende a disminuir conforme la proporción de escoria en ellos aumenta, debido a que se está sustituyendo grava por escoria, un material de menor gravedad específica. Sin embargo, la resistencia a compresión aumenta a medida que la proporción de escorias en los productos es mayor, debido fundamentalmente a que la escoria tiene más partículas de menor tamaño que la grava que se introducen en los poros originados por las partículas gruesas, aumentando por tanto el número de puntos de contacto entre el árido y el cemento y como consecuencia la resistencia a los esfuerzos de compresión. El comportamiento de la absorción acústica de los productos de hormigón poroso modificado tiende a empeorar conforme la proporción de escoria añadida es mayor, consecuencia de que las partículas finas de escoria producen materiales menos porosos disminuyendo la disipación de la energía de la onda acústica.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que pueden extraerse de esta investigación son las siguientes:

- Atendiendo a las propiedades físicas y mecánicas, la porosidad abierta de los productos de hormigón poroso aumenta conforme la proporción de grava añadida es mayor. La tendencia inversa se observa en la densidad, que tiende a disminuir al aumentar el contenido en grava de los productos. La variación de la resistencia a compresión de los productos con la proporción de grava añadida se ajusta a los resultados obtenidos en las propiedades físicas, disminuyendo a medida que el contenido de grava se hace mayor.

- Respecto a las propiedades acústicas, los coeficientes de absorción acústica medidos a los diferentes productos de hormigón poroso tienden a ser mayores en todo el rango de frecuencia conforme la proporción de grava añadida aumenta. Una tendencia similar se observa en los resultados de los NRC calculados para las distintas composiciones.
- Los resultados del estudio de la proporción grava/cemento en un hormigón poroso han conducido a fijar una solución de compromiso de un 80/20, que alcanza adecuadas propiedades mecánicas y acústicas.
- En la elaboración de un hormigón poroso modificado a base de escorias se ha comprobado que la distribución granulométrica del árido grueso (escoria/grava) influye en las propiedades del producto. De este modo, a medida que la proporción de escorias es mayor, la densidad de los productos disminuye y aumenta la resistencia mecánica. El incremento del porcentaje de escorias provoca que el coeficiente de absorción acústica disminuya en todo el rango de frecuencias al igual que el NRC.
- Las escorias de co-combustión de carbón y coke pueden ser potencialmente recicladas en un hormigón poroso modificado con una proporción escoria/grava/cemento del 40/40/20 ya que este producto presenta unas características similares a las mostradas por un hormigón poroso compuesto por un 80/20 de grava/cemento.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero para esta investigación recibido por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología, bajo el proyecto GEOPOL (CTM2010-19917).

REFERENCIAS

- [1] European Parliament Directive relating to the assessment and management of environmental noise 2002/49/EC, European Parliament and of the Council (2002).
- [2] X. C. Quiao, B. R. Ng, M. Tyrer, C. R. Cheeseman, "Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash", *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 473-480.
- [3] S. B. Park, Y. I. Jang, J. Lee, B. J. Lee, "An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea", *Journal of Hazardous Materials*, 166 (2009), pp. 348-355.
- [4] H.K. Kim, H.K. Lee; "Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete", *Applied Acoustics*, 71 (2010), pp. 607-615.
- [5] EN 1936:2006. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total".
- [6] ASTM E761 - 92(2005). "Standard Test Method for Compressive Strength of Sprayed Fire-Resistive Material Applied to Structural Members".
- [7] EN 10534-2. "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia".
- [8] ASTM E1050-98. "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System".
- [9] ASTM C 423-90. "Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation method".