

## **MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS OBTENIDOS A PARTIR DE ESCORIAS DE CO-COMBUSTIÓN DE CARBÓN Y COKE**

PACS:43.55

C. García Arenas; C. Leiva; L. F. Vilches; J. Vale y C. Fernández-Pereira  
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n CP 41092  
Teléfono: 954487282 E-mail: [carlosleiva@esi.us.es](mailto:carlosleiva@esi.us.es)

### **ABSTRACT**

This communication presents the results of sound absorption, mechanical (compressive strength) and other physical properties (density and target void ratio) of a new product consisted mainly of bottom ash (80 wt%) from coal and coke co-combustion mixed with Portland cement type II (20 wt%). This study analyzes the influence of bottom ash particle size and the thickness of plates made of the product in the measured properties, with the point of view of using them as noise barriers. The results are similar or even better than those found in porous concrete used for the same application.

### **RESUMEN**

En esta comunicación se presentan los resultados de absorción acústica, así como algunas propiedades físicas (densidad, porosidad) y mecánicas (resistencia a compresión) medidas a un nuevo producto compuesto fundamentalmente (80%p) de escorias procedentes de la co-combustión de carbón y coque, mezclado con cemento Pórtland tipo II (20%p). En este estudio, se ha analizado la influencia del tamaño de partícula de la escoria y el espesor de placas fabricadas con el nuevo producto en las propiedades antes mencionadas, de cara a su empleo futuro en pantallas acústicas. Las propiedades obtenidas son similares e incluso mejores que las obtenidas con algunos hormigones porosos empleados en estas aplicaciones.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Las mejoras del nivel de vida en zonas urbanas e industriales requieren de un entorno ambiental conveniente, con el fin de mejorar la calidad de vida. Para lograr este entorno, es necesario prevenir o reducir de forma efectiva diversos problemas ambientales que

ocurren alrededor de las áreas residenciales. El ruido es uno de los problemas más importantes, y puede ser generado por muchas fuentes, como el tráfico en carreteras, el vuelo de aviones, la actividad industrial en fábricas y los originados en las construcciones civiles y arquitectónicas [1].

Para resolver los problemas descritos anteriormente, una solución bastante utilizada consiste en recurrir al uso de hormigón poroso como material de construcción absorbente de ruidos [2, 3, 4]. El hormigón poroso se conforma eliminando el árido fino del hormigón estándar, de forma que se desarrolla una matriz con poros abiertos. En este tipo de productos, la energía cinética de la onda sonora se transforma en calor debido a la interacción de la onda con las paredes de las cavidades del material absorbente [2, 3]. El hormigón poroso se aplica generalmente en pavimentos de hormigón o en barreras acústicas, reduciendo el impacto del ruido en carreteras. A pesar de que el hormigón estándar también absorbe acústicamente, el hormigón poroso es un material mucho más eficiente [4].

En este sentido muchos estudios experimentales se han dirigido a desarrollar la eficiencia acústica del hormigón poroso, algunos de ellos usando árido grueso reciclado como alternativa a los áridos gruesos más usados comúnmente [5]. Un material absorbente acústico a base de escorias provenientes de centrales térmicas de co-combustión de carbón, puede tener un gran interés en el campo del reciclado de residuos en materiales absorbentes acústicos, dadas las propiedades físico-químicas de este tipo de residuos. Las escorias se originan por la fusión del material inerte que acompaña al carbón, quedando retenidas en el fondo de la caldera. En general, son mezclas de óxidos de diversos elementos con un pequeño contenido en materia inquemada, que pueden catalogarse normalmente como residuos inertes y que se suelen depositar en vertederos [6].

Para hacerse una idea del potencial de reciclado de las escorias de centrales térmicas en este campo, y a modo de ejemplo, con las propiedades de densidad y altura de pantallas acústicas de carreteras que actualmente suelen utilizarse, puede calcularse que las escorias producidas en una central térmica de carbón de 550 MWe en un año, podrían reciclarse en unos 100km de barreras acústicas de hormigón, si se justificara que un 30-40% de escorias en la composición del hormigón poroso modificado sigue manteniendo o mejorando las especificaciones técnicas exigidas a las mismas.

El objetivo de este estudio es la investigación del potencial de desarrollo de un producto fabricado a partir de escorias procedentes de la co-combustión de carbón y coke, para que sea un buen absorbente acústico. Con ello el residuo adopta un nuevo uso como componente de un nuevo producto, consiguiéndose una valorización de dichas escorias. Para examinar la efectividad del uso de escorias como árido grueso en un hormigón poroso modificado y su aplicación como material absorbente, se ha analizado el efecto de la granulometría de la escoria en sus propiedades físicas, mecánicas y acústicas. Estas últimas usando el método del tubo de impedancia para medir el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Materiales**

En este estudio se han empleado escorias (ESC) de co-combustión de carbón y coke, cemento Pórtland tipo II (CPII) y además, para la fabricación de un hormigón poroso estándar se ha empleado grava de río (GR). Las composiciones químicas de todos los materiales empleados se muestran en la Tabla 1.

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

**Tabla 1. Composición química (% p/p)**

Como se muestra en la Tabla 1, la suma de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la escorias alcanza un 86.7% de la composición, indicando que las escorias pertenecen a la Clase F según la clasificación de la normativa ASTM C 618 [7]. El cemento está compuesto básicamente por óxido cálcico, y en menor proporción de óxido de sílice. El árido grueso, al ser grava de río, está compuesto fundamentalmente de SiO<sub>2</sub>.

En la Tabla 2 se muestra la distribución granulométrica de la escoria y de la grava usando tres cortes diferentes, el tamaño medio del material y su gravedad específica. Se puede comprobar como la escoria tiene un mayor contenido de finos y, en general, una mayor proporción de partículas de menor tamaño que la grava.

	d <sub>p</sub> >5mm [%]	1,25mm<d <sub>p</sub> <5mm [%]	d <sub>p</sub> <1,25mm [%]	Tamaño medio [mm]
<b>Grava</b>	78,3	20,8	0,9	4.6
<b>Escoria</b>	17,7	44,3	38	2.5

**Tabla 2. Distribución granulométrica grava y escoria**

## 2.2 Preparación de las Muestras

El hormigón poroso modificado objeto de este estudio se han conformado a partir de un 80% de escorias y de un 20% de cemento Pórtland tipo II. Asimismo, se ha fabricado una muestra de hormigón poroso estándar, con un 80% de grava y un 20% de cemento, al que se le han realizado los mismos ensayos, y cuyos resultados se han utilizado como referencia en las comparaciones con el hormigón modificado.

Las muestras se han fabricado siguiendo un método simple y de bajo coste, sin tratamiento previo de las escorias. Los materiales se pesan según la formulación del producto y, a continuación, se mezclan en una mezcladora planetaria con la cantidad de agua necesaria para que se alcance una mezcla homogénea. Una vez alcanzada la consistencia adecuada, se rellenan los moldes cilíndricos ( $d=34\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ ), compactando al máximo para obtener un material con la mayor densidad posible. El desmoldado se realiza a las 48h, procediendo al curado durante 28 días en cámara de saturación a  $20^\circ\text{C}$ . La nomenclatura utilizada, composición y proporción de agua añadida en las muestras se recoge en la Tabla 3. Cabe destacar la variación de la proporción de agua añadida en la fabricación de los hormigones, de modo que conforme el material se hace más fino los requerimientos de agua aumentan.

	ESC+5	ESC+1	ESC-1	ESC	REF
<b>Escoria (%)</b>	80	80	80	80	-
<b>CP II (%)</b>	20	20	20	20	20
<b>Grava (%)</b>	-	-	-	-	80
<b>Tamaño partícula (mm)</b>	$d_p > 5$	$1,25 < d_p < 5$	$d_p < 1,25$	Sin Tamizar	Sin Tamizar
<b>Proporción agua/sólidos (% p/p)</b>	9,5	12,5	27,5	20	9

**Tabla 3. Composición de las muestras preparadas**

### 2.3 Parámetros y Métodos de medida.

La caracterización física y mecánica de las muestras se ha realizado midiendo densidad aparente, porosidad abierta y resistencia a compresión.

La densidad aparente es la relación entre la masa de la probeta seca y su volumen aparente, siendo medida atendiendo al peso y el volumen (dimensiones) de las probetas, obteniéndose el valor como media de triplicado. La porosidad abierta es la relación en porcentaje entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente de la probeta [8]. La resistencia a compresión de las muestras se ha evaluado usando una máquina de compresión (Supezcar, MEM-102/50t) y atendiendo al procedimiento indicado en la norma ASTM E761-92 [9]. La caracterización acústica de los productos se ha realizado midiendo su coeficiente de absorción acústica a incidencia normal, por el método del tubo de impedancia y siguiendo las especificaciones que se indican en las normas EN 10534-2 y ASTM E1050 [10, 11]. Para ello, se ha empleado el sistema ACUPRO implementado por "Spectronics Inc.", con dos micrófonos y un equipo amplificador de señal SAMSON. El rango de frecuencias de medida ha sido 50-5000 Hz. El montaje de la muestra se ha realizado de modo que el ajuste entre la probeta y el tubo sea perfecto.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha analizado cómo afecta el tamaño de partícula en las propiedades de los productos, teniendo en cuenta que en la elaboración de las probetas se ha intentado maximizar la compactación por medios manuales, quedando, por tanto, este parámetro fuera de las variables de estudio.

La densidad aparente de los productos con escoria aumenta conforme se hace más fino el tamaño de partícula de la escoria, como se puede observar en la Figura 1. Esto es lo que cabe esperar en un material más compacto, con menos huecos, que se refleja en los mayores valores de densidad obtenidos. Por el contrario, los productos objeto de este estudio resultan ser menos densos que el de referencia (hormigón poroso estándar) a pesar de que la grava tiene un mayor tamaño de partícula que la escoria y debido a la mayor gravedad específica de la grava. Asimismo, se comprueba que el hormigón fabricado con la escoria original sin tamizar (ESC), tiene una densidad que queda comprendida entre el valor máximo y el mínimo mostrados por los productos elaborados a partir de los distintos cortes granulométricos.

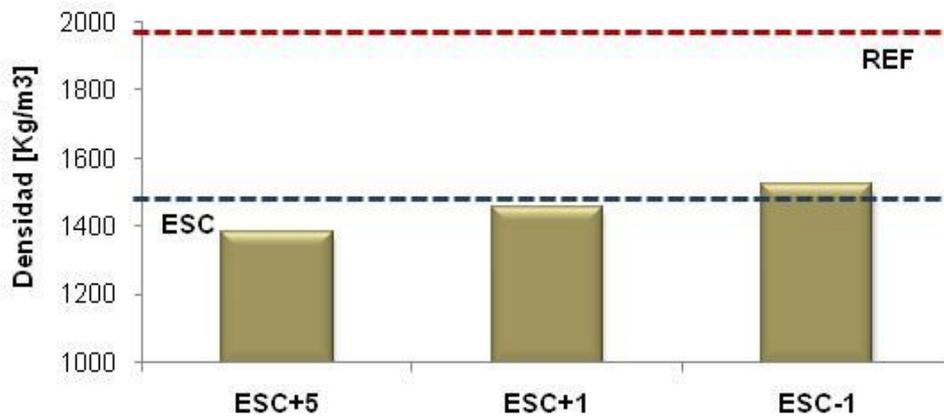


Figura 1. Variación de la densidad con el tamaño de partícula

La misma tendencia se observa en los resultados obtenidos de la medida de la porosidad abierta (Figura 2). A mayor tamaño de partícula, mayores son los huecos que se originan en el producto, por lo que los valores de porosidad abierta se ven incrementados. Si se comparan los valores obtenidos en los hormigones con escoria con los de la probeta REF, éste toma valores intermedios, al igual que ocurre con la de ESC. La elevada proporción de huecos explica la baja densidad aparente de las probetas.

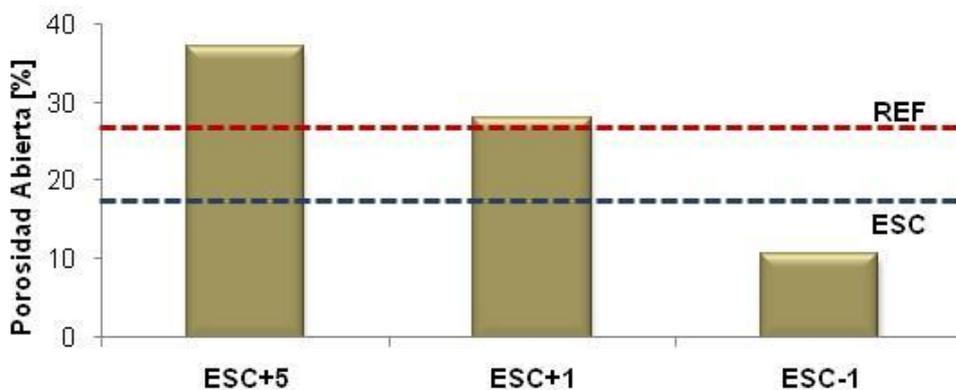


Figura 2. Variación de la porosidad abierta con el tamaño de partícula

En referencia a las propiedades mecánicas, la resistencia a compresión de los productos tiende a aumentar conforme el tamaño de partícula se hace más pequeño, tal y como se observa en la Figura 3. Tanto en el hormigón de referencia como en el de escoria sin tamizar, se han obtenido valores de resistencia a compresión intermedios entre los valores extremos

alcanzados por las muestras correspondientes a los distintos cortes de la escoria. Se observa que REF presenta una resistencia a compresión menor que la de ESC, esto se debe, probablemente, a que la granulometría influye en las propiedades mecánicas, de modo que al tener la escoria una distribución granulométrica con un mayor contenido de finos, este material más fino se introduce entre los huecos de las partículas más gruesas, generando un producto que presenta mayor resistencia a la compresión.

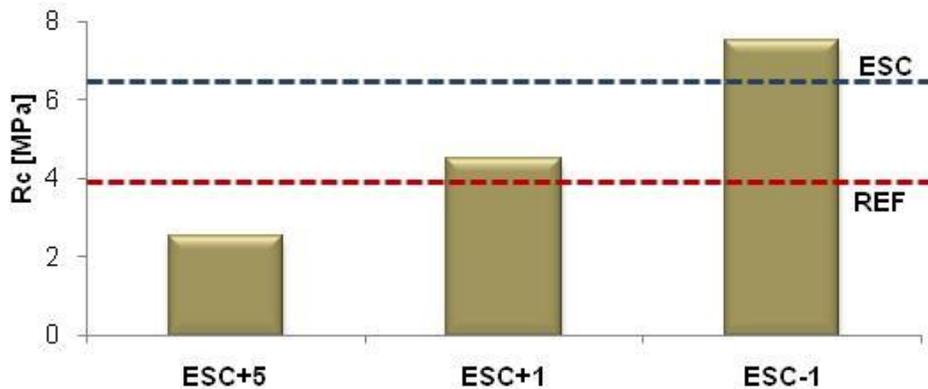


Figura 3. Variación de la resistencia a compresión con el tamaño de partícula

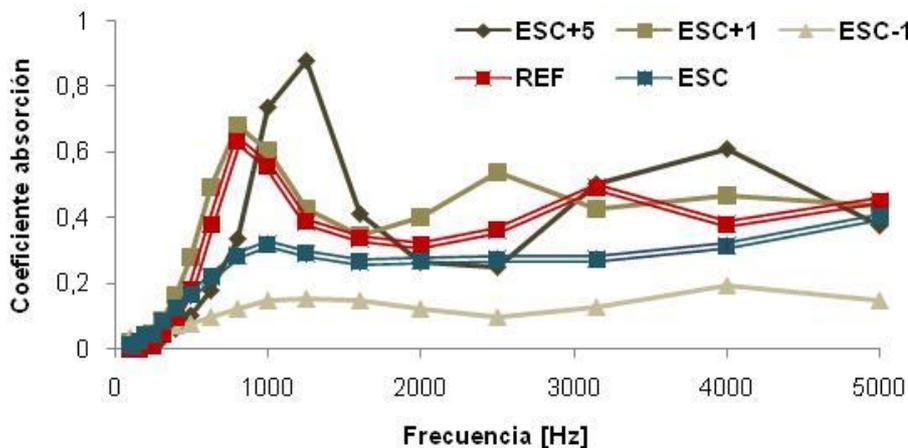


Figura 4. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal

Los resultados obtenidos tras medir el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal en el tubo Kundt de los productos elaborados con distinto tamaño de partícula de escoria, así como de los productos REF y ESC, se muestran en la Figura 4. Los productos que menores coeficientes de absorción presentan son ESC-1 y ESC, que son las probetas que han dado los menores valores de porosidad abierta. Para los hormigones con los tamaños de partícula más gruesos se alcanzan valores de coeficiente de absorción más elevados. El producto REF presenta una curva similar a la de ESC+1, mientras que el producto ESC+5 es el que alcanza un mayor valor en su máximo de absorción entorno a frecuencias de 1kHz, siendo estas frecuencias las más relevantes para el ruido en carreteras.

Se ha realizado un estudio sobre el efecto de la longitud de la probeta en las mediciones del coeficiente de absorción acústica a incidencia normal. Para ello se ha usado la composición ESC+5 con tres longitudes diferentes: L1 (4cm), L2 (8cm) y L3 (16cm).

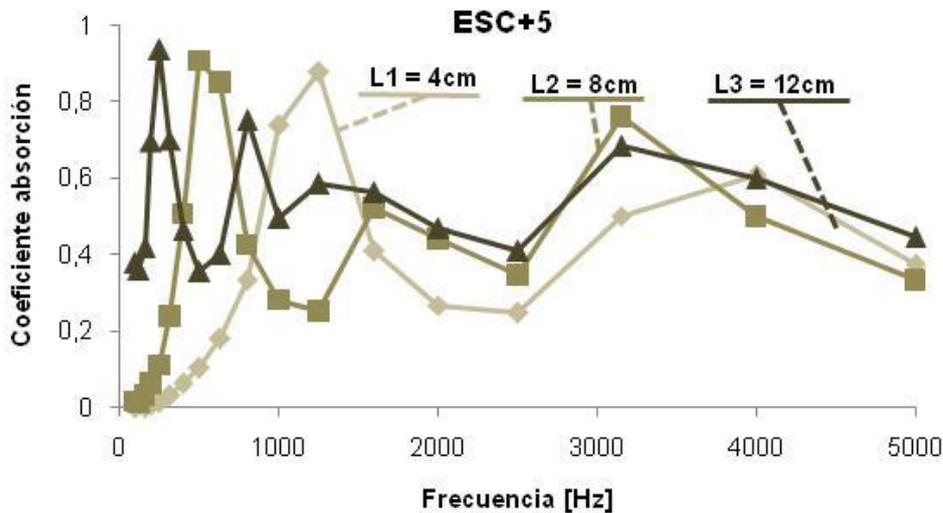


Figura 5. Variación coeficiente de absorción acústica con la longitud de la probeta

El análisis de la Figura 5 muestra que, en primer lugar, al aumentar la longitud de la probeta el valor máximo de absorción alcanzado aumenta ligeramente. Esto es debido a que la longitud de los poros por los que circula la onda sonora aumenta por lo que la fricción es mayor y debido a esto la onda pierde una mayor cantidad de energía.

En segundo lugar se puede observar como conforme la longitud de la probeta aumenta, las curvas se trasladan hacia zonas de baja frecuencia. A través de las ecuaciones que modelan el mecanismo de absorción de un material poroso se puede explicar la relación entre la frecuencia a la que aparecen los picos de máxima absorción y la longitud de la probeta [12, 13], mediante la siguiente ecuación:

$$f_p \cdot l = \frac{(2n - 1) \cdot c}{4} = \text{constante}$$

Siendo  $f_p$  la frecuencia a la que se produce el pico de absorción máxima,  $n$  el número de picos (constante),  $c$  la velocidad del sonido en aire (fija para una temperatura) y  $l$  la longitud de la probeta. A través de la ecuación se puede confirmar que a medida que aumenta la longitud de la probeta, la frecuencia a la que aparecen los picos de máxima absorción disminuye.

#### 4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo se pueden resumir de la siguiente manera:

- La densidad del hormigón poroso modificado con escorias aumenta conforme el tamaño de partícula es más fino. Al compararlo con un hormigón poroso estándar, el hormigón modificado resulta ser menos denso.
- La porosidad abierta del hormigón con escoria es mayor para la granulometría más gruesa de las escorias. Sólo el producto obtenido con el tamaño más fino de partícula tiene menor porosidad que el hormigón poroso estándar.
- La resistencia a compresión del hormigón modificado se ve incrementada cuando el tamaño de partícula se hace más fino, en concordancia con la densidad. Sólo el producto obtenido con

la granulometría más fina de la escoria presenta valores de resistencia a compresión del orden de los mostrados por el hormigón poroso estándar.

- La comparación entre los resultados obtenidos con los productos fabricados a partir de tamaños de partícula de la escoria conocidos, con los del producto a base de escoria sin tamizar muestra que variando el tamaño de partícula se pueden variar las propiedades físicas, mecánicas y acústicas del producto final.

- El estudio del efecto de la longitud de la probeta en las propiedades acústicas del hormigón modificado muestra que a mayor longitud mejores coeficientes de absorción acústica a incidencia normal se obtienen, debido principalmente al incremento de los picos de máximos de absorción y al traslado de la curva hacia frecuencias más bajas.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que un hormigón poroso modificado a base de escorias de co-combustión de carbón y coke puede tener un desarrollo potencial como material absorbente acústico al presentar características similares a las de otros productos utilizados habitualmente.

### **Agradecimientos**

Se agradece el apoyo financiero para esta investigación recibido por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología con fondos europeos FEDER, bajo el proyecto RUIDRES (CTM2007-62031) y por el gobierno regional de Andalucía, bajo el proyecto RESISTER (P06-TEP142-01794).

### **REFERENCIAS**

- [1] S.B. Park, D.S. Seuk and J. Lee. "Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio". *Cement & Concrete Research*. 2005. Vol 35, Issue 9, September 2009, *Pages 1846-1854*
- [2] M.J. Brennan, W.M. To "Acoustic properties of rigid-frame porous materials- an engineering perspective" *Applied Acoustics, Volume 62, Issue 7, July 2001, Pages 793-811*
- [3] N. Neithalath, A. Marolf, J. Weiss and J. Olek, "Modeling the influence of pore structure on the acoustic absorption of enhanced porosity concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology* **3** (1) (2005), pp. 29–40.
- [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) 607-615.
- [5] Park SB, Seo DS, Lee J. "Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio". *Cem Concr Res* 2005;35(9):1846–54
- [6] EULFD. Council Directive 1999/31/EC of 19 December 2002 on the landfill of waste.
- [7] ASTM C 618-05, Standard Specification for coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International (2005).
- [8] EN 1936:2006. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
- [9] ASTM E761 - 92(2005) Standard Test Method for Compressive Strength of Sprayed Fire-Resistive Material Applied to Structural Members.
- [10] EN 10534-2. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia.
- [11] ASTM E1050-98 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System.
- [12] Neithalath N. "Development and characterization of acoustically efficient cementations materials". Ph.D. Thesis, Purdue University; 2004.
- [13] Zwicker C, Kosten CW. "Sound absorbing materials". Elsevier Publishing Company Inc.; 1949.