

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ZAMORA  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y AGRONOMÍA  
ÁREA DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA METALÚRGICA

## INGENIERÍA DE MATERIALES



## RESUMEN

# **ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE MATERIALES CERÁMICOS FABRICADOS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN**

AUTOR: DIEGO VICENTE BENITO

DIRECTORA: NATIVIDAD ANTÓN IGLESIAS

FECHA DE ADJUDICACIÓN: FEBRERO 2012

FECHA DE PRESENTACIÓN: SEPTIEMBRE 2012



## I. Introducción

Los materiales obtenidos a partir de residuos de construcción, permiten la incorporación de materia que se gestiona parcialmente en la actualidad. La aplicación de estos residuos, se ha ido incorporando a los procesos de fabricación de materiales, en diversos campos. En el caso de los materiales destinados al acondicionamiento acústico, se emplean los residuos de polímeros, y textiles de una forma extendida; por lo que estudiar la posible incorporación de materiales cerámicos reciclados es el objetivo fundamental de este estudio. La existencia de datos acústicos sobre los materiales convencionales, se centran en las propiedades de aplicación para acondicionamiento, sin embargo las características de diseño son limitadas. De tal forma, el estudio de algunos materiales convencionales señalados (ladrillos ordinario, y caravista), se realizó junto con los materiales fabricados a partir de residuos de construcción que se caracterizan en este proyecto (hormigón, y ladrillo), ambos para obtener piezas sinterizadas. Con ello se ha realizado la comparación de propiedades en tres líneas. Por un lado las propiedades empleadas en la técnica para realizar el acondicionamiento acústico, de otra parte los parámetros que influyen en el comportamiento acústico del material, y finalmente; extendiendo la funcionalidad del equipo principal empleado, la medida de propiedades elásticas. La información que desprenden los ensayos, se ha tratado mediante modelos físicos para obtener una visión del estado actual de los materiales cerámicos reciclados, definir las posibilidades de mejora, y finalmente incorporar nuevos métodos para estudiar propiedades derivadas de la acústica; y disponer de una visión del estado actual de estas técnicas innovadoras. Las características y mecanismos del comportamiento acústico de los materiales analizados, son principalmente absorbentes del sonido; haciendo fundamental el estudio detallado de la poroelasticidad de materiales.



## II. Objetivos

En este trabajo se prestan los siguientes puntos fundamentales de estudio:

**-Caracterización de propiedades acústicas:** Los materiales reciclados empleados no se encontraban caracterizados. Por lo que las propiedades que regulan el comportamiento ante el sonido, han sido recogidas.

**-Comparación de propiedades:** Se ha realizado la toma de datos de materiales convencionales de referencia con el objetivo de profundizar en su descripción, y tener una referencia de partida, ante los materiales reciclados.

**-Determinación de parámetros:** Para el diseño de materiales acústicos es necesario conocer un conjunto de propiedades, que han sido extraídas mediante modelos en este proyecto. Además el comportamiento presentado de cada material queda recogido mediante modelos acústicos.

**-Determinación de propiedades elásticas:** El fin de este objetivo es extender, y explotar las capacidades del tubo de impedancia acústica, por lo que se ha realizado un estudio y aplicación de los métodos más innovadores para la medida de estas propiedades; mediante emisión de ondas acústicas en el espectro audible.



### III. Exposición del desarrollo

#### Técnica acústica y procesado de materiales

En esta primera parte se presentan las propiedades características de la acústica y los fundamentos para la aplicación técnica. También se concretan las características y clasificaciones que existen en los materiales destinados al acondicionamiento acústico, y como se define la clase de comportamiento que presentan a partir de la curva del coeficiente de absorción idealizada.

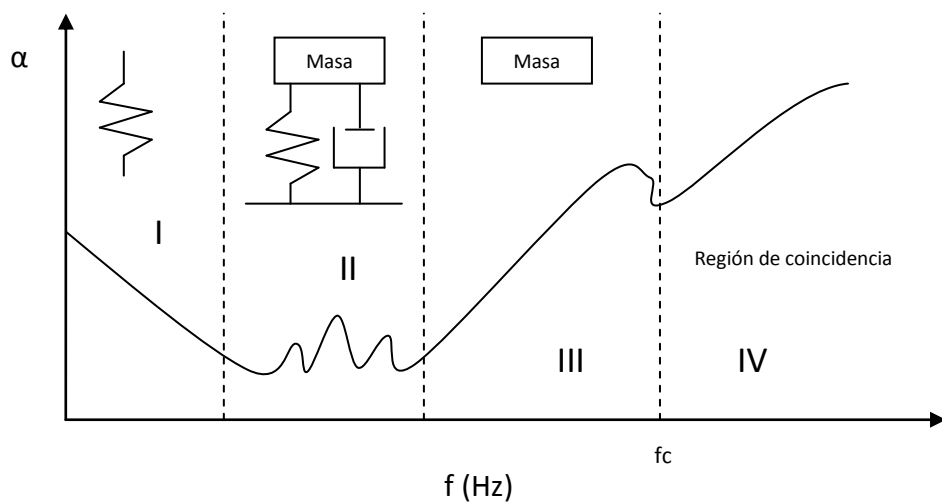


Figura 1. Curva del coeficiente de absorción lineal idealizada

A su vez, se exponen las tendencias actuales en el empleo de materiales cerámicos convencionales en el campo del acondicionamiento acústico, y se revisa el estado en el que se encuentra la utilización de materiales reciclados. Conjuntamente se muestran las técnicas de procesado de cerámicas, que posteriormente son empleadas en el capítulo de materiales y métodos.

#### Modelos matemáticos

El empleo de los modelos tanto poroelásticos, como de cuerpos densos en acústica; permite definir el comportamiento del material para diversas condiciones de utilización. Pero en el caso de los materiales poroelásticos, no solo facilita su definición, sino que también permite conocer parámetros del material que son



manipulables en el procesado y que pueden enfocarse a la mejora del comportamiento acústico. Por otro lado, la utilización de modelos recientes para la determinación de propiedades acústicas intrínsecas, como son las propiedades elásticas; permite ampliar las capacidades de caracterización del tubo de impedancia.

## **Materiales y métodos**

El trabajo desarrollado con las muestras se centra en los materiales reciclados de forma fundamental. Sin embargo, para poder realizar una comparación mucho más detallada, se estudiaron los materiales convencionales de los que proceden los residuos. Por este motivo se han utilizado muestras de ladrillo ordinario, y caravista, junto a las muestras de ladrillo reciclado L9 y hormigón reciclado H1 y H8.

La extracción de las muestras de ladrillo caravista y convencional, se realizó mediante el corte de las cantoneras y posterior corte mediante corona diamantada de las muestras empleadas en el tubo de impedancia.

Por su parte las muestras de hormigón reciclado fueron reutilizadas a partir de las piezas que se emplearon en el proyecto. *“Comportamiento frente a compresión de materiales cerámicos, fabricados mediante moldeo a partir de residuos de construcción”* Resolviendo de esta manera la problemática de falta de disponibilidad de polvo de este material.

Finalmente se realizó el procesado del ladrillo reciclado L9 siguiendo las líneas de trabajo del laboratorio de materiales de la escuela politécnica superior de Zamora, basadas en el moldeo STARCH y el posterior sinterizado del material.

Las muestras obtenidas se emplearon para determinar principalmente el coeficiente de absorción acústica lineal, y la impedancia acústica específica. El fundamento del ensayo consiste en colocar una muestra cilíndrica de material en el extremo de un tubo. Mediante la generación de ondas planas pseudo-aleatoria en el extremo contrario, se puede efectuar dichas medidas. Para ello se miden en uno o varios puntos conocidos la presión acústica, para poder determinar la función de transferencia de las posiciones obteniéndose el coeficiente de reflexión complejo en incidencia normal.



## IV. Exposición de resultados

Con los datos obtenidos de los ensayos de las muestras, se ha realizado la determinación de los valores promedio para el rango de frecuencias estudiado. Entre los datos obtenidos se encuentra el coeficiente de absorción, que nos sirve de indicador de la disipación de energía en un material poroso, y la impedancia acústica específica que nos indica cómo son los mecanismos de reflexión ó disipación del sonido. Con estas variables se ha conseguido determinar el tipo de material, de las muestras ensayadas así como los comportamientos particulares de cada muestra, que nos indica en el caso de los materiales reciclados, una gran homogeneidad en el comportamiento.

Para confirmar la fiabilidad del coeficiente de absorción acústico lineal de las muestras, y conocer el grado de dispersión que está presente en los materiales reciclados, con respecto a los convencionales, se empleó la regresión de la distribución de Weibull. Pero inicialmente también se comparó una propiedad másica como es la densidad con los valores resultantes para el coeficiente de absorción lineal, para mostrar como los mecanismos de la acústica no se limitan únicamente a la masa, sino también a las heterogeneidades del cuerpo, la interacción con el aire, o las características superficiales.

El objetivo de la aplicación de los modelos acústicos presentados, es por un lado para recoger el comportamiento de los materiales bajo estudio, y para conocer los parámetros que determinan el comportamiento acústico. Los modelos acústicos nos permiten extender el comportamiento del material fuera del intervalo de frecuencias de estudio, y permite la modificación de ciertas propiedades, para estudiar como cambiaría el comportamiento (Porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo estático de aire, y longitudes características). Con esta serie de datos se puede saber si el material tiene posibilidades de mejora, y cuáles son las condiciones que hay que modificar en la fabricación para alcanzarlas.



Finalmente se ha realizado la medida de las propiedades acústicas intrínsecas, más concretamente las propiedades elásticas como el módulo de compresibilidad isotérmico, el módulo elástico, y el coeficiente de Poisson. La técnica empleada, basada en la emisión de ondas en el tubo de impedancia, y medida de las resonancias de absorción y del coeficiente de pérdidas; es actualmente una técnica que se está desarrollando y se encuentra muy limitada a una banda de materiales muy estrecha. Fundamentalmente aquellos materiales porosos y de densidades medias/bajas, que presenten un buen comportamiento ante el modelo de Delany-Bazley. Mientras que la determinación del módulo de compresibilidad se efectúa con sencillez, el coeficiente de Poisson presenta dificultades debido a los ajustes del modelo, y la técnica de residuos empleada.



## V. Conclusiones

Podemos indicar de los materiales que han sido objeto de estudio que:

Los materiales reciclados tienen una baja dispersión de propiedades acústicas, factor de gran utilidad para poder manipular dichas propiedades. Sabiendo además que están muy vinculadas al proceso de adecuación del polvo, y posterior sinterizado.

El hormigón reciclado aunque presenta una absorción acústica media/baja, es un material que desde el punto de vista técnico es interesante porque se comporta de forma prácticamente constante en el rango audible estudiado.

El modelo de Johnson-Champoux-Allard muestra que el hormigón reciclado bajo estudio, todavía no alcanza los límites de mejora del material. De esto se concluye que este material puede ser susceptible a mejorar sus propiedades acústicas con facilidad.

El ladrillo reciclado presenta unas características muy óptimas en un rango limitado de frecuencias. Sin embargo aunque esta caracterizado, no se ha determinado con exactitud a qué tipo de material y modelo responde. Por lo que esta vía queda abierta a posteriores trabajos.

Respecto a la determinación de propiedades elásticas en materiales porosos, son métodos que actualmente les falta madurez. Debido a que están muy limitados a los modelos poroelásticos de origen, y por ende son pocos los materiales que pueden estudiarse. Siendo la determinación del coeficiente de Poisson la parte más crítica.

Finalmente indicar que el ladrillo reciclado de grado 9, no presenta unas buenas propiedades mecánicas, pero sus propiedades acústicas son buenas. Siendo un material con utilidad para estudiar la porosidad cerrada.





## VI. Bibliografía principal

- [1] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppins, James V. Sanders, Fundamentals of acoustics, Ed. John Wiley & Sons, (2000, 4ª edición), Cap. 5, 6, 8, 10, 12.
- [7] F. Alton Everest, Ken C. Pohlmann, Master Handbook of acoustics, Ed. Mc Graw Hill, (2009, 50ª edición), Cap. 1, 2, 5, 6, 7, 8, 12, 13.
- [8] Thomas D. Rossing, Handbook of acoustics, Ed. Springer, (2007, 5ª edición), Cap. 3, 9, 11.
- [9] Manuel Recuero, Ingeniería acústica, Ed. Paraninfo, (1995, 1ª edición). Cap. 5, 15.
- [13] Manuel Recuero, Acústica arquitectónica, Ed. Paraninfo, (2000, 2ª edición), Cap. 1, 2.
- [14] Marshall Long, Architectural acoustics, Ed. Academic Press, (2006, 8ª edición), Cap. 7.
- [20] Trevor J. Cox, Peter D' Antonio, Acoustic absorbers and diffusers, Ed. Taylor & Francis, (2009, 2ª edición), Cap. 1, 3, 5, 6, 7, 12.
- [21] U. Ingard, Notes on sound absorption technology, Ed. Noise control foundation, (1994, 3ª edición), Cap. 3, 4.
- [23] Emmanuel Detournay, Alexander H. D. Cheng, Fundamentals of Poroelasticity, Ed. Pergamon Press, (1993), Cap. 4, Apéndice A.
- [24] Ernesto Juliá Sanchis, Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para uso en acústica arquitectónica, Ed. Universidad politécnica de Valencia, (2008), Cap. 3, 4.
- [28] R. A. Terpstra, P. P. A. C. Pex, A. H. De Vries, Ceramic Processing, Ed. Chapman & Hall, (1995, 1ª edición), Cap. 3, 4, 5.



- [29] Xavier Elías Castells, Reciclaje de residuos industriales, Ed. Díaz de Santos, (2000, 4ª edición), Cap. 2, 3.
- [30] Rubén Blanco González, Comportamiento frente a compresión de materiales cerámicos, fabricados mediante moldeo a partir de residuos de construcción, PFC Escuela politécnica superior de Zamora, (2011), Cap. 4, 5.
- [31] EN ISO 10534-2, Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia, (Primera edición 1998, Junio 2001).
- [40] Hideo Utsuno, Toshimitsu Tanaka, Takeshi Fujikawa, Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, Mechanical engineering research laboratories of Japan, Vol. 2, (1989).
- [41] Francisco José Jiménez-Espadafor, José A. Becerra Villanueva, Miguel Torres García, Elisa Carvajal Trujillo, Antonio Muñoz Blanco, Optimal design of acoustic material from tire fluff, Rev. Materials and Design, Vol. 32, (2011), Pags. 3608-3616.
- [45] Francesco Pompoli, Paolo Bonfiglio, Tecniche avanzate di caratterizzazione fisicoacustica di materiali porosi, Rev. Associazione Italiana di acústica, (2008).
- [46] Youssef Atalla, Raymond Panneton, Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements, Rev. Canadian acoustics, Vol.33, (2005).
- [51] F. Chevillotte, R. Panneton, Elastic characterization of closed cell foams from impedance tube absorption tests, Rev. Acoustical society of America, Vol. 122, (2007).
- [52] N.Antón, F. Velasco, E.Gordo, J.M. Torralba, Statistical approach to mechanical behavior of ceramic matrix composites based on Portland clinker, Rev. Ceramics International, Vol. 27, 391-399, (2001).
- [53] J. Hernández, N. Antón, J. Escuadra, M. L. Pérez-Delgado, Estudio estadístico sobre las operaciones de acondicionamiento en procesos de reciclado de las virutas de aluminio por vía metalúrgica, Congreso Nacional de Pulvimetalurgia Sevilla, (2012).