

Estimación de la absorción acústica de paneles fabricados con neumáticos reciclados



Jorge Segura-Alcaraz
José Enrique Crespo-Amorós
Ernesto Juliá-Sanchis
Antonio Nadal-Gisbert
José María Gadea-Borrell

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. Campus d'Alcoi. Plza. Ferrándiz i Carbonell, s/n – 03801 – Alcoi (Alicante). Tfno. +34 966 528428. jsegura@mcm.upv.es

Recibido: 21/03/2013 • Aceptado: 06/05/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5796>

STUDY OF THE ACOUSTIC ABSORPTION PROPERTIES OF PANELS MADE FROM GROUND TIRE RUBBERS

ABSTRACT

• The present study is conducted to characterize multilayer acoustic panels made from recycled tire rubbers (GTR's) in order to determine the sound absorption characteristics of these new materials for different applications, trying to give an answer to the environmental problem generated by this waste. This waste is currently used as modifier of asphalt, sport surfaces, molded and calendered products. The article is a first step to evaluate the sound absorption of these new multilayer panels for application in fields such as noise barriers, noise of machinery and equipment, conditioning acoustic enclosures, etc.. Basically two types of products can be obtained from the waste of the tyres: fibers and rubbers. Two types of multilayer panels of thickness 10 mm and 20 mm have been made for a three layer disposition: rubber-fibre-rubber. Then, the standing wave tube method has been used to determine the sound absorption in these materials. For rubber there are 0,7 mm and 2,2-4 mm granulometry. The results show that multilayer panels made of 2,2-4 granulometry present a higher acoustic absorption in the studied frequency range (400-3500 Hz). By increasing the thickness of the panel, the sound absorption coefficient is higher and the multilayer panel increases its sound absorption by adding more percentage of rubber.

• **Keywords:** Sound absorption, ground tire rubbers, impedance tube, multilayer materials.

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio de la absorción acústica de paneles multicapa conformados por materiales provenientes de neumáticos reciclados (GTR's), tratando de dar una repuesta al problema medioambiental generado por estos residuos. Estos materiales encuentran aplicación en aditivos para asfaltos, superficies deportivas o de parques infantiles, productos moldeados y calandrados. Del residuo de neumático se obtienen básicamente dos tipos de producto: fibras y caucho.

El artículo se enmarca como un primer paso para la evaluación de la absorción acústica de estos nuevos paneles multicapa para su aplicación en ámbitos como barreras acústicas, insonorización de maquinaria y equipos industriales, acondicionamiento acústico de recintos, etc.

Se han preparado dos tipos básicos de paneles multicapa con 10 y 20 mm de espesor. Cada panel multicapa está constituido por tres capas de diferentes espesores siempre con la disposición caucho-fibra-caucho. Para determinar el coeficiente de absorción se ha utilizado el método del tubo de impedancia acústica.

Para el caucho se ha trabajado con granulometrías de entre 0,7 y 2,2-4 mm. Los resultados demuestran que los paneles multicapa con caucho de granulometría 2,2-4 mm presentan una mayor absorción acústica dentro del rango de frecuencia estudiado (400-3500 Hz). Con el incremento de espesor y mayor porcentaje de caucho de grano grueso el panel multicapa mejora su coeficiente de absorción.

Palabras clave: Absorción del sonido, residuos de neumático reciclado, tubo de impedancia acústica, materiales multicapa.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de los residuos generados por los neumáticos usados se ha ido incrementando junto con el aumento de la población, esto ha provocado que los gobiernos de diferentes países implementen políticas para el tratamiento de estos residuos. En el caso de España se han gestionado más de 625000 toneladas durante el periodo 2006-2009 según informe SIGNUS [1], destinándose el 63% a la recuperación de materiales, el 28% a la recuperación de energía y el 9% a la reutilización.

El residuo de los neumáticos se emplea comúnmente en aditivos para asfaltos y hormigones [2, 3], suelos de superficies deportivas o de parques infantiles, productos moldeados y calandrados. Básicamente se pueden obtener dos tipos de producto del residuo de neumático: fibras y caucho.

Sukontasukkul utiliza el triturado del caucho para mejorar las propiedades acústicas de los paneles de hormigón [4] determinando el coeficiente de absorción acústica con el método del tubo de impedancia. Los resultados de este autor indican que el hormigón con caucho presenta mejores propiedades acústicas que el hormigón tradicional.

Asdrubali [5] utiliza el método del tubo de impedancia acústica para evaluar el coeficiente de absorción acústica del caucho granular. Buscando un material óptimo desde el punto de vista de la absorción acústica, estudia la influencia del tamaño de grano, concentración del aglutinante de la mezcla, espesor de las muestras (entre 20 y 65 mm) y relación de compactación.

Horoshenkov y Swift [6] determinan las propiedades acústicas de muestras de granulados de caucho compactadas con aglutinantes relacionando su comportamiento acústico con la distribución y tamaño de los poros, la tortuosidad, y la resistividad al flujo. Realizan un estudio comparativo de diferentes modelos analíticos, concluyendo que algunos modelos necesitan ajustes en los parámetros de entrada para predecir con mayor exactitud la respuesta de estos materiales.

Rodríguez Montejano [7] presenta en su tesis un estudio teórico y empírico de las características del caucho granular procedente de los neumáticos fuera de uso como material absorbente acústico. Determina las propiedades físicas propias de la estructura interna del material como la tortuosidad, porosidad y resistividad al flujo. En uno de los capítulos de este trabajo se estudia la influencia del tamaño de la partícula y del espesor de las muestras (entre 20 y 800 mm) en el coeficiente de absorción acústica.

Jiménez-Espadafor et al. [8] utilizan las fibras textiles o "fluff" provenientes del reciclado de neumáticos fuera de uso junto con aglutinantes. Se construyen tejas a partir de materiales bicapa buscando buenas características mecánicas y acústicas.

En el presente trabajo se conforman unos paneles multicapa auto-portantes combinando la fibra y el caucho provenientes del reciclado de neumáticos fuera de uso, tratando de dar una repuesta al problema medioambiental generado por estos residuos. A diferencia de los trabajos anteriores en los que los materiales se han conformado utilizando aglutinantes, la preparación de las muestras se ha realizado mediante un proceso de sinterización. Los espesores de los paneles analizados son de 10 y 20 mm puesto que uno de los objetivos es conseguir buenas propiedades acústicas y mecánicas con pequeño espesor. Esta combinación de fibras y caucho en la fabricación de paneles multicapa mediante sinterizado constituye un aspecto innovador en este campo. El trabajo se enmarca como un primer estudio sobre la absorción acústica de estos nuevos paneles multicapa para su aplicación en ámbitos como barreras acústicas, insonorización de maquinaria y equipos industriales, acondicionamiento acústico de recintos, etc.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar se ha realizado un estudio granulométrico para obtener dos tamaños de partículas de caucho, uno hasta 0,7 mm y otro entre 2,2 y 4 mm. La configuración de los paneles multicapa estudiados es tipo sándwich con dos capas exteriores de caucho y una interior de fibra. Los espesores a estudiar de los paneles se han fijado en 10 mm y 20 mm. La fabricación de los paneles multicapa se ha realizado de dos maneras diferentes, la primera sinterizando las tres capas al mismo tiempo en una sola fase y la segunda sinterizando por separado cada una de las capas en diferentes fases en una máquina de moldeo por compresión [9-12]. Las muestras se han ensayado en un tubo de impedancia acústica en el rango de frecuencias de 400 a 3500 Hz. El tubo de impedancia acústica es un tubo rígido de sección circular con una fuente de sonido en un extremo, un portamuestras en el extremo opuesto y dos micrófonos. El procedimiento para medir la absorción acústica mediante el tubo de impedancia acústica se basa en la norma 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) [13], comúnmente utilizada para el estudio de la absorción acústica en materiales porosos y fibrosos como los estudiados en el presente trabajo.

Los residuos del triturado de neumático generalmente se proporcionan con diferentes tamaños de partícula dependiendo del tamiz utilizado. Para evaluar las diferencias entre granulometrías finas y gruesas se han preparado las muestras con dos rangos de tamaños distintos: uno con partículas hasta 0,7 mm y otro mayor con partículas de entre 2,2 y 4 mm. El material ha sido suministrado por la empresa *INSA TURBO S.A.* (Aspe, España) que dispone de estos tamaños comerciales.

Es necesario un estudio granulométrico y morfológico de las partículas de caucho triturado para determinar su compo-

sición y porcentaje en volumen.

El otro producto obtenido del residuo de neumático es la fibra o "fluff" que se suministra por volumen.

2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Se realiza un análisis granulométrico del caucho obtenido del residuo de neumático, con el objetivo de determinar los tamaños de las partículas y su proporción. Para este estudio se realiza una clasificación en dos grupos según el tamaño de la partícula de caucho: hasta 0,7 mm y de 2,2-4 mm. El estudio granulométrico de las partículas provenientes del residuo de neumático se realiza con una máquina vibratoria para muestras de 300 gramos modelo CISA® SIEVE SHAKER model RP09.

La Tabla 1 muestra la serie de tamices utilizados para las muestras con partículas de 0,7 mm y de entre 2,2-4 mm.

Muestras	Tamices (μm)							
< 0,7mm	63	125	180	250	425	500	600	850
2,2-4mm	63	850	1000	1250	2000	2360	4000	8000

Tabla 1: Tamices

La Figura 1 muestra la distribución de las partículas de caucho de tamaño hasta 0,7 mm. Se observa que las partículas entre 250 y 600 μm son las más representativas.

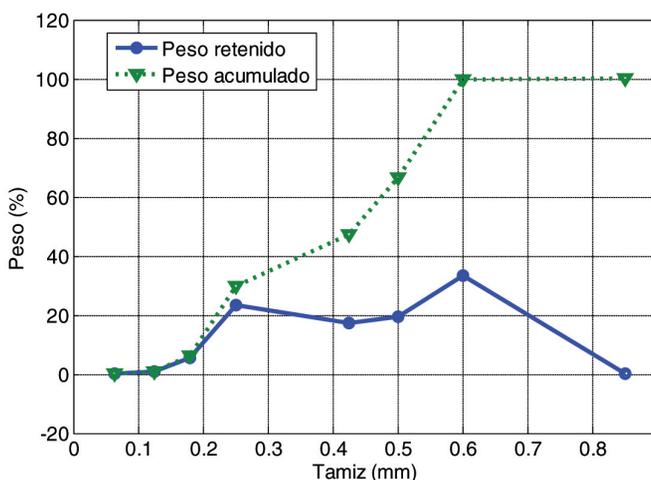


Fig. 1: Estudio de la granulometría de caucho 0,7 mm

La Figura 2 muestra la distribución de las partículas de caucho de tamaño entre 2,2 y 4 mm. Se observa que las partículas de 2360 μm prevalecen puesto que representan más del 70% en peso.

2.2. PROCESO DE SINTERIZADO

El sinterizado es un tratamiento térmico en el que se aplica presión y temperatura a un polvo o compactado metálico produciéndose difusión atómica entre las superficies de con-

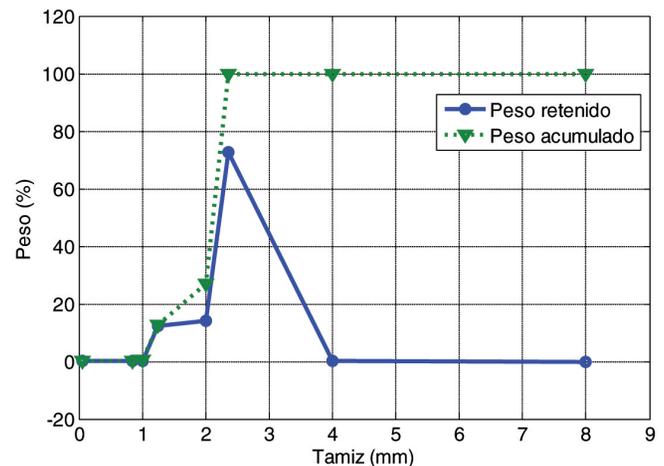


Fig. 2: Estudio de la granulometría de caucho de 2,2-4 mm

tacto de las partículas, lo que provoca su unión. El equipo de sinterizado es una prensa Robima S.A. (Valencia, España) con un plato caliente Dupra S.L. (Castalla, España). En este caso se trata de conformar varias capas de material reciclado de neumáticos. Las condiciones de sinterizado son 50 bar para la compactación en el caso del residuo de tamaño de partícula de 0,7 mm, y 80 bar por el tamaño de partícula de entre 2,2 y 4 mm, en ambos casos la temperatura es de 200° C. Estas condiciones de presión y temperatura vienen definidas a partir de distintos estudios previos [14, 15]. Con estos parámetros de fabricación se consiguen las mejores características mecánicas de forma que el panel multicapa obtenido presenta una rigidez y resistencia suficiente como para ser autoportante.

La Figura 3 muestra la morfología de estos paneles: a) caucho con granulometría de 0,7 mm, b) caucho con granulometría entre 2,2 y 4 mm, c) fibra y d) panel compactado de caucho y fibra.

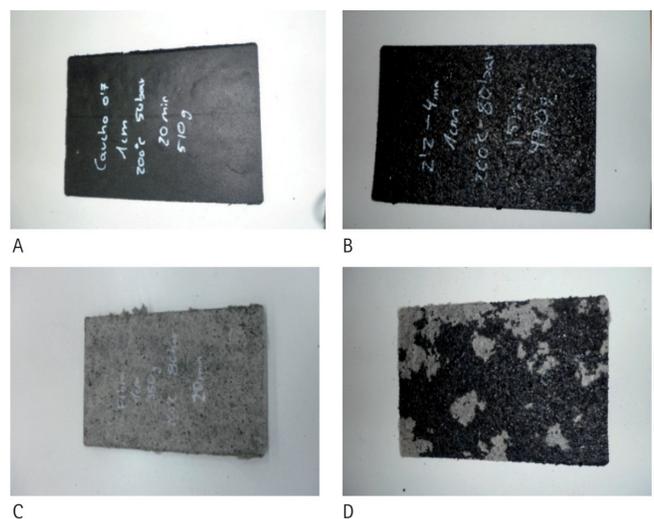


Fig. 3: Morfología de algunos paneles

A partir de estos paneles y mediante un troquel circular de 40 mm de diámetro se obtienen las muestras que se ensayan en el tubo de impedancia acústica. La Tabla 2 muestra las combinaciones de espesores en los materiales multicapa.

10 mm CAUCHO – FIBRA – CAUCHO	20 mm CAUCHO – FIBRA – CAUCHO
4 mm – 2 mm – 4 mm	8 mm – 4 mm – 8 mm
3 mm – 4 mm – 3 mm	6 mm – 8 mm – 6 mm
2 mm – 6 mm – 2 mm	4 mm – 12 mm – 4 mm

Tabla 2: Muestras multicapa

2.3. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

Básicamente hay dos métodos en laboratorio para medir el coeficiente de absorción acústica de los materiales: el método descrito en la Norma ISO 354:2003 [16], que precisa de una cámara reverberante y el descrito en la Norma ISO 10534-2, que es en el que se utiliza un tubo de impedancia acústica. Para los ensayos del coeficiente de absorción acústica se han seguido las recomendaciones de la ISO 10534-2. Hay dos parámetros en la normativa que condicionan el rango de frecuencias de medida: el diámetro del tubo y la distancia entre micrófonos. En este caso el diámetro del tubo es de 40 mm y la separación entre micrófonos es de 50 mm, lo que permite un rango aproximado de medida de entre 400 y 3100 Hz.

El método basado en el tubo de ondas estacionarias, o tubo de impedancia acústica, para medir el coeficiente de absorción en materiales, es una de las técnicas más utilizadas en la caracterización acústica de materiales porosos y fibrosos [17-21]. En general los materiales porosos y fibrosos presentan un mecanismo de absorción acústica basado en la transformación por fricción de la energía de la onda acústica incidente en calor.

Según la ISO 10534-2, el esquema del equipo para medir el coeficiente de absorción acústica se muestra en la Figura 4.

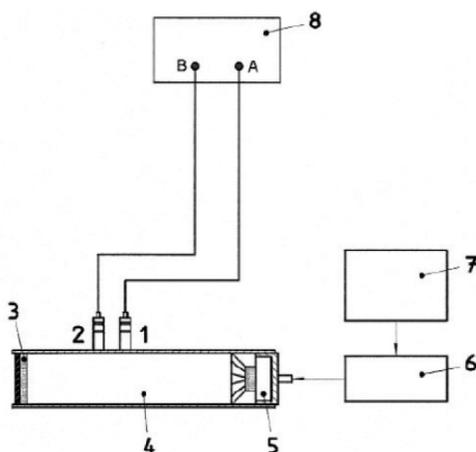


Fig 4: Esquema del montaje del tubo de impedancia acústica: ISO 10534-2

Donde: 1 y 2) Micrófonos *Bruel&Kjaer* model 4947, 3) Muestra de material de 40 mm de diámetro, 4) Tubo de ondas estacionarias, 5) Fuente de sonido, 6) Amplificador de señal, 7) Generador de señal, 8) Tarjeta de adquisición de datos NI USB 9233 y funciones de Matlab para el procesado de la señal.

La Figura 5 muestra una fotografía del tubo de impedancia acústica utilizado para los ensayos.

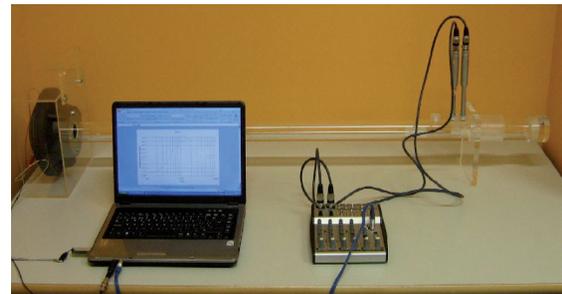


Fig. 5: Fotografía del tubo de impedancia acústica

Para comparar las propiedades absorbentes del sonido de estos nuevos materiales multicapa se obtiene la curva de absorción acústica en función de la frecuencia. El coeficiente de absorción acústica se determina con la siguiente Ecuación:

$$a = 1 - |r|^2 \tag{1}$$

r es el coeficiente de reflexión que se determina mediante la siguiente Ecuación 2:

$$r = \frac{H_p - H_i}{H_R - H_2} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1} \tag{2}$$

Donde: H_{12} es la función de transferencia compleja, H_i es la función de transferencia de la onda incidente, H_R es la función de transferencia de la onda reflejada, k_0 es el número de onda complejo, x_1 es la distancia desde la muestra hasta el micrófono más alejado.

El coeficiente de reflexión varía entre 0 y 1 en función de si el material se comporta como absorbente o reflectante acústico, respectivamente.

El coeficiente de reflexión se relaciona con la impedancia acústica específica, que es la resistencia que opone el material al paso de las ondas acústicas, mediante la ecuación 3:

$$\frac{Z}{\rho \cdot c_0} = \frac{R}{\rho \cdot c_0} + j \cdot \frac{X}{\rho \cdot c_0} = \frac{(1+r)}{(1-r)} \tag{3}$$

En un material perfectamente absorbente acústico el coeficiente de reflexión es igual a cero por lo que la impedancia acústica específica es igual a uno ($Z_0=1$). Por otro lado cuando un material es perfectamente reflectante la impedancia acústica específica sería infinita ($Z_0=\infty$).

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las siguientes gráficas muestran los coeficientes de absorción acústica obtenidos en el tubo de impedancia para cada panel multicapa ensayado. El rango de frecuencias estudiado entre 400 y 3500 Hz es función del diámetro del tubo y de la distancia entre micrófonos. En algunas gráficas puede observarse una drástica caída del coeficiente de absorción cuando se supera la frecuencia límite superior de medida.

La Figura 6 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 4-2-4, 3-4-3, 2-6-2 con granulometría de 0,7 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

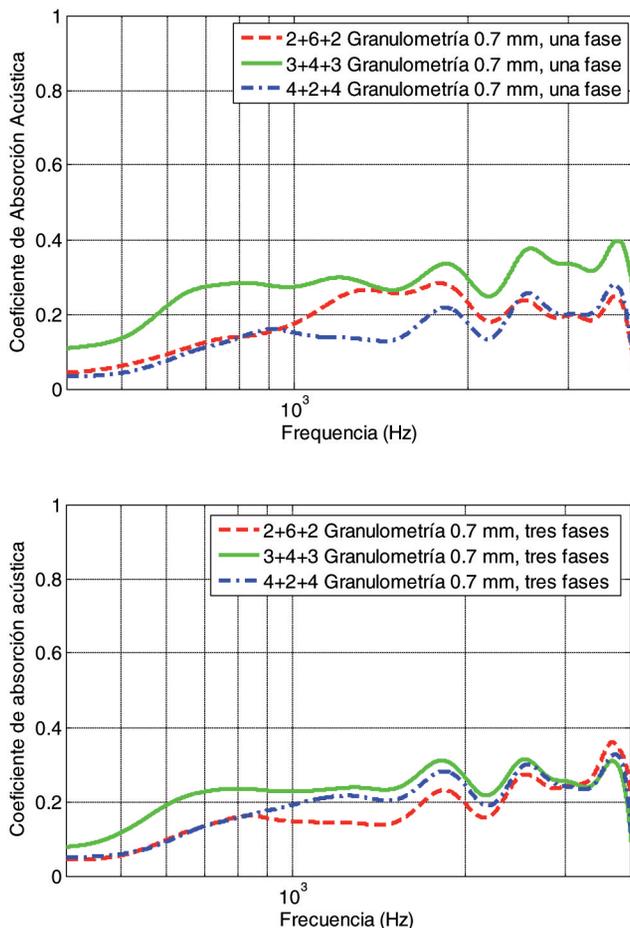


Fig. 6: Absorción acústica para multicapas 2-6-2, 3-4-3 y 4-2-4 con granulometría 0,7 mm

La Figura 7 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 4-2-4, 3-4-3, 2-6-2 con granulometría de 2,2-4 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

La Figura 8 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 8-4-8, 6-8-6, 4-12-4 con granulometría de 0,7 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

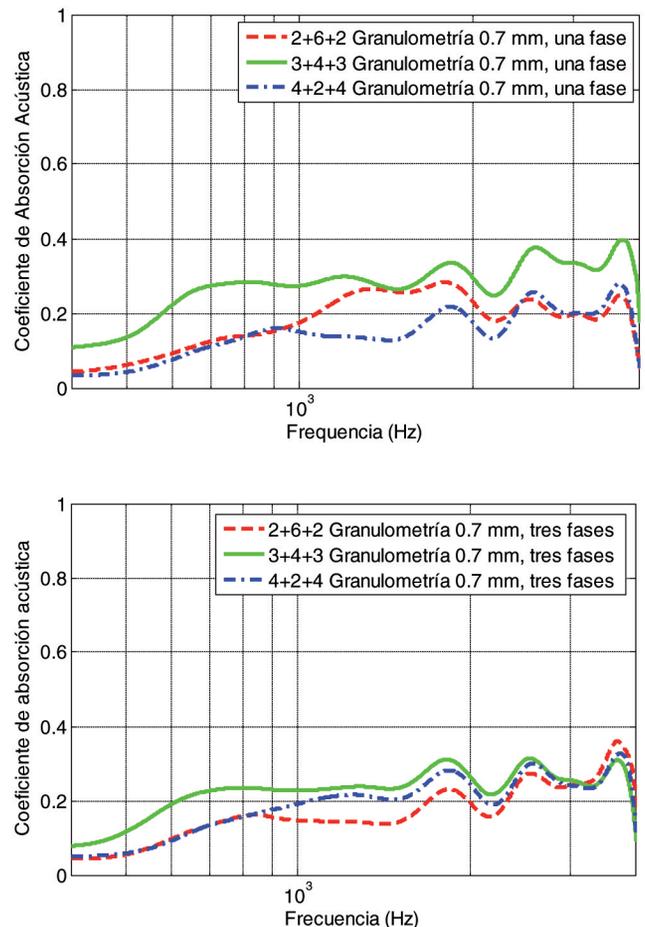


Fig. 7: Absorción acústica para multicapas 2-6-2, 3-4-3 y 4-2-4 con granulometría 2,2-4 mm

La Figura 9 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 8-4-8, 6-8-6, 4-12-4 con granulometría de 2,2-4 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

4. DISCUSIÓN

Las gráficas de absorción acústica de las combinaciones de multicapa analizadas, muestran que la absorción es menor de 0,7 para todo el rango de frecuencias estudiado. Tal como se podía predecir, los valores del coeficiente de absorción acústica son mayores en las muestras de más espesor siendo similares a los obtenidos por otros autores [5-7], a pesar de las diferencias en el proceso de conformación. Por otro lado, los multicapa con granulometría entre 2,2 y 4 mm de las partículas de caucho, presentan una mayor absorción acústica que los de granulometría de 0,7 mm.

Esto se puede explicar en base a la impedancia acústica específica de cada uno de estos materiales por separado. La figura 10 muestra las gráficas de la impedancia acústica específica del caucho y las fibras sinterizadas.

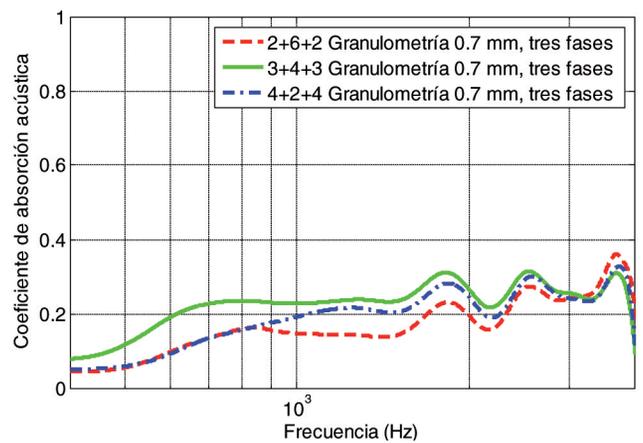
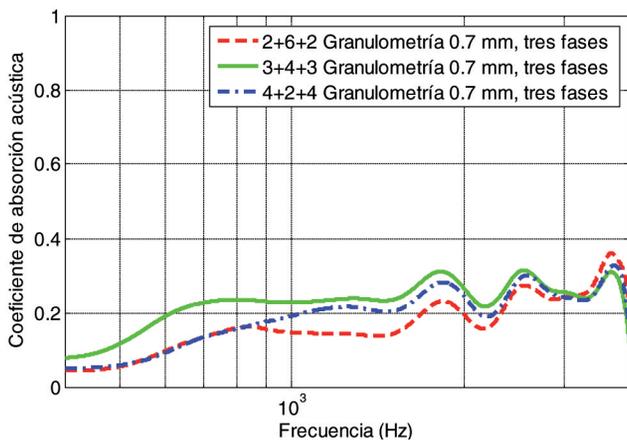
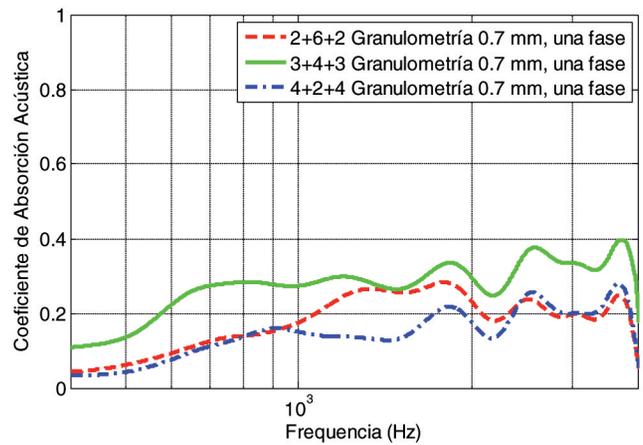
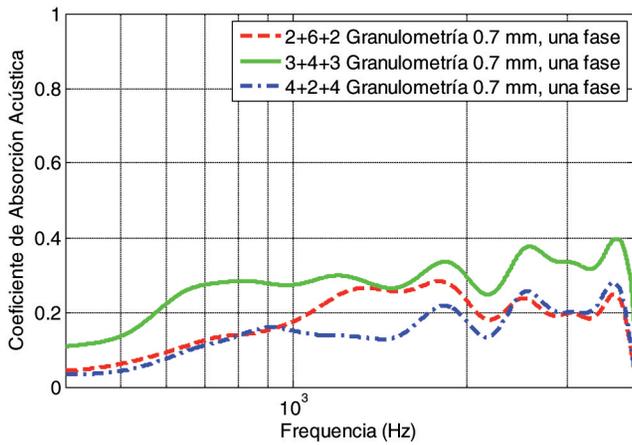


Fig. 8: Absorción acústica para multicapas 6-8-6, 8-4-8 y 4-12-4 con granulometría 0,7 mm

Fig. 9: Absorción acústica para multicapas 6-8-6, 8-4-8 y 4-12-4 con granulometría 2,2-4 mm

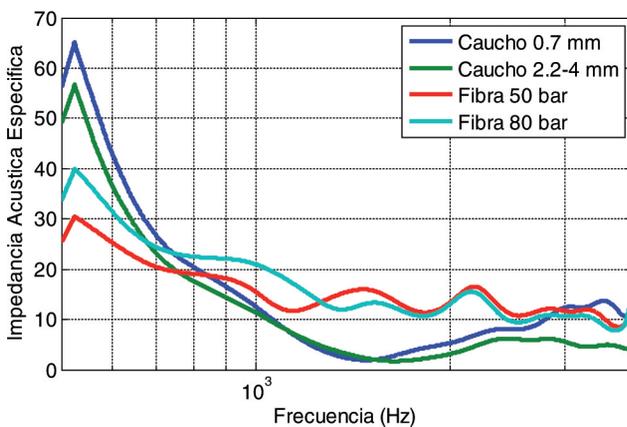


Fig. 10: Impedancia acústica específica

cho sinterizadas. La Figura 11 muestra unas fotografías de microscopía de las superficies del caucho con granulometría 2,2-4 mm y 0,7 mm, donde se aprecia que la capa de caucho de granulometría fina presenta una superficie más uniforme lo que favorece la reflexión de la onda acústica incidente.

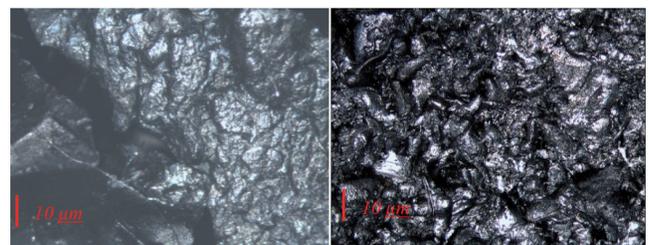


Fig. 11: Imágenes microscópicas del caucho con granulometría 2,2-4 mm (izquierda.) y 0,7 mm (derecha).

Los resultados confirman que cuanto mayor es la impedancia acústica específica menor es el coeficiente absorción del material. El caucho de granulometría hasta 0,7 mm presenta mayor impedancia que el de granulometría entre 2,2 y 4 mm, debido a la morfología superficial de las capas de caucho sinterizadas.

El proceso de conformado por sinterizado tiene una influencia directa en el acabado superficial de las muestras. El prensado a alta presión y temperatura crea unas superficies con menor porosidad y cantidad de oquedades.

En el caso de las fibras se observa que partir de 700 Hz la impedancia acústica específica es ligeramente superior a la de los cauchos. Uno de los factores que influye en estos resultados es el alto grado de compactación al que se ha sometido a estas fibras en el proceso de sinterizado.

Una de las conclusiones que cabe destacar es que no hay ninguna combinación de espesores caucho-fibra-caucho que demuestre ser óptima en todo el rango de frecuencias estudiado. Esto puede explicarse en parte, a que se ha trabajado con muestras de pequeño espesor donde las diferencias en el comportamiento absorbente no son significativas, lo que en algunos casos hace que los resultados no siempre sigan un orden intuitivo.

A la vista de los resultados el trabajo se convierte en un punto de partida de futuras líneas de estudio:

- En lo que respecta al proceso de conformación sería conveniente estudiar la influencia del proceso de sinterizado en factores como la tortuosidad y la porosidad tan importantes para el comportamiento acústico del material, buscando un modelo paramétrico que optimice la relación entre las características mecánicas y el coeficiente de absorción.
- En relación con los materiales la tendencia actual es el uso de productos reciclados y fibras naturales [22-24]. En la línea de trabajar con paneles multicapa se podrían incorporar fibras textiles recicladas, fibras de coco, fibras de kenaf, fibras de cáñamo, etc.
- La estimación de otros parámetros vibroacústicos, como el factor de transmisión y el amortiguamiento, pueden contribuir a buscar nuevas aplicaciones para este tipo de materiales, como recubrimientos de pared para la insonorización de equipos industriales o rellenos de huecos en particiones ligeras. En este sentido cabe mencionar los trabajos de algunos autores como Hongisto [25], Diaz-Cereceda [26] y Uris [27].

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación PAID-06-11, dentro del plan de I+D+i financiado por la Universitat Politècnica de València.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- SIGNUS. End of life tyre prevention plan; 2010-2013. <http://www.signus.es/Por-tals/0/Plan_Empresarial_extracto_Ingl.pdf (30/04/2012)>.
- Aiello MA, Leuzzi F, Centonze G, Maffezzoli A, "Use of steel fibers recovered from waste tires as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength". *Waste Manage* 2009, 29, p. 1960-70. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>)
- Khaloo AR, Dehestani M, Rahmatabadi P, "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles". *Waste Manage* 2008, 28, p. 2472-82. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>)

wasman.2008.01.015)

- Sukontasukkul P. "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel". *Construct Build Mater* 2009, 23, p. 1084-92. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>)
- Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. "Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs". *Acoustics Conference Paris* 2008, p. 35-40.
- Horoshenkov KV, Swift MJ. "The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates". *Applied Acoustics* 2001, 62, p. 665-690. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00069-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00069-4))
- Rodríguez Montejano RM, "Propiedades acústicas del caucho granular". Tesis Doctoral, 2003.
- Jiménez-Espadafor FJ, Becerra JA, Torres M, et al. "Optimal design of acoustic material from tire fluff". *Materials and Design*. 2011, 32, p. 3608-3616. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.024>)
- Miravete A, et al. "Materiales compuestos I y II". INO Reproducciones, Zaragoza, 2000.
- Tsai W, Miravete A. "Diseño y Análisis de Materiales Compuestos". Editorial Reverté, Barcelona, 1988.
- Hull D. "Materiales Compuestos". Editorial Reverté, Barcelona, 2003.
- Giles Carter F. and Donald E. "Materials Science & Engineering". CRC Press, First Edition, 1991.
- Standard ISO 10534-2: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method.1998.
- Crespo JE, Parres F, Nadal A. "Mechanical behaviour analysis of sintered products of natural rubber crumb rubber (NRRCR) using adhesives". *Mat.-wiss. u. Werkstofftech*. 2009, 40 No. 3, p. 1-7. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/mawe.200900429>)
- Nadal A. "Investigación del reciclado de neumáticos a requisitos elastoméricos por técnicas de termocompresión". Tesis doctoral 2004.
- Standard ISO 354:2003. Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- Attenborough K. "On the Acoustic slow wave in air filled granular media". *J. Acoust. Soc. Am*. 1987, 81, p. 93-102. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.394938>)
- Beranek L. "Noise and vibration control engineering". John Wiley & Sons; 1992.
- Dunn IP, Davern WA. Calculation of Acoustic Impedance of Multilayer Absorbers". *Applied Acoustics* 1986, 19, p. 321-334.(doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(86\)90044-7](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(86)90044-7))
- Song BH, Bolton JS. "A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials". *J. Acoust. Soc. Am*. 2000, 107 (3), p. 1131-1152. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.428404>)
- Horoshenkov KV et al. "Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid-frame porous media (round-robin tests)". *J. Acoust. Soc. Am*. 2007, 122, p. 345-353. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.2739806>)
- Asdrubali, F., "Survey on the Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control," *Proceedings of Euronoise*, 2006, Tampere Finland.
- Kazragis A, Gailius A, Jukneviute A., "Thermal and Acoustical Insulating Materials Containing Mineral and Polymeric Binders with Celluloses Fillers". *Material Sciences* 2002, 8 No. 2, p. 193-195.
- Ramis J et al, "New absorbent material acoustic based on Kenaff fibre". *Materiales de Construcción* 2010, 60, p. 133-143. (doi: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.201050809>)
- Hongisto V, "Sound insulation of double panels-comparison of existing prediction models". *Acta Acustica united with Acustica* 2006, 92, p. 61-78.
- Diaz-Cereceda C, Poblet-Puig J, Rodríguez-Ferran A. "The finite layer method for modelling the sound transmission through double walls". *Journal of sound and Vibration* 2012, 331, p. 4884-4900. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.06.001>)
- Uris A et al. "Sound insulation of double frame partitions with an internal gypsum board layer". *Applied Acoustics* 2006, 67, p. 918-925. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.11.006>)