

Reciclado de neumáticos usados para su utilización como materiales acústicos (*)



ROSA M.^a RODRÍGUEZ MONTEJANO
Instituto de Acústica-CSIC

SUMARIO

En la actualidad, el ruido es un agente contaminante más que deteriora el medio ambiente y afecta seriamente la calidad de vida, lo que ha obligado a la autoridades competentes a tomar las medidas oportunas al respecto. Entre tales medios cabe destacar el empleo de barreras acústicas que hoy día experimentan un gran auge. Aunque la oferta de este tipo de dispositivos es muy amplia, no es fácil encontrar barreras acústicas que, además de cumplir su cometido principal, utilicen como materia prima materiales contaminantes cuya acumulación plantea también serios problemas. Para resolver o paliar este problema se estudia, en este trabajo, la posibilidad de utilizar el caucho procedente de los neumáticos usados para la implementación de materiales absorbentes acústicos, con una inmediata aplicación al caso concreto de las barreras acústicas.

Palabras clave: Control de ruido, reciclado de neumáticos, absorbentes acústicos.

INTRODUCCIÓN

En el presente siglo, la evolución del ambiente acústico ha seguido una tendencia clara y continua hacia niveles sonoros más elevados en todo el espectro de frecuencias audible para el ser humano. Esto ha traído como consecuencia la necesidad de adoptar medidas correctoras al respecto, dada la gravedad del problema en multitud de situaciones y los riesgos para la salud que han puesto de manifiesto infinidad de estudios realizados sobre personas afectadas por la contaminación acústica. A este respecto cabe recordar que, según la Organización Mundial de la Salud, ésta es un estado de bienestar físico, mental y social, y no la mera ausen-

(*) Este artículo es el resumen del trabajo presentado a la Fundación MAPFRE como resultado final de la investigación desarrollada durante 1997 a raíz de una beca concedida en su convocatoria 1996/1997.

cia de enfermedades, lo que corrobora la gran atención que ha de prestarse a la lucha contra el ruido.

El ruido es un agente contaminante más que deteriora el medio ambiente y la calidad de vida, y como tal ha de considerarse en las diferentes circunstancias que afectan al ser humano. Es de todos conocida la normativa existente para el control del ruido y la protección de los trabajadores en sus puestos de trabajo, así como las normativas dictadas por las respectivas instancias ministeriales sobre el confort acústico de las viviendas, además del control de los niveles máximos de ruido en los lugares de recreo y esparcimiento. También existen normativas y reglamentaciones sobre el ruido máximo permisible a los automóviles, pero el número de los mismos que circulan por nuestras calles y carreteras se ha incrementado de tal forma que los niveles de ruido ambiente en las zonas residenciales sobrepasan con mucho los 65 dBA, valor límite generalmente aceptado por las más diversas organizaciones como máximo tolerable.

Ante tal situación se hace necesario disponer de soluciones que permitan paliar el problema del ruido ambiental urbano. Entre las posibles soluciones cabe destacar la disposición de barreras acústicas, interpuestas entre la fuente de ruido y el receptor, y es precisamente este tipo de dispositivos los que se consideran en este trabajo, realizado en el Departamento de Acústica Ambiental del Instituto de Acústica del CSIC. Este Departamento ha venido desarrollando, durante los últimos cinco años, una exhaustiva labor investigadora en torno al estudio de pantallas acústicas anti-ruido a través de varios proyectos de investigación, así como múltiples ensayos destinados a la caracterización acústica de este tipo de dispositivos (1).

En los proyectos de investigación se incidió de manera especial, en una primera fase, en los procesos de difracción acústica que tienen lugar en estos dispositivos, así como en la forma, constitución y dimensiones que rentabilizan su uso ante las más diversas situaciones, ya sean topográficas o constitutivas de los suelos donde son instalados. Un segundo aspecto se centra en la búsqueda de un índice global que tenga en cuenta las propiedades extrínsecas de las pantallas anti-ruido; resultados que quedan reflejados en numerosas publicaciones, en revistas nacionales e internacionales, así como en comunicaciones a congresos nacionales e internacionales. Por último, el tercer

aspecto contemplado se centra en el estudio de materiales acústicos alternativos a los empleados habitualmente en pantallas acústicas de altas prestaciones. En este sentido se consideró la posibilidad de aprovechar materiales reciclados de productos contaminantes del medio ambiente, como es el caucho procedente de los neumáticos de desecho. La reutilización de este material constituye un tema fundamental, de gran importancia y repercusión, ya que contribuye a la eliminación de un residuo cuyas características de contaminación medioambiental se pueden calificar de muy graves.

Problemática de los neumáticos usados en la Unión Europea

En los países de la Unión Europea se producen anualmente en torno a dos millones de toneladas de neumáticos usados. La figura 1 refleja la producción anual, por países, de neumáticos usados, encontrándose los datos normalizados respecto a la superficie del país en la figura 2. Se puede observar que de los dos millones de toneladas totales de neumáticos usados, España ocupa un puesto intermedio en el conjunto de países de la UE, generando alrededor de 160.000 Tm/año (2).

FIGURA 1. Producción anual de neumáticos usados en Europa.

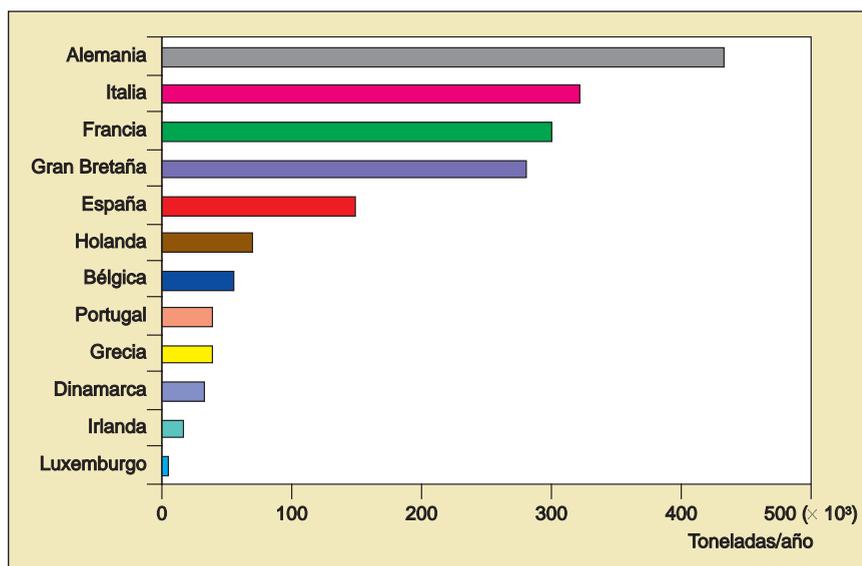
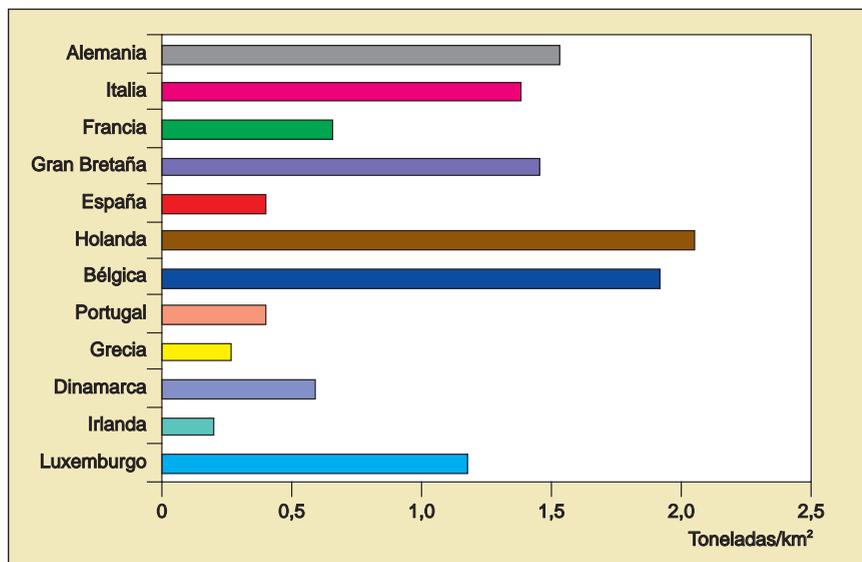


FIGURA 2. Producción anual de neumáticos usados por unidad de superficie.



Si se comparan estos datos con la producción anual de neumáticos usados por unidad de superficie, se observa que en países como Holanda, Bélgica y Alemania, el problema de la acumulación de neumáticos de desecho es especialmente grave, y es precisamente en estos países donde la legislación sobre el tratamiento de residuos es más restrictiva. En este sentido, España vuelve a ocupar un puesto intermedio, depositándose alrededor de 400.000 kg de neumáticos de desecho por kilómetro cuadrado.

En la actualidad, en general, es mínimo al porcentaje de neumáticos de desecho cuyo destino es el reciclado. Tal y como se muestra en la figura 3, tan sólo un 5 por 100 del total de neumáticos usados es de nuevo reutilizado como materia prima. A pesar de las aplicaciones directas (defensas de muelles o embarcaciones, vallas de jardines y circuitos de automóviles, etc.), de su utilización como combustible, principalmente en cementeras, o de la posibilidad de recauchutado, casi un 50 por 100 de los neumáticos es almacenado en vertederos hoy día (3, 4).

Ante la situación actual está prevista una acumulación total de neumáticos de desecho, para el año 2000 en la Unión Europea, de 2,5 millones de toneladas. La misma Unión Europea apuesta por una política de prevención que, para dicho año, permita evitar recurrir a las técnicas tradicionales de eliminación, como son: la incineración sin obtención de energía, en la



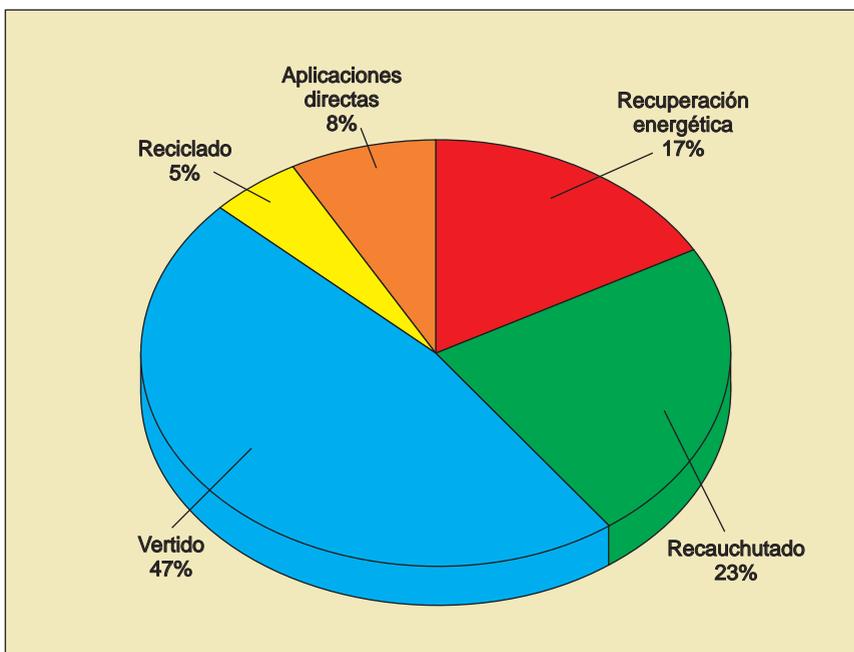
En muchos países el ruido del tráfico está considerado como una de las más importantes fuentes de contaminación ambiental.

mayoría de los casos de forma descontrolada; el depósito en vertederos, y, sobre todo, la descarga en zonas que puedan ver alterado su equilibrio natural.

Este trabajo intenta contribuir a la búsqueda de soluciones al problema del elevado porcentaje de neumáticos que son actualmente vertidos, ya que esos neumáticos, que inevitablemen-

te han llegado al final de su vida útil, todavía puedan ser aprovechados como materia prima para nuevos productos, entre los que puede considerarse la fabricación de materiales absorbentes acústicos, con una inmediata aplicación en la protección contra el ruido de tráfico mediante barreras acústicas.

FIGURA 3. Distribución porcentual, en Europa, del destino de neumáticos desecho.



Ruido de tráfico

Para conseguir elegir el material absorbente acústico adecuado para combatir cada problema de ruido es imprescindible conocer las características de la fuente sonora origen del problema. En nuestro caso, la fuente de ruido en cuestión es el ruido del tráfico rodado. En efecto, en muchos países el ruido del tráfico está considerado como una de las más importantes fuentes de contaminación ambiental, y es cada vez mayor el número de habitantes de las grandes ciudades que considera el ruido del tráfico como una grave molestia, tal y como demuestran innumerables encuestas.

Las principales contribuciones al ruido del tráfico proceden del motor de los automóviles, del contacto entre el pavimento y los neumáticos, así como de las turbulencias aerodinámicas. Para el tráfico urbano, a bajas velocidades, el motor es la principal fuente de ruido, mientras que a velocidades de circulación altas el ruido

proviene fundamentalmente del contacto pavimento neumático. Además, hay que tener en cuenta el efecto de los agentes atmosféricos sobre la propagación del sonido, como son la lluvia o nieve, así como la alteración por gradientes de temperatura, vientos, etc. Así pues, es fundamental conocer las características del ruido, especialmente su espectro en frecuencia, ya que las propiedades acústicas de los dispositivos reductores de ruido también dependen de la frecuencia, y si no son adecuadas al tipo de ruido que se desee combatir, el fracaso está garantizado.

La norma UNE EN 135601 (5) permite evaluar el comportamiento acústico de los dispositivos anti-ruido diseñados para reducir el ruido que genera el tráfico en las inmediaciones de las vías de circulación, y concretamente, en su parte tercera, define el espectro normalizado de ruido de tráfico que reproduce la figura 4.

A la vista de este espectro de ruido se puede determinar el material absorbente acústico más idóneo, que será aquel cuya capacidad de absorción se dé precisamente en el rango de frecuencia en que el ruido de tráfico presenta su mayor nivel de emisión.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, una de las aplicaciones más importantes del caucho de los neumáticos de desecho es la de componente en el alquitrán o be-

El ruido es un agente contaminante más que deteriora el medio ambiente y la calidad de vida, y como tal ha de considerarse en las diferentes circunstancias que afectan al ser humano.

tún para la construcción de carreteras. Este tipo de firme pertenece a la categoría de los porosos, y ha demostrado presentar notables ventajas en la reducción del nivel sonoro. La inclusión de caucho en estos pavimentos es capaz de reducir el nivel sonoro en 3,5 dBA, frente a los de hormigón fino-asfalto, y en 5,5 dBA, frente a los de hormigón, para velocidades de los vehículos de 100 km/h. Los buenos resultados que, como reductor de ruido, presenta este material, ha propiciado su estudio en profundidad como absorbente acústico

alternativo a los existentes actualmente.

En España ya existen tramos de carreteras cuyo asfalto contiene caucho en cierta proporción; sin embargo, el empleo de caucho triturado (denominado granza de caucho), como material absorbente acústico de amplio espectro, puede considerarse algo completamente innovador.

Las primeras investigaciones, realizadas a este respecto en el Instituto de Acústica y plasmadas en una patente (6), demostraron la idoneidad de este material como absorbente acústico. Se trata de un material granular, a diferencia de la mayoría de los empleados normalmente como absorbentes acústicos, que son fibrosos, por lo que los estudios realizados hasta la fecha son escasos o inexistentes, y las únicas referencias encontradas se encuadran en el ámbito de los efectos del suelo en la propagación del sonido en exteriores, o en estudios geofísicos sobre la constitución del suelo.

Seguidamente se ha planteado el estudio del máximo aprovechamiento de sus posibilidades como material absorbente. La mejora del producto implica encontrar una acertada combinación de granulometría y espesor, así como estudiar el efecto del uso de aditivos aglutinantes que faciliten su manipulación, sin que por ello disminuyan sus propiedades de absorción.

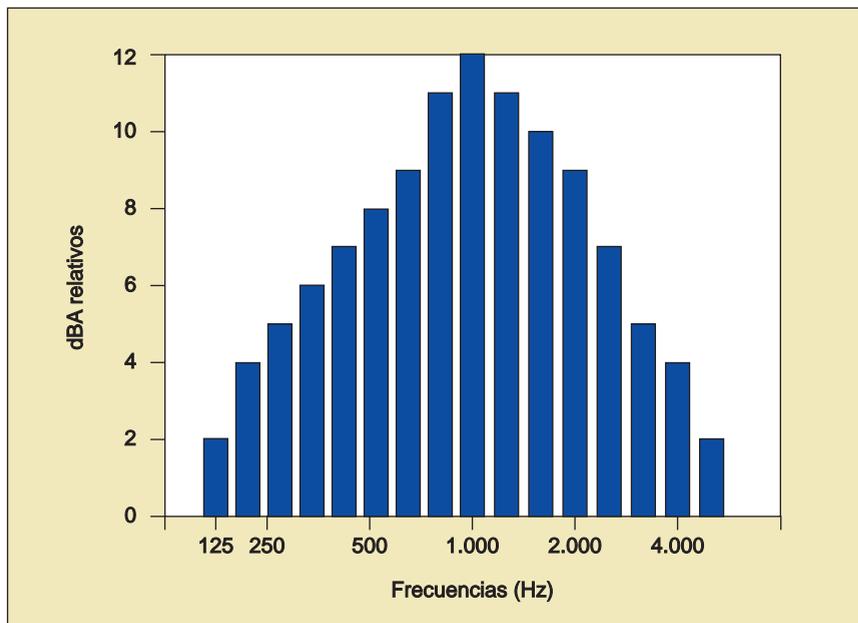
En principio, el estudio y desarrollo de un material acústico puede abordarse por medio de dos procedimientos:

1. El primero, puramente **experimental**, se basa en el análisis repetitivo del coeficiente de absorción acústica de distintas probetas de granza de diferente granulometría y espesor. Las innumerables posibilidades que se pueden considerar, al objeto de encontrar tendencias o conclusiones, lo convierten en un trabajo arduo y tedioso.

2. Como alternativa, y al mismo tiempo que se realizan algunos ensayos experimentales preliminares, existe la posibilidad de buscar **formulaciones teóricas** que ofrezcan una buena correlación con los resultados del coeficiente de absorción obtenidos de la experimentación (7). El objetivo es reducir el número de ensayos a realizar y poder desarrollar modelos que permitan determinar el material más adecuado para cada aplicación, además de comprender el proceso físico involucrado.

El método elegido en este trabajo es el segundo de los expuestos, dado que ofrece mejores ventajas en todos los aspectos.

FIGURA 4. Espectro normalizado de ruido de tráfico en dBA.



Estudio teórico

Para el fin perseguido en este trabajo, la magnitud fundamental a determinar es el coeficiente de absorción acústica, que viene dado por el cociente entre la energía no reflejada y la energía incidente sobre el material considerado. Se trata, por tanto, de una magnitud adimensional.

La estructura de los materiales porosos, acústicamente absorbentes, consiste, fundamentalmente, en un esqueleto que puede ser rígido o elástico, constituido por partículas del propio material, en contacto mutuo, que dejan intersticios entre sí, ocupados por un fluido en el que se propaga la onda acústica. Todos los modelos matemáticos desarrollados hasta la fecha, que describen la propagación de una onda sonora en un material poroso, proceden fundamentalmente de los trabajos de Zwikker y Kosten (8) y de simplificaciones de las investigaciones realizadas por Biot (9). Estos modelos parten de asumir que la degradación de la energía acústica se debe a efectos térmicos y viscosos que tienen lugar en el interior de los poros. A través de una densidad $\rho(\omega)$, y compresibilidad $K(\omega)$ (cuantificadas por números complejos) del fluido contenido en los poros se obtiene la constante de propagación

$$k(\omega) = j\omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}}$$

y la impedancia acústica característica,

$$Z_c = \frac{1}{\phi} \sqrt{\rho(\omega) K(\omega)}$$

(siendo ϕ la porosidad), variables que definen conjuntamente la impedancia en la superficie de la muestra

$$Z = -jZ_c \cot(kd),$$

expresión válida para incidencia perpendicular de la onda sonora, siendo d el espesor de la misma. El coeficiente de absorción α se formula de forma inmediata a partir de la expresión

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right|^2$$

Este enfoque teórico, con una visión microestructural del problema, requiere del conocimiento de una serie de propiedades físico-estructurales inherentes a los materiales. Estas propiedades son: **resistividad al flujo de aire** σ , **porosidad** ϕ y **tortuosidad** T , que son, a su vez, función de

la granulometría y homogeneidad del material.

El primero de los modelos matemáticos empleados fue el desarrollado por Delany y Bazley (10). Se trata de un modelo que proporciona buenos resultados para materiales fibrosos, pero su aplicación a materiales granulares queda bastante limitada. Este modelo basa su formulación únicamente en una de las propiedades citadas: la resistividad al flujo de aire σ , quedando limitado su empleo al rango comprendido entre $10^{-2} (f\sigma)^{-2}$ y 1.000 , siendo f la frecuencia en Hz, y σ , la mencionada resistividad del material, en unidades $cgs (g s^{-1} cm^{-3})$. Fuera de este rango, los valores reales del coeficiente de absorción se alejan considerablemente de las predicciones del modelo.

Hasta la aparición de trabajos posteriores al de Delany y Bazley bastaba con conocer este parámetro —resistividad al flujo del aire— para estimar la absorción de un material poroso. Sin embargo, dichos trabajos posteriores pusieron de manifiesto la existencia de factores adicionales que condicionan el comportamiento acústico del material. A través de la revisión bibliográfica realizada se concluye que, entre los modelos actualmente en uso, los destinados al estudio de la absorción acústica de suelos son los más idóneos a nuestro caso. Estos modelos amplían su rango de utilidad con respecto al anteriormente mencionado modelo de Delany y Bazley, ajustándose, por tanto,

mejor a los valores experimentales obtenidos del coeficiente de absorción. Sin embargo, tienen el inconveniente de requerir el conocimiento de nuevas propiedades asociadas a la constitución física del material, las anteriormente citadas: porosidad y tortuosidad, además de incluir parámetros de ajuste empíricos necesarios para obtener un buen ajuste de las curvas teóricas con las experimentales.

Finalmente, el modelo empleado ha sido desarrollado a partir del trabajo de Johnson (11). Por medio de esta simulación numérica, y actuando sobre dichos parámetros, se pueden diseñar los materiales adecuados para cada uso concreto, teniendo siempre presente el compromiso coste-eficacia.

Para el empleo de los modelos ha sido necesaria la medida de las propiedades intrínsecas de la estructura del material, siendo imprescindible la puesta en marcha de un laboratorio específico, diseñado y acondicionado para este fin (12). No existen precedentes en España en este tipo de instalaciones, y su ejecución será de gran ayuda para la experimentación y el diseño de nuevos materiales absorbentes en lo sucesivo.

Estudio experimental

Como complemento indispensable del estudio teórico realizado se ha llevado a cabo el correspondiente estudio



Las principales contribuciones al ruido del tráfico proceden del motor de los automóviles y del contacto entre el pavimento y los neumáticos.

dio experimental, que permite distinguir, entre los diferentes modelos teóricos considerados, el que mejor se ajusta al material en cuestión. Las magnitudes necesarias que debemos conocer son, fundamentalmente, las siguientes: coeficiente de absorción acústica α , resistividad al flujo de aire σ , porosidad ϕ y tortuosidad T . Seguidamente se resumen las diferentes técnicas de medida de cada una, describiendo con mayor detenimiento las elegidas en este trabajo.

Básicamente, existen dos tipos de ensayos en laboratorio que tienen como objetivo la determinación del **coeficiente de absorción acústica** de un material. El primero, denominado «Método del tubo de impedancias, o tubo de ondas estacionarias», se basa en la creación de un campo acústico de ondas planas, estacionarias, dentro de un tubo de pequeñas dimensiones, en el que se superponen una onda que incide de forma perpendicular sobre la muestra del material a analizar y la correspondiente onda reflejada, y cuyo esquema se presenta en la figura 5. El segundo método, normalizado según ISO 354-1985 (13), permite obtener la absorción acústica a partir de mediciones del tiempo de reverberación en una cámara reverberante y, a diferencia del primero, determina el coeficiente de absorción acústica, creando un campo acústico difuso que incide de forma aleatoria sobre la muestra, con la misma probabilidad para todos los ángulos de incidencia. Los ensayos en tubo de Kundt cuentan con la ventaja de requerir muestras de pequeño tamaño y fáciles de manejar, siendo válidos en una primera explotación del problema; no obstante, este tipo de pruebas debe complementarse con ensayos sobre muestras de



En la Unión Europea se producen anualmente dos millones de toneladas de neumáticos usados que en su mayor parte van a parar a vertederos incontrolados.

10 a 12 m², realizados en cámara reverberante, cuya principal ventaja reside en que permiten predecir el comportamiento real del material instalado *in situ*.

En cuanto a la primera de las propiedades estructurales, la resistividad al flujo de aire σ , fundamentalmente, el método de medición consiste en impulsar a una corriente de aire a través de una muestra del material a analizar y medir la diferencia de presión a ambos lados de la muestra. La determinación de esta magnitud se encuentra normalizada en la norma

EN 29053:1993 (14), obteniéndose de la expresión

$$\sigma = \frac{\Delta P}{q_v} \cdot \frac{A}{d},$$

siendo sus unidades

$$\text{Pa} \cdot \text{s/m}^2,$$

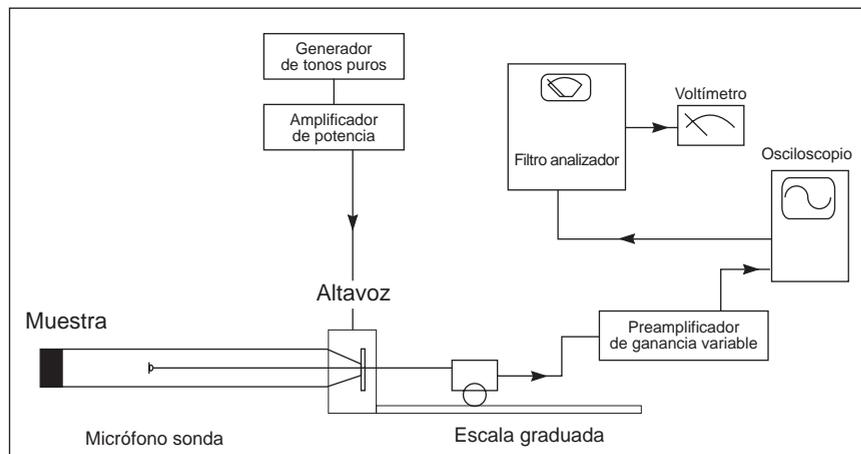
o bien MKS rays/m, donde ΔP es la presión diferencial; q_v , el caudal de aire, y A y d , las dimensiones, sección y altura, respectivamente, de la muestra. En dicha norma se describen dos métodos para su medición, siendo la diferencia entre ambos el hecho de que la corriente de aire puede ser continua o alterna. El sistema utilizado en este trabajo emplea un flujo de aire continuo.

La segunda de las magnitudes de interés: **porosidad**, cociente entre el volumen de aire, V_a , contenido en las cavidades del material y el volumen total, V_T , que ocupa la muestra,

$$\phi = \frac{V_a}{V_T},$$

puede determinarse introduciendo en un recipiente aforado un volumen conocido de grana de caucho. A continuación se enrasa con agua hasta que se completa el volumen requerido. Conociendo la cantidad de agua utilizada se establece el cociente de esta cantidad con el volumen total de la mezcla y se obtiene la porosidad

FIGURA 5. Esquema del montaje del ensayo de absorción en tubo de Kundt.



del material de forma inmediata. Hay que tener la precaución de evitar la formación de burbujas de aire con los intersticios del esqueleto del material, que daría lugar a valores de porosidad erróneos. Para ello se ha realizado en todos los casos un ligero vacío en el conjunto, en una campana neumática. Esta técnica de medida de la porosidad se denomina «impregnación al vacío».

La tercera de las magnitudes estructurales: **tortuosidad** T , está directamente relacionada con la forma de los poros y la variación de su sección a lo largo de su longitud, así como con la existencia de ramificaciones colaterales. Su determinación se ha llevado a cabo considerando la analogía existente entre propiedades eléctricas y acústicas de los materiales. Básicamente, el método consiste en asimilar la conducción eléctrica de la mezcla del material inmerso en un fluido conductor con la corriente de aire capaz de fluir a través de dicho material. La medición requiere disponer en un recipiente cierta cantidad del material en cuestión entre dos placas metálicas (electrodos). Para que exista paso de corriente por el material a analizar se le añade una disolución conductora. El experimento se realiza haciendo pasar una corriente a través del electrolito y midiendo la diferencia de potencial (en voltios) entre las dos placas de cobre y la corriente eléctrica (en amperios) que atraviesa el material. El resultado de esta medición se compara con la correspondiente al electrolito en ausencia de material, obteniéndose la tortuosidad buscada de la siguiente expresión:

$$T = \frac{\rho}{\rho^*} \cdot \phi,$$

siendo ϕ la porosidad obtenida con anterioridad; ρ^* y ρ , las resistividades eléctricas medidas para el electrolito con y sin material poroso, respectivamente, que son, a su vez, función de la resistencia eléctrica R , de las superficies de las placas S , y de la distancia entre las mismas l , según las fórmulas:

$$\rho^* = R^* \cdot \frac{S}{l}, \quad \rho = R \cdot \frac{S}{l}$$

Resultados experimentales

Descripción de las muestras

En este trabajo se ha empleado caucho procedente de neumáticos usados, que, según el grado de trituración al que es sometido, se pueden obtener muestras de diferente granu-

lometría. Los tipos de granza de partida fueron tres:

- 1.º Una heterogénea, compuesta por partículas de tamaño comprendido entre 1 y 7 mm.
- 2.º Otra, también heterogénea, con tamaño de partículas comprendido entre 1 y 3 mm.
- 3.º Una granza de granulometría, homogénea, con partículas de tamaño en torno a 1,4 mm, mucho más fina que las anteriores.

Estas muestras se aprecian en la figura 6. De estas granzas, y a través de una cuidadosa criba, se obtuvieron otras muestras con granulometrías homogéneas.

Los materiales empleados normalmente como absorbentes en pantallas acústicas –lanas y fibras minerales y de vidrio con densidades que varían entre 40 y 200 kg/m³ tienen, según la bibliografía consultada, valores de resistividad al flujo de aire ρ comprendidos entre 7.000 y 100.000 MKS rays/m, que son muy superiores a los obtenidos con la granza de caucho. Asimismo, los materiales fibrosos citados son de gran porosidad, superando en la mayoría de los casos el 90 por 100. La gran diferencia entre el material granular estudiado aquí y los materiales fibrosos radica en que, aunque éstos tienen una porosidad muy superior, son materia-

FIGURA 6. Muestras de granzas de caucho de diferentes granulometrías: A) tamaño de partículas de 1 a 7 mm; B) tamaño de partículas de 1 a 3 mm, y C) tamaño de partículas de 1,4 mm.



Parámetros estructurales

En todas las muestras descritas se midieron la resistividad al flujo de aire, la porosidad y la tortuosidad. Los resultados aparecen conjuntamente en la tabla 1. La primera de estas magnitudes, para este tipo de material con los tamaños de grano elegidos, resultó variar entre 1.000 y 12.000 MKS rays/m. La porosidad en todos los casos oscila alrededor del 50 por 100, y la tortuosidad varía entre 1 y 2,5, creciendo según disminuye el tamaño del grano. A partir de estos datos, y con una cuidadosa selección de los mismos, se procede al cálculo numérico del coeficiente de absorción acústica en función de la frecuencia, utilizando los algoritmos matemáticos desarrollados con este propósito.

les altamente resistentes al flujo de aire. Sin embargo, los estudios realizados que se muestran en el siguiente apartado demuestran que la granza de caucho, a pesar de su reducida resistencia al flujo de aire, pueden presentar elevados coeficientes de absorción acústica aun en bajas frecuencias.

Coefficiente de absorción acústica

Para los ensayos realizados en tubo de Kundt se emplean muestras de pequeño tamaño (probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y espesores de 5 y 10 cm). En estos ensayos se obtiene como resultado final el espectro de absorción de las probetas en las frecuencias de interés, comprendidas siempre entre 100 y 5.000 Hz.

TABLA 1. Resultados de las medidas de los parámetros estructurales para los tipos de granza indicadas.

Muestra (mm)	Resistividad al flujo de aire (MKS rays/m)	Porosidad (%)	Tortuosidad
1 a 7	1.400	48,40	1,5
1 a 3	3.000	54,10	1,6
1,4	11.200	44,30	2,5

La figura 7 reproduce los resultados obtenidos al ensayar las muestras de tamaños de grano comprendidos entre 1 y 7 mm y 1 y 3 mm, y la muestra de 1,4 mm de granulometría.

La primera conclusión que se puede realizar de la observación de estas gráficas es que la forma de las curvas se aleja en principio de las conocidas para materiales absorbentes acústicos porosos de esqueleto rígido empleados habitualmente en barreras acústicas. Las fibras y lanas de vidrio o minerales utilizados habitualmente como material de relleno en barreras presentan una curva de absorción que no contiene la serie de máximos y mínimos que se aprecian en éstos, sino que presentan un comportamiento más uniforme, aumentando continuamente el coeficiente de absorción acústica al aumentar la frecuencia. El comportamiento de la granza estudiada se asemeja, en principio, a los denominados materiales absorbentes acústicos de esqueleto flexible, que presentan resonancias de absorción a frecuencias altas y medias. La diferencia de comportamiento de cada muestra, en función de su granulometría, es un factor importante a destacar. A medida que aumenta el tamaño de grano se observa que el efecto de resonancia se acentúa, acusándose más la diferencia entre máximos y mínimos de absorción. Se observa, además, que disminuye la absorción acústica del material en bajas frecuencias. Este comportamiento está íntimamente ligado con la estructura interna del material. El tamaño de grano condiciona, a su vez, el tamaño de las cavidades y, por tanto, la degradación de energía acústica que tiene lugar en su interior. Esto explica las diferencias de comportamiento entre las muestras analizadas.

De los resultados obtenidos con muestra de tamaño de grano homogéneo cabe destacar que no aportan

mejoras sustanciales respecto a las heterogéneas, en cuanto a la absorción acústica, y, dada la complicación que supone homogeneizar el tamaño de grano, se puede concluir que este tipo de muestras no son interesantes con fines prácticos.

Otro aspecto a destacar es el desplazamiento del primer máximo de absorción hacia frecuencias inferiores, aproximadamente en una octava, cuando se duplica el espesor de la muestra, tal y como refleja la figura 8. El espesor es uno de los factores que permiten adaptar la curva de absorción al espectro de frecuencia de la fuente de ruido para un material dado.

Además de tratar la granza de caucho como material acústico absorbente, alternativo a los actualmente utilizados en el interior de barreras, se ha considerado la posibilidad de emplear aditivos que sean capaces de aglomerar el caucho y conformar una estructura autoportante. Todas las probetas, cuya apariencia se aprecia en la figura 9, fueron elaboradas en los laboratorios del Instituto de Acústica, y son de forma cilíndrica, con un diámetro de 10 cm y un espesor también de 10 cm, dimensiones necesarias para la medida del coeficiente de absorción en tubo de Kundt. Los resultados obtenidos con este tipo de probetas demuestran una

FIGURA 8. Coeficiente de absorción acústica en función de la frecuencia para la granza de tamaño 1 a 3 mm, con espesores de muestra: 2,5 cm (—), 5 cm (—) y 10 cm (—).

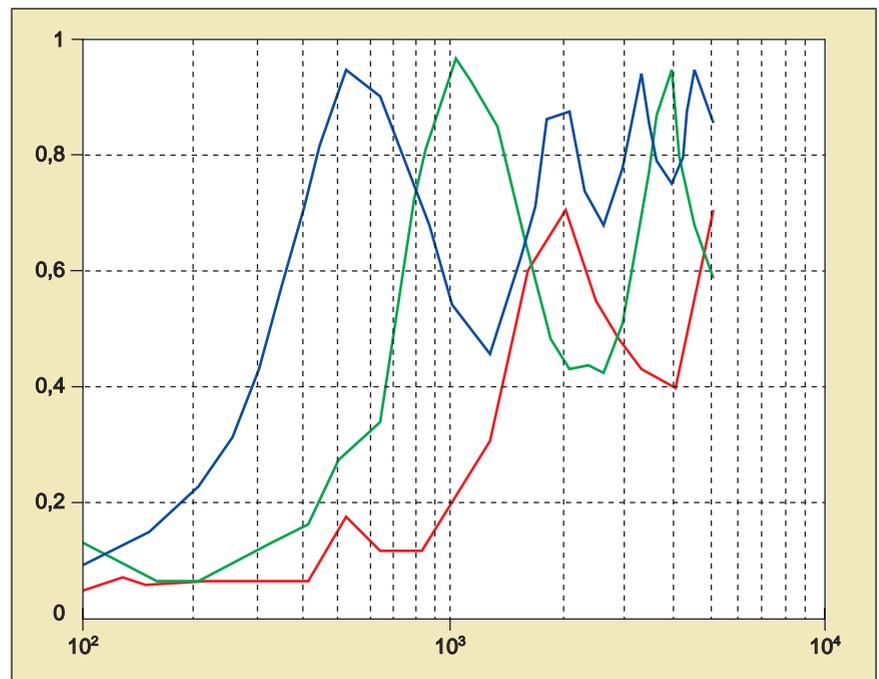
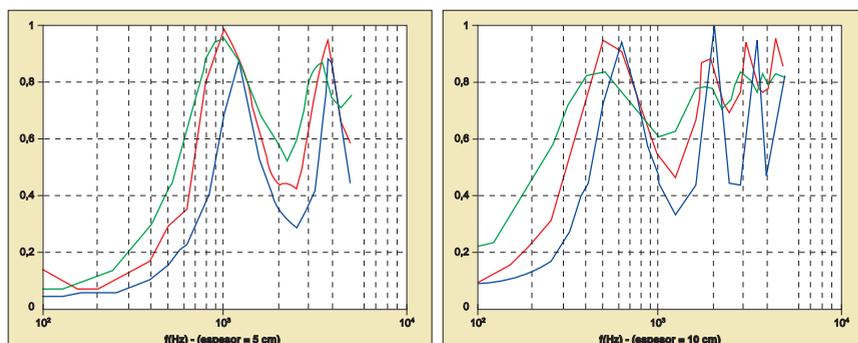


FIGURA 7. Coeficientes de absorción acústica en función de la frecuencia las muestras de tamaños 1 a 7 mm (—), 1 a 3 mm (—) y a 1,4 mm (—), de 5 y 10 cm. de espesor.



modificación, en forma de desplazamiento hacia bajas frecuencias, en la curva de absorción, sin modificar apreciablemente su forma respecto a la correspondiente al mismo tipo de granza sin aglomerar.

Todos los estudios realizados sobre muestras de pequeño tamaño en tubo de Kundt, así como las estimaciones derivadas de las predicciones del modelo matemático, deben complementarse con ensayos sobre muestras de gran tamaño en cámara reverberante. Debido al gran coste y a las múltiples dificultades que entrañan este tipo de ensayos (se requiere

FIGURA 9. Detalle de las muestras elaboradas en el Instituto de Acústica (CSIC) a partir de granulados de caucho de 3 mm aglomerados con diferentes tipos de aglutinantes.



emplear unos 700 kg de material, aproximadamente), se ha procurado reducir estos ensayos al mínimo, después de estudiar, sobre las muestras de pequeño tamaño, las distintas posibilidades que podían ofrecer los diferentes tipos de muestras analizados. A la vista de los resultados obtenidos en tubo de Kundt, donde se experimentó con muestras de dife-

rente granulometría, se puede concluir que el material más idóneo para nuestros propósitos es el que contiene partículas de tamaño inferior a 3 mm. La absorción acústica de esta granza se determinó en la cámara reverberante del Instituto de Acústica para muestras con espesores de 5 y 10 cm, encerradas en un marco perimetral de madera (el montaje se ilus-

tra en la figura 10). En este caso, los resultados obtenidos se ajustan con mayor grado de precisión al comportamiento del material real, estando expuesto a un campo sonoro difuso e incidencia aleatoria.

Los resultados son optimistas, ya que el coeficiente de absorción acústica en función de la frecuencia sigue una curva análoga a la distribución energética del ruido del tráfico, presentando valores superiores a 0,8 en las frecuencias próximas a 1 KHz, con lo que el sonido reflejado presenta una notable disminución. Estos resultados pueden considerarse satisfactorios, dado que son comparables o superiores a los obtenidos con la mayoría de las barreras acústicas empleadas en aplicaciones reales.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En primer lugar, y a modo de ejemplo, se ofrece en las figuras 11 y 12 la concordancia encontrada entre los valores experimentales obtenidos de ensayos en tubo de Kundt y los valores teóricos proporcionados por el modelo matemático. La granza utilizada es la que contiene partículas de tamaño comprendido entre 1 y 3 mm.

FIGURA 10. Detalle del montaje del ensayo de coeficiente de absorción en la cámara reverberante del Instituto de Acústica (CSIC).



FIGURA 11. Curvas teórica (—) y experimental (---) del coeficiente de absorción acústica de una probeta con granza de 1 a 3 mm, espesor de 5 cm.

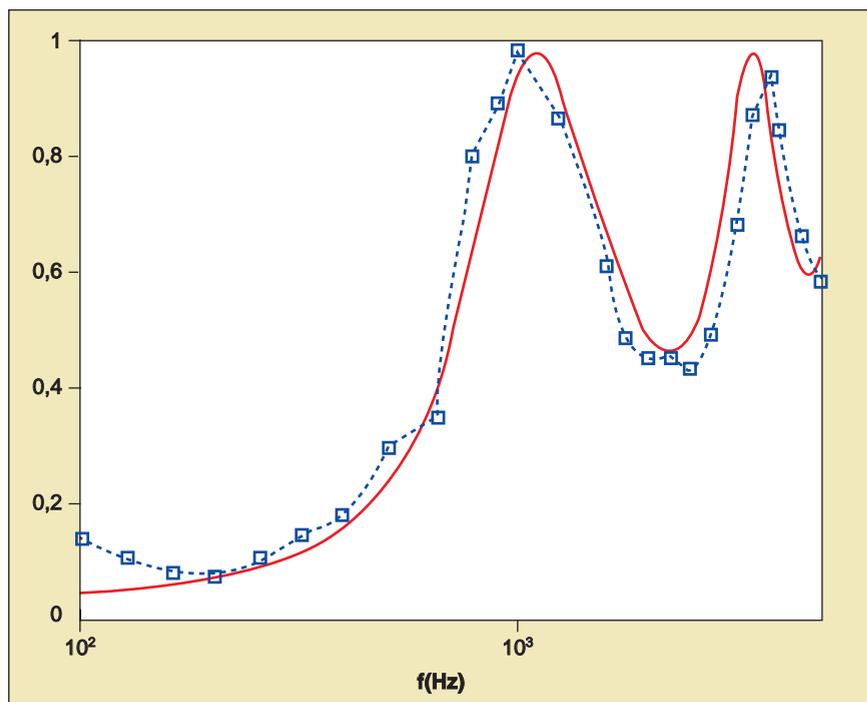
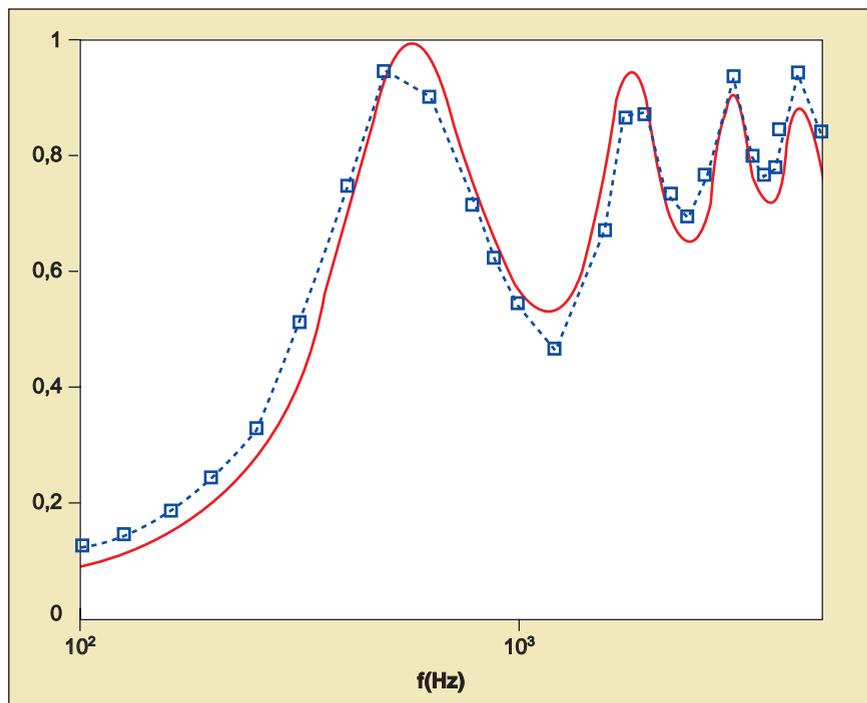


FIGURA 12. Curvas teórica (—) y experimental (---) del coeficiente de absorción acústica de una probeta con granza de 1 a 3 mm, espesor de 10 cm.



Ambas figuras corresponden a espesores de 5 y 10 cm, respectivamente, y en ellas se ha empleado el modelo matemático con los valores de

$\sigma = 3.000$ MKS rayls/m, $\phi = 54,4$ por 100 y $T = 1,6$.

A la vista de las figuras 11 y 12 es evidente la buena correlación entre

ambos resultados. La misma buena correlación se ha observado para los restantes tipos de granza, concluyendo de esta forma que estamos ante un modelo de predicción apropiado que constituye una herramienta útil para el diseño de materiales absorbentes adecuados a cada tipo de fuente de ruido en el futuro.

En segundo lugar, en las figuras 13 y 14 aparecen, comparados, los coeficientes de absorción acústica para un mismo espesor y tipo de granza obtenidos en tubo de Kundt y en cámara reverberante. Se sigue manifestando la alternancia de máximos y mínimos propios del comportamiento de materiales granulares sobre fondo reflectante; sin embargo, el ensayo en cámara reverberante presenta un incremento de absorción en las zonas de bajas frecuencias, así como una clara suavización de los mínimos, a consecuencia de la incidencia aleatoria del campo acústico.

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de absorción acústica en cámara reverberante se ha calculado el índice de valoración global que establece la norma UNE EN 135601-1 1996. Así, se obtuvo: $DL_{\alpha} = 4,7$ dB, con la muestra de 5 cm de espesor, y de $DL_{\alpha} = 6,8$ dB para la muestra de 10 cm de espesor, clasificándose dentro de la categoría A2 que establece la norma, categoría a la cual pertenecen la mayoría de las barreras acústicas de altas prestaciones disponibles en la actualidad.

Tan sólo un 5 por 100 del total de neumáticos usados es de nuevo reutilizado como materia prima. A pesar de las aplicaciones directas (defensas de muelles o embarcaciones, vallas de jardines y circuitos de automóviles, etc.), de su utilización como combustible, principalmente en cementeras, o de la posibilidad de recauchutado, casi un 50 por 100 de los neumáticos es almacenado en vertederos hoy día.

CONCLUSIONES

El estudio conjunto de los resultados obtenidos de la experimentación y de la simulación teórica ha demostrado que la granza de caucho procedente de los neumáticos de desecho presenta unas propiedades idóneas para su uso, como material absorbente acústico, en barreras anti-ruido. Considerando como fuente de ruido el tráfico rodado y teniendo en cuenta la dificultad de manipulación del material, se puede conseguir un compromiso óptimo eligiendo el material con granulometría de hasta 3 mm.

Con estas características se estima que la construcción de 100 m de una barrera acústica de 3 m de altura podría requerir entre 2.000 y 4.000 neumáticos de turismo, dependiendo del espesor de la pantalla.

Sin embargo, el uso de este material no queda restringido al de absorbente de ruido del tráfico. Como se ha comprobado, la combinación adecuada de granulometría y espesor condiciona su curva de absorción y permite adaptarla a espectros de ruidos diferentes. En este sentido, no se descarta la posibilidad de emplear este material en aplicaciones tales como apantallamientos de maquinaria ruidosa, tratamiento interior de industria con elevados niveles sonoros, etc.

Los ensayos realizados sobre muestras aglomeradas han demostrado no disminuir la capacidad del material

La reutilización del caucho procedente de los neumáticos de desecho constituye un tema fundamental, de gran importancia y repercusión, ya que contribuye a la eliminación de un residuo cuyas características de contaminación medioambiental se pueden calificar de muy graves.

FIGURA 13. Curvas experimentales del coeficiente de absorción acústica de una probeta con granza de 1 a 3 mm (espesor 5 cm), medida en tubo de Kundt (—) y cámara reverberante (---).

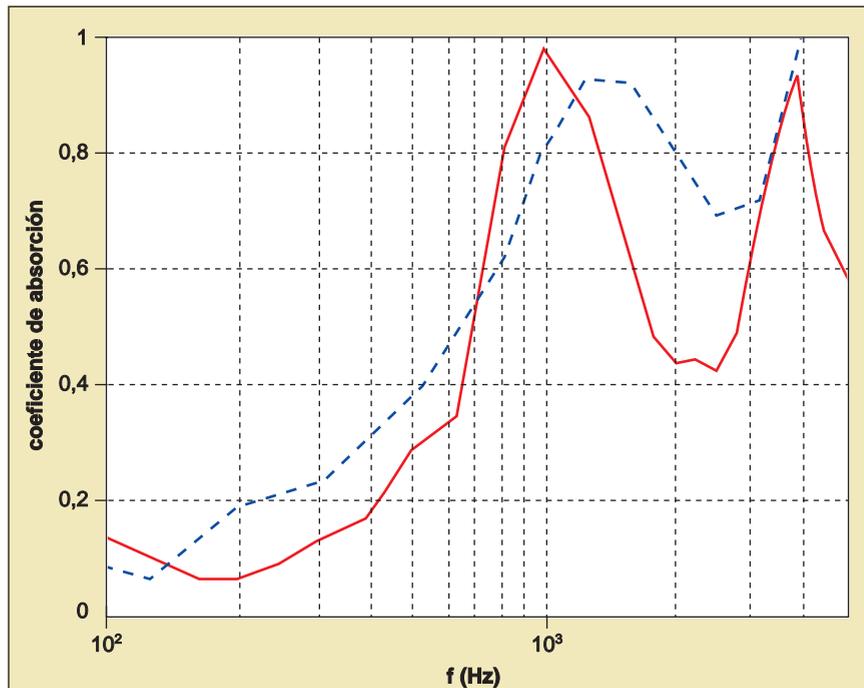
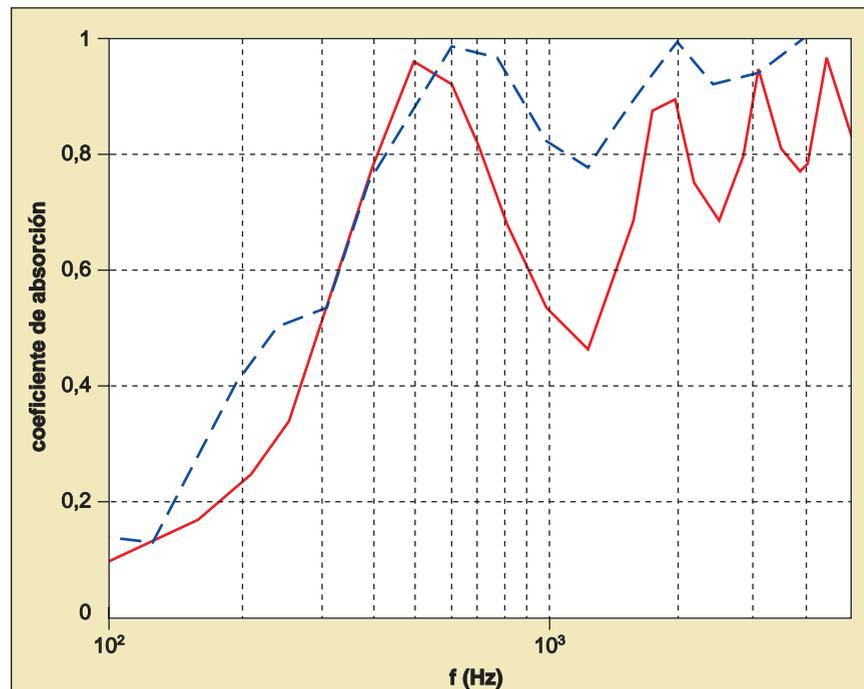


FIGURA 14. Curvas experimentales del coeficiente de absorción acústica de una probeta con granza de 1 a 3 mm (espesor 10 cm), medida en tubo de Kundt (—) y cámara reverberante (---).



como absorbente acústico, siempre y cuando el sistema de aglomeración sea capaz de mantener la porosidad. Una estructura compacta con propiedades elásticas presenta un induda-

ble valor añadido, proporcionando una mayor seguridad vial ante eventuales colisiones de los vehículos automóviles, por ejemplo.

Las ventajas de la aplicación de la

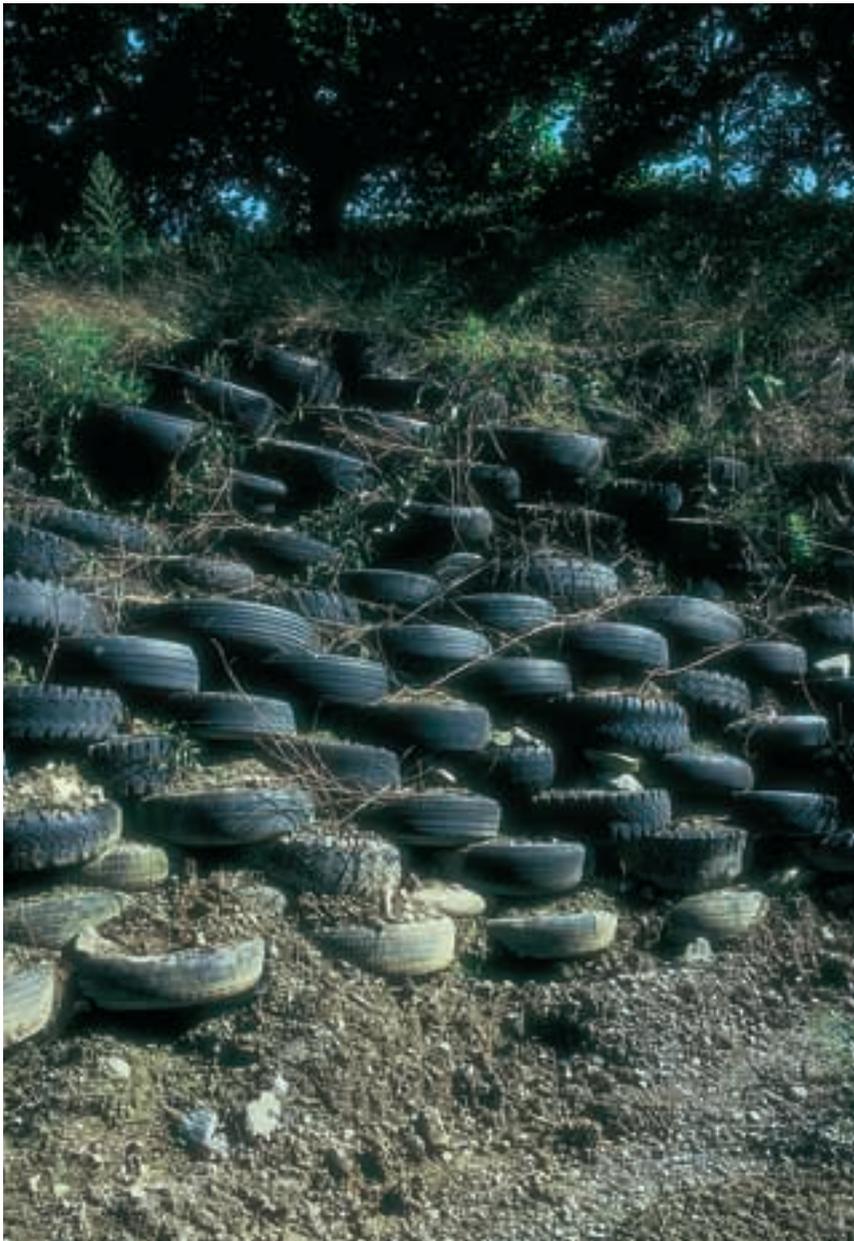
granza de caucho en pantallas acústicas anti-ruido frente a otro tipo de materiales (fibrosos por ejemplo) reside en una mayor inalterabilidad frente a los agentes atmosféricos, especialmente su secado después de lluvias intensas es considerablemente más rápido (con lo que las propiedades de absorción no se degradan o se recuperan prontamente). Cabe destacar también su resistencia a colmatarse por efecto del polvo, como sucede con aquéllos. Por otra parte, en el aspecto estético, permiten incorporar colores o motivos decorativos acordes con el entorno.

Las ventajas complementarias de este tipo de material residen en que

facilitan el reciclado de los neumáticos usados, residuo de muy difícil eliminación y con un alto grado de contaminación ambiental, y que la energía necesaria para su recuperación es muy pequeña (molinos mecánicos), comparada con la necesaria para obtener otros materiales acústicos absorbentes de prestaciones similares.

A modo de resumen y breves conclusiones puede afirmarse que la granza de caucho procedente de la recuperación de neumáticos de desecho, empleada en el diseño y construcción de pantallas acústicas, presenta las siguientes características:

Se estima que la construcción de 100 metros lineales de una barrera acústica, de tres metros de altura, podría requerir entre 2.000 y 4.000 neumáticos de turismo, dependiendo del espesor de la pantalla.



A pesar de las aplicaciones directas (defensas de muelles, vallas de jardines, circuitos de automóviles, etc.) el 50 por 100 de los neumáticos es hoy día almacenado en vertederos.

- Constituye una buena alternativa a los materiales absorbentes acústicos tradicionales, en uso actualmente.
- Contribuye a la eliminación de vertederos de alto índice de contaminación medioambiental.
- Pueden diseñarse y desarrollarse, sin gran dificultad, nuevas formas y perfiles con incrementos notables de absorción acústica, pudiendo incorporar motivos decorativos y pinturas de colores, tratamientos estéticos adecuados a cada emplazamiento.
- En el caso de pantallas autoportantes, ha de considerarse el incremento de la seguridad vial ante posibles colisiones de vehículos. Este tipo de tratamiento acústico también es susceptible de instalarse en el interior de túneles, vías en talud, etc., en que se reduciría el ruido producido en su interior por efecto de la reverberación acústica.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) *Memorias del Instituto de Acústica*, CSIC, 1993-1996.
- (2) *Neumático, materia y energía reutilizable*, Neumáticos Michelin, S. A.



La reutilización del caucho procedente de neumáticos de desecho constituye un tema de gran importancia y repercusión, ya que contribuye a la eliminación de un residuo de especiales características.

- Dirección Ingeniería de Producto, octubre 1996.
- (3) LEIBBRANDT, FRIEDRICH (mayo 1993): *Reciclaje de residuos de caucho. Ecológicamente necesario*. BAYER AG, Alemania. Trabajo presentado al I Congreso Nacional del Caucho. Madrid.
 - (4) MASTRAL, A. M., y MURILLO, R.: «Usos alternativos de los neumáticos de desecho», Instituto de Carboquímica, CSIC. *Revista del Caucho*. Consorcio Nacional de Industriales del Caucho.
 - (5) Norma UNE EN 135601-1/1996: «Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico».
 - (6) PFRETZSCHNER, J.; SIMÓN, F.; MORENO, A., y DE LA COLINA, C.: *Patente de Invención 9502536: Pantallas acústicas absorbentes con granza de caucho*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
 - (7) PFRETZSCHNER, J.; RODRÍGUEZ, R. M.; DE LA COLINA, C.; MORENO, A., y SIMÓN, F.: *Estudio teórico experimental de materiales granulares absorbentes preparados con granza de caucho*. Comunicación a *Tecniacústica* 97.

Para el estudio de la granza de caucho como material absorbente acústico ha sido necesaria la medida de las propiedades intrínsecas de la estructura del material: resistividad al flujo de aire, porosidad y tortuosidad, siendo imprescindible la puesta en marcha de un laboratorio específico, diseñado y acondicionado para este fin. No existen precedentes en España en este tipo de instalaciones, y su ejecución será de gran ayuda para la experimentación y el diseño de nuevos materiales absorbentes en lo sucesivo.

- (8) ZWIKKER, y KOSTEN, C. W. (1949): *Sound Absorbing Materials*. Elsevier Publishing Company, Inc., London.
- (9) BIOT, M. A. (1956): «The theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I Low frequency range. II Higher frequency range». *J. Acoust Soc. Amer.*, 28, pp. 168-191.
- (10) DELANY, M. E., y BAZLEY, E. N. (1970): «Acoustic properties of fibrous absorbent materials», *Applied Acoustics*, 3.
- (11) JOHNSON, D. L., et al. (1987): «Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media», *J. Fluid Mechanics*, 176, pp. 379-402.
- (12) RODRÍGUEZ, R. M.; PFRETZSCHNER, J.; MORENO, A.; DE LA COLINA, C., y SIMÓN, F.: *Determinación experimental de los parámetros acústicos característicos de materiales porosos de diseño*. Comunicación a *Tecniacústica* 97.
- (13) International Standard ISO 354-1985 (E): *Acoustical measurements of sound absorption in a reverberation room*.
- (14) International Standard ISO 9053:1991 (E): *Acoustic material for acoustic applications determination of flow resistance*.