

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA



TESIS DOCTORAL

**INVESTIGACIONES SOBRE LA APLICABILIDAD EN EDIFICACIÓN DE
MATERIALES ACÚSTICOS PROCEDENTES DE LA VALORIZACIÓN DE
RESIDUOS**

Rubén Maderuelo Sanz

Cáceres, 2014

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA



TESIS DOCTORAL

***INVESTIGACIONES SOBRE LA APLICABILIDAD EN EDIFICACIÓN DE
MATERIALES ACÚSTICOS PROCEDENTES DE LA VALORIZACIÓN DE
RESIDUOS***

Dr. D. Juan Miguel Barrigón Morillas y **Dr. D. Valentín Gómez Escobar**, Titulares de Universidad y pertenecientes al Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Extremadura,

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria de Tesis Doctoral ha sido realizada bajo su dirección por **D. Rubén Maderuelo Sanz** en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Extremadura, y por ello autorizamos la presentación de la misma.

Y para que así conste, firmamos la presente en Cáceres a 16 de junio de 2014.

Fdo.: D. Juan Miguel Barrigón Morillas

Fdo.: D. Valentín Gómez Escobar

Cáceres, 2014

“Cada día sabemos más y entendemos menos”

Albert Einstein (1879-1955)

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi profundo agradecimiento por su apoyo, paciencia y amistad a mis directores, los doctores Juan Miguel Barrigón Morillas y Valentín Gómez Escobar, sin los cuales esta tesis no hubiera sido posible.

También he de tener presente a todos los miembros del Laboratorio de Acústica de la Escuela Politécnica de Cáceres, los doctores Rosendo, Juan Antonio M., Juan Antonio A., Javi, Guille y a Carlos, y, de la Escuela Politécnica de Alcoi, los doctores Antonio Nadal Gisbert y José Enrique Crespo Amorós.

A todos mis compañeros de Intromac, del primero al último. A Manolo, por su amistad y por quién empecé a introducirme en el mundo de la acústica, a Laureano que siempre ha sido un buen amigo, al resto de compañeros.

A mis amigos de la infancia, Dani, Andrés, Eduardo, Pedro, Carlos, Nacho, Oscar, Javi, Willy, David, posiblemente sois los que mejor me conocéis, ¡¡¡palabra!!! Es un placer teneros aún ahí, desde la distancia, y espero disfrutar con vosotros mucho más.

A toda mi familia, en especial a mi madre, a mi padre y a mi hermana, por el cariño, afecto y apoyo recibido, sobretodo por todo lo que han luchado para que llegara este momento y por lo mucho que les echo de menos con la distancia.

A mi mujer, Maribel, y a mis dos hijos, Mabel y Jorge, por vuestra paciencia, ayuda, comprensión, por todo el tiempo que os ha robado esta Tesis, porque habéis aguantado estoicamente mis cambios de humor y mis enfados, por que os quiero, por todo.

Y, por último, a todos aquellos bichos que me apoyaron desde el momento en que me empezaron a conocer, regalándome su cariño.

Va por todos vosotros.

Resumen

El método habitualmente empleado para conseguir minimizar los niveles de ruido en la construcción es el empleo de diferentes soluciones constructivas, que incluyen en sus componentes materiales que, debido a sus propiedades acústicas, garantizan una disminución de los niveles de ruido, bien sea aislando, bien sea acondicionando los recintos en los que habitan las personas.

El estudio que da origen a esta Memoria de Tesis Doctoral es la necesidad de encontrar materiales acústicos que sirvan como alternativa a los empleados tradicionalmente en la construcción. En particular, hemos centrado nuestros estudios en materiales acústicos basados en materiales naturales o reciclados. Con la valorización y reutilización de este tipo de materiales se puede llegar a eliminar una parte sustancial de los residuos generados en la sociedad moderna, además de lograr una disminución en el coste fabricación de nuevos materiales, al no tener que partir desde cero en la obtención de la materia prima. Centrar esfuerzos en obtener nuevos materiales más sostenibles es un punto básico de partida para lograr una mayor sostenibilidad ambiental.

En primer lugar, se realiza una revisión de los materiales empleados en edificación y de los últimos trabajos relacionados con la utilización de materiales naturales y reciclados en la construcción. También, se realiza una amplia revisión de las propiedades físicas y mecánicas que participan en el comportamiento acústico de los materiales, así como de las técnicas y modelos de medición y predicción del comportamiento acústico de los materiales susceptibles de emplearse en edificación. En esta línea, nos hemos centrado en dos posibilidades: materiales para usarlos como absorbentes acústicos para emplearse en el acondicionamiento y materiales para utilizarlos como lámina elástica en un suelo flotante. Se han estudiado varios tipos de materiales, principalmente materiales reciclados procedentes del reciclado de neumáticos fuera de uso; granos de corcho, procedente del sobrante de la fabricación de tapones y materiales naturales, como las arcillas expandidas. De estos materiales se han obtenido las características necesarias para valorar su comportamiento como absorbente acústico. También se estudian diferentes láminas, valorando su eficacia en un suelo flotante. Se presenta, pues, un estudio de nuevos materiales acústicos para edificación que permita aumentar su variedad, reutilizando y reciclando otros productos o residuos.

Summary

The method usually employed for minimizing noise in building construction is to use different constructive solutions, including in its components, materials, having their acoustic properties, to ensure a reduction of noise levels, either by isolating or conditioning the rooms in which people lives.

The origin of the present Doctoral Thesis is the needed to find acoustic materials that could serve as an alternative to the traditionally acoustic materials used in building construction. These new acoustical materials are based on natural or recycled materials. With the recovery and reuse of these materials, it will be able to eliminate a substantial portion of these, in addition, to achieve a reduction in the production cost of the new materials by not having to start from scratch in obtaining raw materials, therefore, to focus efforts on obtaining new more sustainable materials is a basic starting point for greater environmental sustainability.

First, a major review of the materials and recent works about the use of natural and recycled materials used in building construction was realized. A comprehensive review of the physical and mechanical properties involved in the acoustic performance of materials and techniques and measuring models for predicting the performance of acoustic materials likely to be used in construction is also realized. In this line, we have focused on two possibilities: materials used as porous sound absorbers and materials used as elastic underlays for floating floor. We have studied various types of materials, primarily recycled materials coming from the shredding of tires from heavy vehicles, cork granulates coming from stoppers for drinks or natural materials such as expanded clays. From these materials, it has been obtained the necessary properties to evaluate their performance as porous sound absorber. Different underlays are also studied to asses their effectiveness in floating floors.

Therefore, the thesis provides a study of new materials for building construction that allows increasing the variety of acoustic materials, reusing or recycling waste products.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	i
Summary	iii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xiii
1. OBJETO Y ANTECEDENTES	1
1.1. <i>Introducción.....</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Objetivos.....</i>	<i>7</i>
1.3. <i>Estructura de la Memoria de Tesis Doctoral.....</i>	<i>8</i>
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1. <i>Aislamiento y Acondicionamiento Acústico</i>	<i>11</i>
2.2. <i>Materiales acústicos empleados en la construcción</i>	<i>13</i>
2.3. <i>Materiales sostenibles</i>	<i>17</i>
2.4. <i>Caracterización de materiales.....</i>	<i>27</i>
2.4.1. <i>Propiedades no acústicas de materiales porosos</i>	<i>30</i>
2.4.1.1. <i>Propiedades físicas.....</i>	<i>30</i>
2.4.1.2. <i>Propiedades mecánicas.....</i>	<i>47</i>
2.4.2. <i>Propiedades acústicas</i>	<i>53</i>
2.4.2.1. <i>Acondicionamiento acústico</i>	<i>53</i>
2.4.2.2. <i>Aislamiento acústico a ruido de impacto</i>	<i>78</i>
3. METODOLOGÍA	85
3.1. <i>Propiedades no acústicas de materiales porosos.....</i>	<i>85</i>
3.1.1. <i>Propiedades físicas</i>	<i>85</i>
3.1.1.1. <i>Porosidad.....</i>	<i>85</i>

3.1.1.2.	Tortuosidad	87
3.1.1.3.	Resistencia al flujo	88
3.1.2.	Propiedades mecánicas	89
3.1.2.1.	Rigidez dinámica.....	89
3.1.2.2.	Compresibilidad	91
3.2.	<i>Propiedades acústicas</i>	91
3.2.1.	Absorción e impedancia acústica	91
3.3.	<i>Aislamiento acústico</i>	93
3.3.1.	Mejora del aislamiento a ruido de impacto en cámara normalizada	93
3.3.2.	Mejora del aislamiento a ruido aéreo en cámara normalizada	94
4.	CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS MATERIALES ACÚSTICOS PARA SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN.....	97
4.1.	<i>Nuevos materiales absorbentes elaborados con fibras textiles procedentes de los neumáticos fuera de uso.....</i>	<i>99</i>
4.1.1.	Objetivos.....	99
4.1.2.	Materiales empleados	99
4.1.3.	Propiedades no acústicas	101
4.1.4.	Comportamiento acústico de muestras simples.....	103
4.1.5.	Comportamiento acústico de materiales multicapas	107
4.1.6.	Comportamiento acústico del panel perforado	109
4.2.	<i>Comportamiento acústico materiales absorbentes porosos fabricados con caucho reciclado y resina poliuretano</i>	<i>112</i>
4.2.1.	Objetivos.....	112
4.2.2.	Materiales empleados	112
4.2.3.	Propiedades no acústicas	114
4.2.4.	Propiedades acústicas	116

4.2.5.	Comparativa entre resultados experimentales y teóricos	120
4.3.	<i>Comportamiento acústico de granos de corcho sin aglutinar</i>	<i>123</i>
4.3.1.	Objetivos.....	123
4.3.2.	Materiales empleados	123
4.3.3.	Propiedades no acústicas	123
4.3.4.	Propiedades acústicas	125
4.3.5.	Comparación entre resultados experimentales y teóricos.....	130
4.4.	<i>Propiedades acústicas de materiales absorbentes fabricados con arlita, perlita y vermiculita.....</i>	<i>138</i>
4.4.1.	Objetivos.....	138
4.4.2.	Materiales empleados	138
4.4.3.	Propiedades no acústicas	139
4.4.4.	Propiedades acústicas	140
4.5.	<i>Comportamiento de láminas elásticas elaboradas con reciclado de neumático para la reducción del ruido de impacto.....</i>	<i>147</i>
4.5.1.	Objetivos.....	147
4.5.2.	Materiales empleados	147
4.5.3.	Propiedades no acústicas	148
4.5.4.	Comparativa entre el modelo de Cremer y las pruebas de laboratorio en cámara normalizada.....	153
4.6.	<i>Comportamiento de láminas elásticas elaboradas con granulado de corcho y resinas para la reducción del ruido de impacto.....</i>	<i>157</i>
4.6.1.	Objetivos.....	157
4.6.2.	Materiales empleados	157
4.6.3.	Resultados en laboratorio	158
5.	CONCLUSIONES	163
	REFERENCIAS	169

ANEXOS 185

Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Relación entre la Ley del Ruido y el CTE DB-HR, Protección frente al ruido. (*)Valores máximos de inmisión de ruido y vibraciones que pueden ser producidos por las instalaciones del propio edificio, ruido ambiental proveniente del exterior y procedente de actividades que se desarrollan en el edificio o en recintos colindantes).</i>	3
<i>Figura 2.1. Esquema de materiales absorbentes según Recuero (2001).</i>	13
<i>Figura 2.2. Distribución de los usos de granulado de corcho.</i>	26
<i>Figura 2.3. Tipos de porosidad y poros en un material poroso.</i>	31
<i>Figura 2.4. Detalle de montaje para la determinación de la porosidad (Beranek, 1942).</i>	33
<i>Figura 2.5. Detalle de montaje para la determinación de la porosidad por el método de Champoux y colaboradores (Champoux et al., 1991).</i>	34
<i>Figura 2.6. Forma de los poros en función de la curva de intrusión de mercurio. Imagen tomada de Webb y Orr (1997).</i>	38
<i>Figura 2.7. Modelo de Zwicker y Kosten (1949) para la tortuosidad en materiales porosos.</i>	39
<i>Figura 2.8. Analogía entre propiedades acústicas y eléctricas de los materiales granulares no conductores para la obtención de la tortuosidad.</i>	40
<i>Figura 2.9. Esquema de montaje para la obtención de la tortuosidad.</i>	42
<i>Figura 2.10. Esquema para la obtención de la resistencia al flujo.</i>	44
<i>Figura 2.11. Esquema de montaje experimental descrito por Ingard y Dear (1985).</i>	45
<i>Figura 2.12. Esquema de ensayo para la determinación de la rigidez dinámica según la Norma UNE EN 29052-1:1994.</i>	50
<i>Figura 2.13. Detalle de los espesores d_L, d_F y d_B en relación con el tiempo y la carga.</i>	51
<i>Figura 2.14. Incidencia de la onda acústica sobre una superficie. Medio 1 y Medio 2 representan los dos medios con propiedades acústicas diferentes y k_1, z_1 y k_2, z_2 el número de onda e impedancia características de los medios 1 y 2 respectivamente.</i>	54
<i>Figura 2.15. Diferencias entre la estructuras de poro cerrado y poro abierto. Imagen obtenida de Cox y D'Antonio (2004).</i>	55
<i>Figura 2.16. Geometría para la modelización de la matriz de transferencia para un material absorbente multicapa. Imagen tomada de Cox y D'Antonio (2004).</i>	58
<i>Figura 2.17. Disposición de los micrófonos de ¼ de pulgada dentro del tubo de impedancia. Imagen tomada de la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002.</i>	61
<i>Figura 2.18. Detalle de los diferentes componentes de un suelo flotante.</i>	79
<i>Figura 2.19. Esquema de los diferentes tipos de suelos flotantes.</i>	80
<i>Figura 2.20. Esquema de suelo flotante ensayado en este trabajo.</i>	82
<i>Figura 3.1. Estereopícnómetro de helio Quantachrome SPY-3 y celda calibrada.</i>	86

Figura 3.2. Vaso portador de la disolución de sulfato de cobre y ánodo de cobre empleados para la medida de la tortuosidad por el método de Brown (1980).	87
Figura 3.3. Disposición del ensayo para la determinación de la frecuencia de resonancia de la lámina elástica según UNE EN 29052-1.	90
Figura 3.4. Acelerómetro piezoeléctrico 4507B 005 de Brüel & Kjaer (a) y martillo modal 2302-100 de Endevco (b).	90
Figura 3.5. Prensa Shimadzu SERVOPULSER Serie universal U Frame Body empleada para la determinación de la compresibilidad.	91
Figura 3.6. Sistema de adquisición y procesado de datos PULSE 3560-C con cuatro canales de entrada y dos de salida (a), disposición de ensayo (b), tubo de impedancia de 100 mm (c) y 29 mm (d) de diámetro utilizado en la obtención del coeficiente de absorción e impedancia acústica y sistema de montaje para muestras sin aglutinar (d).	92
Figura 3.7. Detalle constructivo del forjado. (1) enlucido de yeso, (2) forjado unidireccional de bovedilla de 25 + 5 cm, (3) lámina elástica, (4) solera de mortero de cemento.	93
Figura 4.1. Fibra textil con partículas de caucho.	101
Figura 4.2. Microfotos de la muestra M-G (a) y M-E (b) y forma de poro, caucho y fibra textil.	103
Figura 4.3. Espectro de los coeficientes de absorción de las muestras usadas en este trabajo.	104
Figura 4.4. Parte real de la impedancia superficial de las muestras.	105
Figura 4.5. Parte imaginaria de la impedancia superficial de las muestras.	106
Figura 4.6. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras utilizadas en este trabajo y de fibra de vidrio con diferentes espesores.	106
Figura 4.7. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras M-F, M-B y M-F-B.	107
Figura 4.8. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras M-D, M-B y M-B-D.	108
Figura 4.9. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras M-D, M-E y M-D-E.	108
Figura 4.10. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-E y M-G frente a las mismas muestras con el panel perforado, CM-E y CM-G, respectivamente.	110
Figura 4.11. Coeficiente de absorción teórico y experimental de las muestras CM-E y CM-G.	111
Figura 4.12. Microfoto de la muestra M-1 obtenida con una máquina de visión digital Mitutoyo Vision Machine en donde se pueden apreciar las partículas de caucho, EPS y vermiculita.	113
Figura 4.13. Porosidad en función de la resistencia al flujo para las muestras de GTR.	115
Figura 4.14. Diferencia de potencial en función de la intensidad aplicada para la determinación de la tortuosidad mediante el método de Brown (1980).	116
Figura 4.15. Coeficiente de absorción para muestras con espesor A.	117
Figura 4.16. Coeficiente de absorción para muestras con espesor B.	118
Figura 4.17. Parte real de la impedancia acústica de las muestras con espesor A.	119
Figura 4.18. Parte imaginaria de la impedancia acústica de las muestras con espesor A.	120

Figura 4.19. Resultados experimentales y teóricos, con $s_p = 3.100$ y $s_k = 0.350$ para la muestra M-1...	121
Figura 4.20. Resultados experimentales y teóricos, con $s_p = 2.590$ y $s_k = 0.285$ para la muestra M-4...	121
Figura 4.21. Microfotos de las muestras M-1 (a) y M-8 (b) tomadas con un microscopio Mitutoyo en donde se puede observar la diferente angularidad de las muestras.....	125
Figura 4.22. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado de 10 cm de espesor.	126
Figura 4.23. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado de 7.5 cm de espesor.	126
Figura 4.24. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado de 5 cm de espesor.	127
Figura 4.25 Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado M-8 de distintos espesores.	128
Figura 4.26. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado M-1 de distintos espesores.	129
Figura 4.27. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado M-4 de distintos espesores.	129
Figura 4.28. Frecuencia de resonancia en función del tamaño característico de partícula experimental y teórico.....	132
Figura 4.29. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=2.5$ cm. ...	133
Figura 4.30. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=5.0$ cm. ...	134
Figura 4.31. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=7.5$ cm. ...	134
Figura 4.32. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=10.0$ cm. ...	135
Figura 4.33. Parte real de la impedancia superficial de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11.....	136
Figura 4.34. Parte imaginaria de la impedancia superficial de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11. ...	137
Figura 4.35. Detalle de las muestras V110 de vermiculita (a), A100 de arlita (b) y P200 de perlita (c). ...	140
Figura 4.36. Coeficiente de absorción para muestras hechas con arlita.	141
Figura 4.37. Parte real de la impedancia superficial de muestras hechas con arlita.	142
Figura 4.38. Parte imaginaria de la impedancia superficial de muestras hechas con arlita.	142
Figura 4.39. Coeficiente de absorción para muestras hechas con perlita.	143
Figura 4.40. Parte real de la impedancia superficial de muestras hechas con perlita.	144
Figura 4.41. Parte imaginaria de la impedancia superficial de muestras hechas con perlita.....	144
Figura 4.42. Coeficiente de absorción para muestras hechas con vermiculita.....	145
Figura 4.43. Parte real (a) y parte imaginaria (b) de la impedancia superficial de las muestras de vermiculita.....	145

Figura 4.44. Coeficiente de absorción para las muestras de arlita, perlita y vermiculita que presentan un mejor comportamiento frente a una lana de roca.	146
Figura 4.45. Detalle de algunas de las láminas empleadas en este trabajo, M1 (a), M2 (b), M3(c) y M4 (d).	149
Figura 4.46. Función de respuesta en frecuencia (FRF) de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo según UNE EN 29052-1:1994 en la zona de bajas frecuencias para las láminas estudiadas.	150
Figura 4.47. Función de respuesta en frecuencia (FRF) de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo según UNE EN 29052-1:1994 en la zona de bajas frecuencias para las láminas comerciales y las muestras M6 y M8.	150
Figura 4.48. Mejora del aislamiento a ruido de impacto de las muestras M6 teórico y experimental. ...	154
Figura 4.49. Mejora del aislamiento a ruido de impacto de las muestras M8 teórico y experimental. ...	154
Figura 4.50. Índice de reducción sonora de la muestra M6 con solera de mortero de 5 y 7 cm y del forjado de referencia.	155
Figura 4.51. Índice de reducción sonora de la muestra M8 con solera de mortero de 5 cm y del forjado de referencia.	156
Figura 4.52. Mejora del aislamiento a ruido aéreo empleando como revestimiento del suelo las muestras M6 y M8.	156
Figura 4.53. Detalle de algunas de las diferentes láminas empleadas en este trabajo. A la izquierda lámina de corcho aglutinada con resina epoxi y $4.0 < D < 5.0$ mm. A la derecha lámina de corcho aglutinada con resina poliuretano y $1.0 < D < 2.0$ mm.	157
Figura 4.54. Función de respuesta en frecuencia (FRF) de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo según UNE EN 29052-1:1994 en la zona de bajas frecuencias para las láminas de corcho con tamaños de grano mayores de 6.3mm (a) y 0.5 mm (b).	159
Figura 4.55. Relación entre ΔL , resinas y tamaño de grano de las láminas elásticas.	160

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1. Composición, coeficiente de absorción y espesor de algunos de los principales paneles absorbentes empleados en la actualidad en la construcción.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2.2. Composición, mejora a ruido de impacto y espesor de algunas de las principales láminas elásticas empleadas en la actualidad en la construcción.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.3. Componentes de los neumáticos de turismos y vehículos pesados (European Tyre recycling Association, ETRA, www.etra-eu.org).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4.1. Composición aproximada del material empleado, en % en peso.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4.2. Propiedades y parámetros de fabricación de las muestras.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 4.3. Propiedades no acústicas de las muestras.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 4.4. Propiedades físicas y composición de las muestras.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 4.5. Propiedades no acústicas de las muestras.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 4.6. Recta de regresión y coeficiente de variabilidad de los puntos evaluados experimentalmente para la obtención de la tortuosidad, donde I se corresponde con la intensidad (A).....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 4.7. Composición y propiedades no acústicas de las diferentes muestras, (CB, corcho blanco; A, arlita; V, vermiculita; R, refugio de corcho).....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 4.8. Relación entre el primer máximo de resonancia y su mínimo correspondiente de todas las muestras.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 4.9. Valores de la frecuencia correspondiente al primer máximo de absorción par alas muestras de granos de corcho sin aglutinar.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 4.10. Modelo de regresión polinomial, teórico y experimental, para las muestras estudiadas en este trabajo donde X es el tamaño característico de partícula (D).....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 4.11. Propiedades físicas de las muestras.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 4.12. Componentes de las láminas elásticas comerciales y las empleadas en este trabajo y sus propiedades físicas.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 4.13. Rigidez dinámica, mejora a ruido de impacto y componentes y espesor de las láminas elásticas de las láminas comerciales y las fabricadas a partir de los residuos de neumáticos. (*) Muestras de láminas comerciales ensayadas en laboratorio.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 4.14. Compresibilidad y reducción del espesor (%) de las láminas (Schiavi et al., 2007b).....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 4.15. Factor de pérdidas (obtenido a partir de la eq. 2.43) y la parte real del módulo de Young (obtenido a partir de la eq. 2.44) de las nuevas láminas elásticas.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 4.16. Frecuencia de resonancia, rigidez dinámica y mejora del aislamiento a ruido de impacto de las láminas de corcho elaboradas con granos de corcho suelto y con resinas poliuretano y epoxi.....</i>	<i>158</i>

1. OBJETO Y ANTECEDENTES

1.1. Introducción

La contaminación ambiental por ruido y vibraciones constituye, en la actualidad, uno de los principales problemas medioambientales en las sociedades en desarrollo y desarrolladas. Esto es consecuencia del crecimiento económico global, del aumento del transporte y de la constante urbanización que experimenta nuestra sociedad. Esta contaminación afecta de manera importante a las personas y representa un importante factor de riesgo para nuestra salud y calidad de vida. El problema queda reflejado en el último informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) referente a la contaminación por ruido ambiental, en el que se indica que este tipo de contaminación es la segunda mayor problemática ambiental, únicamente superada por la contaminación atmosférica, y que es responsable, según los cálculos de este organismo sanitario, de más de 50.000 infartos cada año en Europa (OMS, 2011).

La aprobación de la Directiva Europea referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental (Europa, 2002) supone la formalización de una declaración de intenciones de los países de la UE en materia medioambiental. El objeto de esta Directiva es la de *definir un planteamiento común dirigido a evitar, prevenir o reducir, de manera prioritaria, los efectos dañinos, incluidas las molestias, que se deben a la exposición al ruido ambiental.*

Con objeto de trasponer la Directiva 2002/49/CE en España, se publica la Ley del Ruido (España, 2003) donde, además, se desarrollan otros aspectos adicionales orientados a prevenir, vigilar y reducir la contaminación acústica para evitar y reducir los daños que de ésta pueden derivarse para la salud humana, los bienes o el medio ambiente. Con esta Ley, el Gobierno crea una norma general reguladora del ruido. La Ley de Ruido cuenta con dos reglamentos complementarios que son:

- Real Decreto 1513/2005 por el que se desarrolla la Ley del Ruido en lo referente a la evaluación y gestión de ruido ambiental (España, 2005a).
- Real Decreto 1367/2007 por el que se desarrolla la Ley del Ruido en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas (España, 2007a).

Dentro del marco reglamentario nacional, en lo referente a la edificación, la situación en España viene definida por la aprobación de la Ley de Ordenación de la Edificación (España, 1999). La aprobación de esta Ley vino motivada por una insuficiente regulación del proceso constructivo, por la necesidad de establecer un marco legal que fomentase la calidad de los edificios y por el compromiso de fijar las garantías suficientes a los usuarios frente a los posibles daños. Puede ser considerada como una aportación más a la Ley General para la Defensa de los Consumidores y Usuarios (España, 1984). En su Disposición final segunda, la Ley de Ordenación de la Edificación, autoriza al Gobierno para que, mediante Real Decreto, apruebe el Código Técnico de la Edificación, CTE (España, 2007b), en el que se establezcan las exigencias básicas que deben cumplirse en los edificios, en relación con los requisitos básicos relativos a la seguridad y habitabilidad y entre los que están los requisitos acústicos que se recogen en el Documento Básico CTE DB-HR (España, 2007b).

Los objetivos básicos que se persiguen con el CTE DB-HR son:

- Elevar los niveles de aislamiento acústico reglamentarios en la edificación en respuesta a una demanda social generalizada, adecuándolos a la media europea.
- Contemplar adecuadamente los mecanismos de transmisión acústica entre recintos, incluida la transmisión de ruido por flancos, superando así las deficiencias de la NBE CA-88 en la predicción de la transmisión del ruido entre recintos.
- Limitar el ruido reverberante en aquellas estancias, como aulas y salas de conferencia, en las que es necesario conseguir niveles adecuados de inteligibilidad, o comedores y restaurantes, donde debe limitarse convenientemente el ruido de fondo.

El ámbito de la edificación se ve afectado por la Ley del Ruido y sus reglamentos en dos vertientes:

1. La edificación. La Ley del Ruido considera los edificios como receptores acústicos y no como fuente emisora de ruido. En el interior de los edificios, a los que se les ha dado diferentes tipos de usos, residencial (tanto público como privado), hospitalario, docente o cultural, deben

cumplirse los objetivos de calidad acústica interiores que garanticen que sus usuarios puedan desarrollar las actividades en su interior con normalidad. Los índices de calidad acústica interior son, en realidad, valores máximos de inmisión de ruido y vibraciones que pueden ser producidos por las instalaciones del propio edificio, ruido ambiental proveniente del exterior o procedente de actividades que se desarrollan en el edificio o en recintos colindantes.

2. La ordenación del territorio y el planeamiento urbanístico. Según la Ley del Ruido, las Administraciones Públicas deben establecer una zonificación del suelo en áreas acústicas, que son sectores del territorio donde deben cumplirse unos objetivos de calidad acústica ambiental. Estas áreas se clasifican en función del uso predominante del suelo y tienen asignados unos valores máximos de inmisión de ruido ambiental.

La elaboración del CTE DB-HR es coordinada con la redacción de la Ley del Ruido y con sus desarrollos reglamentarios en lo referente a la protección de los usuarios con respecto al ruido procedente del exterior y de las instalaciones propias del edificio (Figura 1.1).

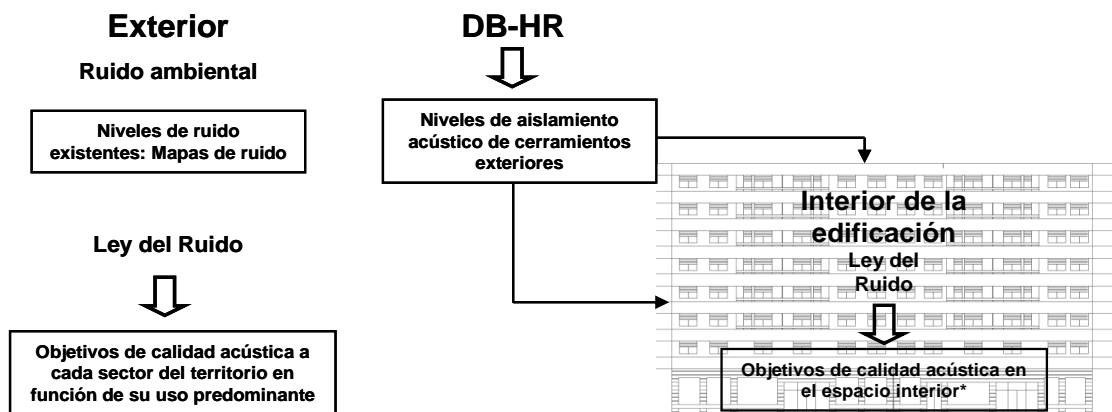


Figura 1.1. Relación entre la Ley del Ruido y el CTE DB-HR, Protección frente al ruido. ()Valores máximos de inmisión de ruido y vibraciones que pueden ser producidos por las instalaciones del propio edificio, ruido ambiental proveniente del exterior y procedente de actividades que se desarrollan en el edificio o en recintos colindantes).*

Respecto a la protección de los usuarios frente al ruido exterior, el CTE DB-HR establece los niveles de aislamiento acústico exigidos a los cerramientos que limitan con

el exterior, que son fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior. Para fijar dichos niveles, considera que el aislamiento acústico, que debe proporcionar una fachada o cubierta, es la diferencia entre el nivel de inmisión exterior existente o previsto en la zona donde se ubica el edificio y el nivel de inmisión interior requerido para que, en los recintos interiores, los usuarios puedan realizar sus actividades con comodidad. En este sentido se tienen en cuenta estos tres aspectos (España, 2007a):

1. Los objetivos de calidad acústica ambiental de las diferentes áreas acústicas fijados por la Ley del Ruido y establecidos en el RD 1367/2007. Estos objetivos son valores límite para los índices de ruido ambiental que no deben ser sobrepasados.
2. La existencia de mapas de ruido que están a disposición del público, lo que significa que, los niveles de ruido de determinadas zonas, son conocidos.
3. Los objetivos de calidad acústica interior, que son los valores límite de inmisión que no deben superarse en el interior de los edificios, establecidos en el RD 1367/2007.

Aparte de la inmisión por ruido ambiental del exterior, los objetivos de calidad acústica interior se refieren además a la inmisión por el ruido de las instalaciones del edificio. El CTE DB HR aborda las instalaciones desde dos aspectos:

1. Desde el punto de vista del diseño de las instalaciones, exigiendo que se limite la potencia acústica de los equipos de las instalaciones, para que no se sobrepasen los objetivos de calidad acústica interiores.
2. Desde un punto de vista puramente constructivo, dando una serie de condiciones constructivas que limitan la transmisión de ruido y vibraciones a través de las sujeciones o puntos de contacto entre las instalaciones y los elementos constructivos.

Como propuesta para adecuar los edificios a las exigencias del CTE DB-HR, surge el Catálogo de Elementos Constructivos (CEC), documento oficial que facilita el cumplimiento de las exigencias generales de diseño de los requisitos de habitabilidad: salubridad, protección frente al ruido y ahorro de energía, establecidas en el CTE. Básicamente, se puede decir que es un compendio de diferentes materiales, productos y elementos constructivos caracterizados por sus prestaciones higrotérmicas y acústicas.

No es un conjunto de soluciones constructivas, sino de elementos constructivos. Estos no son válidos para cualquier situación, ya que el catálogo no informa de las situaciones en que pueden utilizarse. Sin embargo, las prestaciones higrotérmicas y acústicas de elementos y sistemas constructivos que contiene permiten, junto con el CTE DB-HR, definir soluciones constructivas concretas que cumplan con las exigencias básicas específicas de cada caso.

Algunos de los materiales acústicos a los que hace referencia el CEC son lanas minerales, fibras sintéticas, poliestireno expandido (EPS) y poliestireno expandido elastificado (EEPS), espuma de polietileno expandido (PE-E) o reticulado (PE-R), espumas de poliuretano (PU), etc. Estos materiales, incluidos dentro de las soluciones constructivas que se indican en el CEC, debido a sus propiedades acústicas, garantizan una disminución de los niveles de ruido aislando o acondicionando los recintos en los que habitan las personas (Bravo *et al.*, 2002; Sgard *et al.*, 2005; Guillén *et al.*, 2008; Wu, 2009; Rasmussen y Rindel, 2010; Doutres y Atalla, 2011).

El CTE DB-HR indica que estos materiales, empleados en la construcción, y cuyo fin último es la reducción del ruido, deben estar caracterizados por sus propiedades acústicas, siendo estas debidamente proporcionadas por los fabricantes. Estas propiedades son:

- Resistividad al flujo del aire, r , en kPa s m^{-2} , obtenida según la Norma UNE EN 29053 (UNE EN 29053, 1994), y la rigidez dinámica, s' , en MN m^{-3} , obtenida según la Norma UNE EN 29052-1 (UNE EN 29052-1, 1994) para el caso de productos de relleno de las cámaras de los elementos constructivos de separación.
- Rigidez dinámica, s' , en MN m^{-3} , obtenida según UNE EN 29052-1 (UNE EN 29052-1, 1994) y la clase de compresibilidad, c , obtenida según UNE EN 12431. (UNE EN 12431, 2013), en el caso de productos aislantes de ruido de impactos utilizados en suelos flotantes y bandas elásticas.
- Coeficiente de absorción acústica, α , como mínimo para las bandas de octava de 500, 1000 y 2000 Hz y el coeficiente de absorción acústica medio α_m , en el caso de productos utilizados como absorbentes acústicos. Si no se dispone del valor

del coeficiente de absorción acústica medio α_m , se podría facilitar el valor del coeficiente de absorción acústica ponderado, α_w .

Sin embargo, el empleo de estos materiales conlleva algún que otro inconveniente. Son materiales que requieren un alto consumo de combustibles fósiles para su producción, además de ser cada vez más escasos y costosos; aumentan la contaminación ambiental debido a que, en su proceso de combustión, emiten grandes volúmenes de gases nocivos contaminantes a la atmósfera y carecen de la suficiente resistencia estructural como para estar expuestos a ambientes agresivos (Vasina *et al.*, 2006), por lo que necesitan ser protegidos mediante estructuras que pueden llegar a resultar excesivamente costosas. Además, una mala manipulación de estos materiales puede llegar a ocasionar problemas cancerígenos y respiratorios (Maxim *et al.*, 2003; Marsh *et al.*, 2011).

En este marco, se hace necesario el desarrollo de productos alternativos que cumplan con los requerimientos acústicos establecidos en el CEC y que, además, presenten otras cualidades que faciliten un modelo de construcción sostenible. Dentro de estas cualidades, se pueden destacar una vida útil elevada, precio reducido, valorizables, no contaminantes, con un bajo consumo de energía en su fabricación, valor cultural, procedentes del reciclado de otros materiales, etc.

Estos materiales pueden ser aquellos que directamente proporciona la naturaleza, y que se han empleado en la edificación durante miles de años, o aquellos materiales que se elaboran a partir de escombros y de residuos sólidos industriales, que sustituyen el consumo creciente de materias primas, reduciendo el aumento de los costes de fabricación y resultando más económicos que los materiales tradicionales de construcción. El uso de este tipo de materiales para el desarrollo de materiales absorbentes de ruido o láminas elásticas podría resolver dos problemas ambientales, el ruido y la contaminación medioambiental. Todo esfuerzo para la obtención de nuevos productos, más respetuosos con el medio ambiente, debe ser el punto de partida para lograr una mayor sostenibilidad medioambiental.

Con el estudio de nuevos materiales acústicos elaborados a partir de la valorización de diferentes tipos de residuos y materiales naturales, se pueden obtener materiales con los que pueda llegar a alcanzarse un comportamiento acústico al menos equiparable a los actualmente empleados en la construcción, pudiendo llegar, incluso, a sustituir a los ya

existentes. Los materiales de partida empleados en nuestra investigación serán los residuos procedentes de los neumáticos (caucho, fibras textiles y metálicas), el corcho (procedente de los subproductos del proceso de preparación y transformación de los tapones) y materiales naturales (arcillas de baja densidad, sin aglutinar y aglutinadas con resinas de tipo poliuretano, epoxi y acrílica).

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta Memoria de Tesis Doctoral es desarrollar y caracterizar nuevos materiales acústicos que, fabricados a partir de residuos o materiales naturales, puedan presentar un comportamiento acústico comparable al que presentan los materiales tradicionales actualmente empleados en la edificación (lanas de roca, fibra de vidrio, espumas de poliuretano, etc.), pudiendo, incluso, llegar a sustituirlos.

Las posibles aplicaciones de estos materiales van encaminadas a productos para su uso como absorbentes acústicos (acondicionamiento) o como láminas elásticas en suelo flotante (aislamiento).

Para lograr tal propósito, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Obtener las propiedades físicas y mecánicas más representativas con las que se pueden caracterizar acústicamente los materiales absorbentes acústicos y las láminas elásticas, obtenidos a partir de diferentes tipos de materiales naturales y reciclados.
- Evaluar el comportamiento acústico de estos materiales absorbentes acústicos de nueva generación (reciclados, naturales, etc.) mediante el empleo de modelos de predicción del comportamiento acústico de materiales, porosos y fibrosos, tomando como parámetros de entrada las propiedades no acústicas de los materiales (porosidad, tortuosidad o resistencia al flujo de aire).
- Evaluar, mediante la experimentación en laboratorio, las propiedades acústicas de los materiales absorbentes acústicos desarrollados, comparándolas con los valores de los materiales tradicionalmente empleados en la actualidad.

1.3. Estructura de la Memoria de Tesis Doctoral

Para la consecución de los objetivos expuestos en el apartado anterior, se ha optado por estructurar este trabajo en cinco capítulos. A continuación se describen brevemente.

En el capítulo 1, se realiza una descripción de los objetivos a conseguir en esta Memoria de Tesis Doctoral y una introducción en la que se expone, con cierto grado de detalle, la legislación, nacional e internacional, que ha desembocado en la necesidad de emplear cierto tipo de materiales acústicos, con determinadas propiedades, para minimizar la contaminación por ruido a la que está expuesto el ser humano.

En el capítulo 2, se exponen los fundamentos teóricos necesarios para una mejor comprensión de las aportaciones realizadas en esta Memoria de Tesis Doctoral. En él se detallan los conceptos básicos en el ámbito de la Acústica de la Edificación, como son el Aislamiento Acústico y el Acondicionamiento Acústico, los materiales acústicos principalmente empleados en este ámbito y los materiales sostenibles que se van a emplear en esta Memoria de Tesis Doctoral, para alcanzar los objetivos de esta Memoria. Además se realiza una pequeña retrospectiva, mediante la revisión de varios trabajos internacionales que se han seleccionado y resumido en este capítulo, acerca del empleo, como materiales acústicos en edificación, de materiales naturales y reciclados. También se detallan las propiedades acústicas y no acústicas que precisa todo material acústico para poder evaluar su comportamiento acústico. Dentro de las propiedades no acústicas, podemos diferenciar entre propiedades físicas y mecánicas; ya que, en función del uso que se le va a dar al material, aislamiento o acondicionamiento, necesita caracterizarse de una forma u otra. En cuanto a las propiedades acústicas, se detallan los conceptos de absorción e impedancia acústica y el método de laboratorio más comúnmente empleado para obtenerlas. Además, se realiza una breve recopilación de los modelos empíricos y teóricos que se emplean para la evaluación acústica de los materiales absorbentes acústicos de materiales porosos y fibrosos. En esta sección también se describe la metodología empleada para evaluar el comportamiento acústico frente a ruido de impactos, su modelización teórica y experimental en cámara normalizada.

En el capítulo 3, se detalla la metodología empleada para la consecución de los objetivos planteados en esta Memoria de Tesis Doctoral. En él se describen las

diferentes técnicas para la obtención de las propiedades, acústicas y no acústicas, y los modelos empíricos para poder determinar el comportamiento acústico de los diferentes materiales absorbentes porosos.

El capítulo 4, constituye el núcleo fundamental de esta Memoria de Tesis Doctoral, ya que, en él, se exponen los resultados más relevantes del trabajo de investigación desarrollado. Consta de seis apartados, en los que se compilan otros tantos trabajos de investigación, de los que cuatro ya han sido publicados en revistas internacionales indexadas, uno, pendiente de publicar y el último, aún, en la revisión inicial. En ellos se aborda el estudio del comportamiento acústico de diferentes tipos de materiales para diferentes tipos de soluciones, bien para su empleo como láminas elásticas en suelos flotantes, bien como materiales absorbentes para acondicionamiento acústico.

Por último, en el capítulo 5, se exponen las conclusiones obtenidas de los resultados de los diferentes trabajos de investigación.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo, se exponen los fundamentos teóricos necesarios para una mejor comprensión de las aportaciones realizadas en esta Memoria de Tesis Doctoral. En él se detallan dos conceptos básicos en el ámbito de la Acústica Arquitectónica, o Acústica de la Edificación, como son el Aislamiento Acústico y el Acondicionamiento Acústico. Posteriormente se hace un breve repaso de los tipos de materiales acústicos principalmente empleados en la actualidad para aislar o acondicionar los diferentes tipos de recintos. Se muestran los trabajos más relevantes respecto al uso de materiales sostenibles que se han desarrollado últimamente y que tienen como último fin ser introducidos en la construcción actual, además de los materiales sostenibles que se van a emplear en esta Memoria de Tesis Doctoral para alcanzar los objetivos descritos en el capítulo 1. También se detallan las propiedades acústicas y no acústicas que precisa tener todo material acústico para poder evaluar su comportamiento acústico. Dentro de las propiedades no acústicas, podemos diferenciar entre propiedades físicas y mecánicas, ya que, en función del uso que se le va a dar al material, aislamiento o acondicionamiento, este necesita caracterizarse de una forma u otra. En cuanto a las propiedades acústicas, se detallan los conceptos de absorción e impedancia acústica y el método de laboratorio más comúnmente empleado para obtenerlas. Además realiza una breve recopilación de los modelos empíricos y teóricos que se emplean para la evaluación acústica de los materiales absorbentes acústicos de materiales porosos y fibrosos. Por último, se describe la metodología empleada para evaluar el comportamiento acústico frente a ruido de impactos, mediante la mejora al aislamiento a ruido de impactos en cámara normalizada y mediante su modelización teórica.

2.1. Aislamiento y Acondicionamiento Acústico

Se entiende por Aislamiento Acústico al conjunto de procedimientos que se emplean para reducir o evitar la transmisión de ruido (aéreo y estructural) entre dos recintos o desde el exterior hacia el interior de un recinto y viceversa, con el fin de obtener una calidad acústica en el interior de los recintos. Cuando hablamos de aislamiento siempre se debe considerar dos recintos diferentes; es decir, considerar que el sonido que se genera en un recinto (recinto emisor) se transmite y es percibido en otro recinto (recinto receptor).

Dentro del aislamiento podemos distinguir entre aislamiento a ruido aéreo (entre recintos y de fachadas) y aislamiento a ruido de impactos. Ambos se pueden considerar como métodos pasivos para el control del ruido, siendo necesario establecer la naturaleza de estos ruidos y los caminos por los cuales penetran en el recinto receptor, a través de sus superficies límites. Por todo esto, es necesario conocer en qué medida el aislamiento acústico depende de las propiedades físicas del material de los paramentos y de las características del ruido.

Para lograr un aislamiento a ruido aéreo se debe evitar el camino de transmisión directo de las ondas acústicas entre los recintos emisor y receptor mediante la colocación de barreras, pantallas, paramentos, etc.

La transmisión de ruidos de impactos por las particiones horizontales en los edificios es una de las principales causas de molestias a sus usuarios. El ruido de impacto tiene un origen de carácter impulsivo generado como consecuencia del golpeo, por algún objeto, en el acabado de la partición horizontal. Todos los elementos constructivos conectados al forjado (tabiques, pilares, etc.) se convierten en elementos transmisores de vibraciones y, como consecuencia de esta vibración, transmisores de ruido aéreo. Debido a las condiciones de propagación y la absorción o amortiguación del sonido por unidad de longitud, éste se puede transmitir a muy largas distancias con escaso amortiguamiento.

Por Acondicionamiento Acústico se entiende el conjunto de medidas que se adoptan para conseguir en un recinto unas condiciones acústicas y un ambiente sonoro interior conformes al uso que se le va a dar al recinto.

Este término suele estar asociado a recintos de audición directa (teatros, salas de conferencia, salas de conciertos, etc.), para transmisión sonora por medio de sistemas electroacústicos y a recintos que utilizan sistemas de amplificación sonora (Recuero, 2001).

En estos recintos es necesario conseguir un campo sonoro adecuado para obtener un tiempo de reverberación que se mantenga dentro de un límite, con el objeto de no dificultar la transmisión o la percepción de la palabra, la música, etc. Para ello es

necesario realizar tratamientos acústicos mediante la colocación de materiales, con los que se logre obtener el campo sonoro deseado.

Desde la implantación del CTE DB-HR, de obligado cumplimiento, el Aislamiento y Acondicionamiento Acústico adquieren gran importancia en la construcción actual debido a que el usuario final cada vez es más sensible a los factores acústicos de su vivienda, ya que esto le afecta en su confort y calidad de vida.

2.2. Materiales acústicos empleados en la construcción

Los materiales y estructuras empleados para tratamientos acústicos son aquellos que presentan la propiedad de absorber o reflejar una parte importante de la energía de las ondas acústicas que inciden sobre ellos. Estos materiales se pueden clasificar, atendiendo a las propiedades físicas y estructurales que se considere, como se indica en la figura 2.1.

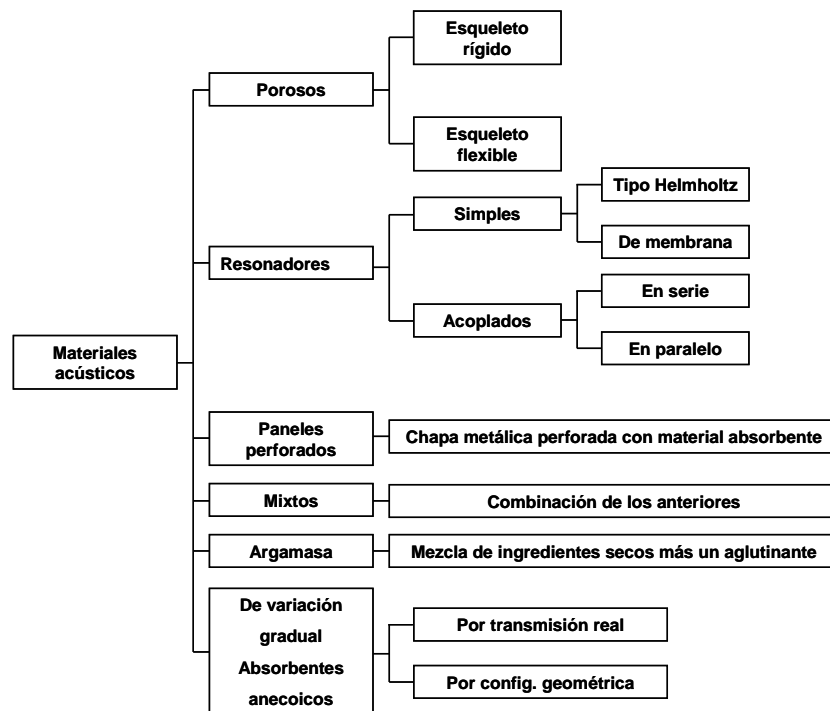


Figura 2.1. Esquema de materiales absorbentes según Recuero (2001).

Materiales porosos

Son de estructura granular o fibrosa. Su comportamiento depende, en gran medida, de su espesor y de la distancia de separación con la pared rígida. El espesor del material se

elige de acuerdo al valor del coeficiente de absorción deseado, viéndose reducido su coeficiente de absorción a bajas frecuencias. Su colocación, interponiendo un espacio entre el material y la pared, aumenta su absorción a bajas frecuencias. Se pueden subdividir en porosos rígidos y porosos de esqueleto flexible o poroelásticos.

Resonadores

Son materiales que presentan, principalmente, altos coeficientes de absorción a bajas frecuencias, en un ancho de banda relativamente reducido, mediante la vibración de determinadas estructuras. Estos materiales emplean una cavidad resonante para disipar la energía acústica en energía mecánica.

Materiales para argamasa

Materiales acústicos aplicados en estado húmedo con paleta o pistola que conforman superficies continuas con un espesor determinado. Se componen de un conjunto de materiales secos ligados con alguna resina o mortero.

Absorbentes suspendidos

Se emplean en recintos en los que hay pocas superficies para la colocación de materiales absorbentes. Tienen formas de láminas planas y se colocan verticalmente en hileras continuas. Su absorción se calcula en función de la absorción individual de cada uno.

Sistemas de paneles perforados

Se trata de paneles de aluminio o chapa perforada en cuyo interior se acopla una plancha de fibra mineral, siendo esta última, el elemento absorbente. Presentan un alto rendimiento como absorbente, modificando sus valores en función de la forma y número de perforaciones, densidad y espesor del elemento absorbente, así como de la distancia a la pared rígida.

Sistemas de paneles rígidos

Son paneles empleados para corregir problemas a bajas frecuencias creando un campo sonoro más difuso. Presentan ciertas ventajas frente a los materiales porosos, como la resistencia a los golpes, durabilidad, posibilidad de pintado o barnizado, etc.

Hoy en día son numerosos los materiales acústicos empleados en la construcción. Como ya se indicó con anterioridad, el catálogo de elementos constructivos del CTE DB-HR muestra un compendio de diferentes materiales, productos y elementos constructivos caracterizados por sus prestaciones higrotérmicas y acústicas.

Entre otros, los materiales a los que hace referencia para su uso como absorbente acústico o como láminas elásticas en suelo flotante son: lanas minerales, espuma de polietileno (expandido y reticulado), poliestireno expandido elastificado, con unos espesores y rigidez dinámica determinadas, para el caso de suelos flotantes, y lana mineral o fibras sintéticas y velos de fibras minerales, con espesores y resistencia al flujo determinados, para el caso de acondicionamiento.

Material	Componentes	α_m	Espesor (mm)
Acusticell (Acustica Integral)	Espuma de poliuretano expandido con tratamiento de compresión alveolar	0.77	25
Acustifiber F-15 (Acustica Integral)	Fibra de poliéster	0.44	15
Sonar (Rockfon)	Lana de roca con velo	0.60	60
Techo Acústico Cleaneo (Knauf)	Plenum de lana mineral más velo (15.5%)	0.70	65
IBR Desnudo (ISOVER)	Lana de vidrio	0.90	80
ARENA Absorción (ISOVER)	Lana mineral con velo de vidrio	0.70	40
URSA Terra 45 (URSA)	Lana mineral	0.80	45

Tabla 2.1. Composición, coeficiente de absorción y espesor de algunos de los principales paneles absorbentes empleados en la actualidad en la construcción.

Los materiales absorbentes porosos más utilizados en construcción han sido, tradicionalmente, la lana de roca y la fibra de vidrio, que son productos filamentosos naturales obtenidos por un proceso industrial. En este proceso la materia pasa por unos diminutos orificios de un sistema rotatorio que gira a gran velocidad y que genera unos finos hilos flexibles que, al enfriarse, se entrelazan entre sí por medio de una resina termo-endurecible, formando una malla que mantiene el aire en su interior en estado inmóvil. La diferencia entre la lana de roca y la fibra de vidrio es que la materia prima

2. Fundamentos teóricos

de la primera es roca de basalto molida y fundida, y en la segunda, arena silíceas. Esta estructura permite conseguir productos muy ligeros con alto nivel de aislamiento térmico, absorción acústica y resistencia contra el fuego. Sin embargo, estos materiales carecen de la suficiente resistencia estructural y requieren ser recubiertos de ciertas protecciones cuando se expone a los elementos ambientales, por lo que resultan costosos (Vasina *et al.*, 2006).

La Asociación de Fabricantes Españoles de Lana Mineral (AFELMA) reúne a muchas de las empresas del sector (Saint-Gobain Cristaleria, S.A. (ISOVER), Rockwool Peninsular, S.A., Ursa Ibérica Aislantes, S.A., Knauf Insulation, S.L.). Estos fabricantes, presentan en sus catálogos numerosos productos con unas propiedades acústicas adecuadas para su uso en el acondicionamiento acústico (Tabla 2.1).

Material	Componentes	ΔL (dB)	Espesor (mm)
Texsilen Plus 5 (TEXSA)	Polietileno expandido de celda cerrada	23	5.0
Trosilen AL-3	Polietileno expandido con film de aluminio	16	3.0
Inasonic 120/20 (INASEL)	Espuma de poliuretano expandido	27	20.0
ImpactoDAN (DANOSA)	Polietileno reticulado	25	10.0
ConforDAN (DANOSA)	Polietileno reticulado de celda cerrada	18	3.0
ChovAIMPACT Plus (ChovA)	Polietileno de celda cerrada	24	9.0
ChovAIMPACT AR 10 (ChovA)	Polietileno no reticulado de celda cerrada	34	10.0
ChovAIMPACT AR 5 (ChovA)	Polietileno no reticulado de celda cerrada	20	5.0
Panel PST (ISOVER)	Lana de roca	22	22.0
Ultracoustic Floor TP (Knauf)	Lana mineral aglomerada con resina	26	20.0
Ultracoustic Floor TPT 01 (Knauf)	Lana mineral	33	20.0

Tabla 2.2. Composición, mejora a ruido de impacto y espesor de algunas de las principales láminas elásticas empleadas en la actualidad en la construcción.

Para lograr una reducción de la transmisión del ruido de impacto y de las vibraciones en la actualidad se emplean dos métodos; mediante la colocación, sobre la superficie a aislar, de un material elástico muy flexible, con un espesor adecuado para que tenga función, al mismo tiempo, de acabado final, o bien, desolidarizar la superficie a aislar del resto de la estructura (suelos flotantes). Como revestimientos de suelos se suelen utilizar moquetas de diferentes espesores, productos vinílicos en varias capas o parquet o tarimas flotantes. Los materiales que se suelen utilizar para la realización de suelos flotantes son el polietileno expandido, lana de roca o fibra de vidrio, poliestireno expandido elastificado, espumas de poliuretano de alta densidad, caucho o corcho aglomerado con goma. Con este tipo de soluciones, se pueden introducir mejoras del índice de ruido de impacto de entre 15 y 35 dB (Tabla 2.2).

2.3. Materiales sostenibles

El empleo de materiales obtenidos directamente de la naturaleza, o de la valorización de residuos, para su uso como materiales acústicos en la construcción, es una línea de investigación ampliamente desarrollada por diferentes grupos de investigación, a escala mundial, durante las últimas siete décadas.

En los últimos años, ha habido un crecimiento del uso de diferentes tipos de materiales para mejorar el Aislamiento y Acondicionamiento Acústico en la Edificación, con espesores de particiones no excesivos. La variedad actual es importante, desde las ya tradicionales lanas minerales y espumas de poliuretano, a las últimas tendencias introducidas, como son diferentes tipos de láminas y fieltros, monocapas o sándwiches, que se introducen en configuraciones multicapa para producir esta mejora, además de la valorización de diferentes tipos de residuos (Lee y Changwhan, 2003; Schiavi *et al.*, 2007a).

Hoy en día existe un considerable interés en el desarrollo de materiales sostenibles procedentes de la biomasa (Ersoy y Küçük, 2009; Ramis *et al.*, 2010; Oldham *et al.*, 2011) o del reciclado de diversos tipos de materiales (Rushforth *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2007; Del Rey *et al.*, 2011). Estos materiales pueden presentar un comportamiento acústico comparable y, en algunos casos, incluso superior a los materiales tradicionalmente empleados en edificación. Así pues, el desarrollo de materiales a partir de ciertos tipos de residuos, como son los neumáticos o el corcho, o de materiales

naturales, como las arcillas expansivas, para producir materiales acústicos absorbentes o láminas anti-impacto, puede ayudar a resolver dos de los mayores problemas ambientales en la actualidad, el ruido y la contaminación medioambiental.

Con la valorización y reutilización de este tipo de residuos, se podría llegar a eliminar una parte sustancial de los residuos de estos materiales, además de disminuir el coste fabricación de los nuevos materiales, al no tener que partir desde cero en la obtención de la materia prima. Por ello, centrar los esfuerzos para obtener nuevos materiales más sostenibles sería un punto básico de partida para lograr una mayor sostenibilidad ambiental.

Algunos de estos materiales tienen propiedades conocidas desde hace tiempo; pero, en cambio, otros de nueva generación, como, por ejemplo, los diferentes tipos de materiales reciclados, con mezclas de caucho (Jimenez-Espadafor *et al.*, 2011) o fibra textil (Rushforth *et al.*, 2005), materiales naturales, etc., necesitan de una caracterización en detalle para poder, posteriormente, prever su comportamiento.

En cuanto al empleo de materiales procedentes directamente de la naturaleza, estos juegan un papel importante ya que, generalmente, se precisa un gasto de energía menor para su fabricación que la que se necesita para los materiales acústicos convencionales. Asdrubali (2007) presenta un estudio de las características y las propiedades acústicas de materiales naturales empleados en el control del ruido y un análisis de los procedimientos para evaluar la sostenibilidad de estos. Ersoy y Küçük (2009) muestran que, materiales elaborados con fibras procedentes de las hojas de té presentan valores del coeficiente de absorción elevados para muestras con reducidos espesores. Hosseini Fouladi y colaboradores estudian el comportamiento acústico de paneles multicapa fabricados con fibra de coco (Hosseini Fouladi *et al.*, 2010). Estos mismos autores estudian el comportamiento acústico de la fibra de coco aglutinada con determinados aditivos comerciales para mejorar ciertas propiedades como la rigidez, inflamabilidad o su comportamiento frente a los hongos (Hosseini Fouladi *et al.*, 2011). Glé y colaboradores estudian las propiedades acústicas de materiales elaborados con cáñamo (Glé *et al.*, 2011). Oldham y colaboradores estudian el comportamiento acústico de materiales porosos absorbentes elaborados con fibras de algodón, lana o jute,

comprobando que los datos experimentales se ajustan de forma adecuada al modelo de Delany y Bazley para diámetros de fibra inferiores a 60 μm (Oldham *et al.*, 2011).

La arlita, perlita y vermiculita se emplean normalmente como aligerantes en productos para el sector de la construcción, especialmente en hormigones, sustituyendo parcial o totalmente a los áridos que forman parte de la mezcla. Las ventajas que presenta el uso de arcillas expandidas se debe a su reducida densidad, junto con una relativamente alta resistencia estructural, alta estabilidad físico-química y bajo coste. Además, las arcillas pueden ser consideradas más aceptables desde el punto de vista de la salud y más adecuadas para ser utilizadas en un entorno químico y físicamente agresivo.

En anteriores trabajos, Asdrubali y Horoshenkov (2002) caracterizan experimental y teóricamente el comportamiento acústico de granos de arcilla expandida sin aglutinar, mostrando que la porosidad conectada o abierta, formada por la porosidad intraparticular y la porosidad entre los propios granos, es una propiedad importante que interviene en el comportamiento acústico de este tipo de material.

Vasina y colaboradores también han estudiado las propiedades acústicas de granos de arcilla expandida consolidadas mediante un aglutinante cementoso y demuestran que presentando un tamaño característico de la partícula por debajo de 3.5 mm, este material absorbente poroso presentaba un buen comportamiento acústico (Vasina *et al.*, 2006). Bartolini y colaboradores estudian materiales compuestos por arcillas expandidas y resinas epoxi y demuestran que es posible obtener un nuevo material absorbente poroso, con una proporción en peso de resina del 10%, que se caracteriza por un buen comportamiento acústico y una alta resistencia mecánica (Bartolini *et al.*, 2010).

En cuanto a la valorización de ciertos tipos de residuos generados por la industria, como los procedentes de los neumáticos fuera de uso, la Asociación Europea de Reciclado de Neumáticos, ETRA (2006), elabora un informe en el que muestra que se generan más de tres millones de toneladas de neumáticos de desecho en los Estados Unidos y, en el caso de China, más de 5.2 millones de toneladas (Li *et al.*, 2010). Aiello y colaboradores muestran que el uso de las fibras de acero, procedentes de los neumáticos de desecho, como fibras de refuerzo en el hormigón, presenta una interesante potencialidad, debido a la capacidad que presentan las fibras para mejorar las prestaciones mecánicas del hormigón de manera similar a las fibras de acero industrial (Aiello *et al.*, 2009). Li y

colaboradores demuestran que en la actualidad existen numerosos métodos para tratar y reutilizar los neumáticos fuera de uso (End of Life Tyres, ELTs) (Li *et al.*, 2010). Entre estos métodos destacan el recauchutado, la trituración, desvulcanización dinámica, la pirolisis y extracción de aceites, etc. Otra opción es la recuperación del neumático mediante un triturado inicial seguida de una separación electromagnética de sus componentes que permite separar las fibras de acero de las partículas de caucho.

Otros estudios proponen el uso de residuos de neumáticos para proveer alternativas a productos existentes en un gran número de aplicaciones para el control de ruido ambiental. Estudios recientes de diferentes autores, que citaremos a continuación, han demostrado que los granulados poliméricos procedentes del reciclado de neumáticos fuera de uso pueden ser transformados en materiales con interesantes propiedades acústicas.

Pfretzschner y Rodríguez (1999) y Rodríguez Montejano (2004) verifican que la granza de caucho puede llegar a ser un buen absorbente de ruido, dentro del espectro de absorción de banda ancha, siendo una excelente alternativa a los materiales utilizados en las actuales pantallas acústicas empleadas para la protección contra el ruido de tráfico, contribuyendo, al mismo tiempo al reciclado de este tipo de producto. Swift y colaboradores demuestran que estos materiales pueden absorber eficazmente el ruido si el tamaño del agregado y el contenido de aglutinante son seleccionados cuidadosamente y su espesor está de acuerdo al intervalo de frecuencias de interés (Swift *et al.*, 1999). Horoshenkov y Swift (2000) muestran que la aplicación de un porcentaje determinado de resina presenta un efecto considerable en las propiedades acústicas de materiales absorbentes fabricados con granza de caucho. Hong y colaboradores demuestran que materiales porosos absorbentes, elaborados con partículas de caucho reciclado, presentan buenas propiedades como aislantes al ruido, incluyendo un bajo coste en su fabricación, con un espesor reducido y con un proceso de fabricación relativamente sencillo (Hong *et al.*, 2007). Otro trabajo realizado por Jiménez-Espadafor y colaboradores sugiere que, los residuos de la fibra textil empleada en los neumáticos (fluff) mezclados, en las mismas proporciones, con determinados adhesivos en caliente, se pueden emplear para fabricar planchas acústicas, utilizadas en techos suspendidos, con coeficientes de absorción acústica elevados (Jiménez - Espadafor *et al.*, 2011).

En el caso de materiales para la atenuación del ruido de tráfico, Han y colaboradores comprueban que las mezclas de granos de caucho presentan una alternativa, potencialmente viable, a las pantallas acústicas fabricadas con hormigón que se emplean en la actualidad (Han *et al.*, 2008). Paje y colaboradores demuestran que el comportamiento acústico de asfaltos fabricados con mezclas bituminosas, en los que se incorpora el polvo de neumático como árido fino, logran reducir los niveles de ruido hasta en 2 dBA (Paje *et al.*, 2010).

En el caso de aislamiento a ruido de impacto, el trabajo de Rushforth y colaboradores muestra que, determinadas láminas elásticas, presentan un excelente comportamiento acústico manteniendo una relación óptima entre los granos de caucho y la fibra (Rushforth *et al.*, 2005).

Muchos de estos trabajos, comprueban que los materiales porosos granulares, pueden ser empleados, como alternativa a numerosos materiales absorbentes de naturaleza fibrosa o espumosa, en sus aplicaciones tanto para interior como para exterior. Estos materiales absorbentes presentan un buen comportamiento acústico como absorbentes y, además, unas buenas propiedades mecánicas y un bajo coste de fabricación, aspectos necesarios e importantes, también, para su aplicación en construcción y rehabilitación. Las propiedades que presentan estos materiales granulares son de gran importancia en muchas áreas de la acústica y control de ruido. Éstos, en combinación con cemento, resinas poliuretano o epoxi, presentan unos buenos niveles de resistencia estructural y durabilidad, además de presentar valores de absorción acústica relativamente buenos (Neithalath *et al.*, 2004; Kim y Lee, 2010; Benkreira *et al.*, 2011; Shebl *et al.*, 2011). Dentro de los materiales granulares estudiados están; la granza de caucho (Pfretzschner y Rodríguez, 1999; Horoshenkov y Swift, 2001); ciertos tipos de áridos (Horoshenkov y Swift, 2001); cáñamo (Glé *et al.*, 2011) y las arcillas expandidas (Vasina *et al.*, 2006; Bartolini *et al.*, 2010).

Los materiales de partida en esta Memoria de Tesis son los neumáticos fuera de uso (procedentes de los vehículos pesados), el corcho (sobrante procedente de la fabricación de tapones de corcho) y arcillas tipo perlita, arlita o vermiculita.

Neumáticos fuera de uso (NFUs).

La sociedad de consumo en la que vive hoy en día el ser humano tiene una gran dependencia de los vehículos motorizados, lo que ha ido provocando una serie de consecuencias e impactos ambientales durante las últimas décadas. Una de estas consecuencias es el exponencial crecimiento de los neumáticos al final de su vida útil. Este residuo, sin llegar a ser considerado peligroso, precisa de una regulación específica, debido, entre otros factores, a que no se trata de un material biodegradable y a su potencial peligrosidad respecto a su capacidad calorífica que, en caso de incendio, puede ocasionar graves problemas medioambientales, debido a las emisiones de gases que presenta, etc. En España, la tasa media de producción de NFU es superior a 7 kg por habitante y año, lo que significa que se generan más de 300000 toneladas, de las que aproximadamente el 50% se destinan al vertido. Es decir, anualmente se suman 150000 toneladas a las más de 5 millones ya almacenadas. Del resto, se recicla el 13.9%, el 12.2% se destina a recauchutado, el 17.2% a valorización energética y el 6.4% se exporta o reutiliza (Martínez Morán *et al.*, 2004).

Los componentes con los que se fabrican los neumáticos están pensados para que estos puedan soportar condiciones ambientales y físicas extremas, por lo que el tiempo de degradación es muy elevado. La tabla 2.3 muestra información relativa a los componentes principales de los que constan los neumáticos de vehículos pesados y de turismos.

La gestión de los neumáticos fuera de uso está regulada por la Ley 10/1998 Básica de Residuos (España, 1998) de forma general y, en particular, por el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006 (España, 2001) y el Real Decreto 1619/2005 sobre gestión de NFU para regular las obligaciones de los agentes económicos que intervienen en todas sus fases y las condiciones generales de gestión de estos residuos (España, 2005b). En el año 2008 se redacta el II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2008-2015 (II PNFU), como revisión del PNNFU 2001-2006, en el que se establecen nuevos objetivos ecológicos para la gestión de los neumáticos fuera de uso (España, 2009).

Componentes	Turismos (%)	Vehículos pesados (%)	Función
Caucho y elastómeros	48.0	45.0	Estructural - deformación
Negro de humo	22.0	22.0	Mejora de propiedades físicas
Acero	15.0	25.0	Formación esqueleto estructural
Aditivos (óxido de Zinc, azufre, etc.)	10.0	8.0	Catalizador, vulcanización
Textiles	5.0	0.0	Formación esqueleto estructural
Peso (kg)	6.5-9.0	55.0-80.0	

Tabla 2.3. Componentes de los neumáticos de turismos y vehículos pesados (European Tyre recycling Association, ETRA, www.etra-eu.org).

A partir de la entrada en vigor del Real Decreto 1619/2005 sobre la gestión de los Neumáticos Fuera de Uso, y basándose en su aplicación, se constituyen dos Sistemas Integrados de Gestión (SIG), Signus Ecovalor, creado legalmente el 19 de mayo de 2005 que agrupa a la mayor parte de los fabricantes de neumáticos del mercado nacional, y Tratamiento de Neumáticos Usados (TNU), gestionado por ASINME y constituido el 13 de julio de 2006, y en el que participan gran parte de los importadores de neumáticos. Su objetivo final es prevenir la generación de neumáticos fuera de uso, fomentar su reducción, reutilización, reciclado y valorización.

Algunas de las aplicaciones de reutilización o reciclado de los componentes del NFU son la reutilización en la fabricación de nuevos neumáticos, incorporando hasta un 10% de caucho reciclado sin que altere sus prestaciones y calidad, la desvulcanización (Kojima *et al.*, 2005; Jana *et al.*, 2006; Feng e Isayev, 2006), la fabricación de mezclas bituminosas para pavimentos de carreteras, mediante el empleo del Ground Tyre Rubber (GTR) como parte del material ligante o capa selladora del asfalto, caucho asfáltico, o como árido, hormigón de asfalto modificado con caucho (Chui-Te, 2008; Guo *et al.*, 2014) o en la industria cementera (Xiang y Baoshan, 2013). Respecto a la valorización energética, el caucho del neumático lleva asociado un poder calorífico muy elevado, lo que le convierte en un combustible de sustitución, apto para usos industriales de gran

demanda energética (Lee *et al.*, 1995; Mastral *et al.*, 2000), valorización en hornos de cemento previo triturado y en la industria siderúrgica.

La valorización de los principales compuestos del neumático, caucho granulado o polvo, acero o compuestos textiles, estos últimos casi nula, se ha introducido en aplicaciones, como la utilización de neumáticos enteros en arrecifes, la utilización de neumáticos triturados como material de relleno en campos de hierba artificial o su inclusión en materiales bituminosos.

Corcho

El corcho se extrae de la corteza del alcornoque o *Quercus suber L.*, una especie autóctona de clima Mediterráneo (en la Península Ibérica se desarrolla en un gran triángulo formado por Portugal, Extremadura, Andalucía y Cataluña), de crecimiento lento, que vive entre 150 y 200 años (Montero y Cañellas, 2003), caracterizándose por ser un material renovable, biodegradable y que adsorbe CO₂ en su proceso de producción natural, a diferencia de otros materiales que se están utilizando en la actualidad.

Los alcornocales constituyen ecosistemas de gran riqueza, debido a su diversidad vegetal y animal, que representan espacios vitales para especies amenazadas, además de estar relacionados con importantes funciones ecológicas, como la conservación de suelos y la retención de carbono. Por este motivo, los alcornocales figuran entre los hábitat más valorados de Europa y están dentro del ámbito de aplicación de la Directiva de Hábitats de la Unión Europea.

El corcho es un tejido vegetal homogéneo, formado por células muertas organizadas a modo de colmena, lo que hace de él un material característico por su ligereza (volumen celular vacío cercano al 90%), elasticidad (retoma su forma y posición después de ser sometido a presión, esto favorece su uso como pavimento), compresibilidad (cede fácilmente a una presión), impermeabilidad (ausencia casi total de capilaridad; absorción de agua por volumen inferior al 3%), aislante térmico (conductividad térmica entorno a 0.040 WmK), durabilidad (mantiene sus cualidades más de 50 años), una buena estabilidad dimensional, un buen comportamiento ante el fuego (Euroclase E), gran resistencia a los agentes químicos y fácil aplicación.

La utilización industrial del corcho en los países mediterráneos se viene desarrollando desde hace más de dos siglos, en tres etapas diferentes:

1. Desde los inicios de la industria corcho-taponera, hasta finales del siglo XIX, se desarrolla una industria de monoproducto con la elaboración del tapón de corcho natural.
2. La invención del corcho aglomerado, a finales del siglo XIX, supone una importante innovación, ya que incrementa la versatilidad de este material (el corcho podía adoptar diversas formas y volúmenes), permitiendo el aprovechamiento de los desperdicios de materia primera y acelerando la mecanización de la industria corchera, transformando el obrador tradicional en fábrica. La industria corchera se diversifica, gracias a las nuevas aplicaciones derivadas de la utilización del corcho aglomerado, destacando su uso como material aislante y de revestimiento. De esta forma, en la década de 1920, España exporta mucho más corcho aglomerado que tapones de corcho natural y los productos corcheros llegan a representar más de 7% de las exportaciones españolas (Parejo, 2009).
3. La entrada en el mercado de los materiales sintéticos (especialmente derivados del petróleo) como sustitutos del corcho, a partir de 1950, en algunas de sus aplicaciones, marca el inicio de la tercera etapa. La aparición de materiales alternativos supone el fin del proceso de diversificación productivo iniciado en la etapa anterior y la centralización de la industria corchera en la fabricación del tapón de corcho. Durante el año 2009, Portugal vende unos 40000 kg de corcho aglomerado destinado a la construcción, frente a los 77000 kg de tapones de corcho; mientras que en España estos valores son inferiores a 2500 kg en el caso del corcho para la construcción y 35000 kg de tapones de corcho (Gafo y Nogueira, 2010).

La producción del sector corchero, en la actualidad, está focalizada hacia el tapón de corcho, sobretodo natural, eje sobre el que giran todos los procesos productivos relacionados. A expensas de esta producción, el corcho no apto se deriva hacia procesos encaminados a la fabricación de otro tipo de productos (arandelas, láminas, suelas, etc.), y los subproductos del proceso de preparación y transformación alimentan la industria del granulado (Figura 2.2).

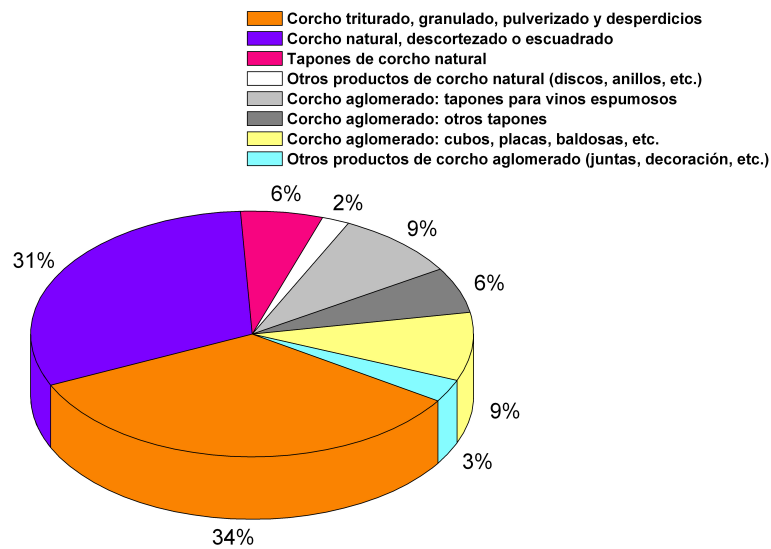


Figura 2.2. Distribución de los usos de granulado de corcho.

Arcillas expansivas

La arlita, perlita y vermiculita se emplean preferentemente como aligerantes en productos para el sector de la construcción, especialmente en hormigones, sustituyendo parcial o totalmente a los áridos que forman parte de la mezcla, y se comercializan con diferentes granulometrías.

La arlita es una mezcla arcillosa (silicatos de aluminio hidratados) que, sometida a altas temperaturas, se expande por la transformación de agua en vapor. El incremento de volumen experimentado en el proceso térmico incrementa el volumen inicial de la arcilla hasta en cinco veces, presentando una densidad, una vez expandida, entre 325 a 750 kg m⁻³.

La arlita es un agregado ligero de la empresa española Optiroc Áridos Ligeros, S.A. Existen varias variedades de Arlita, cada una con diferentes aplicaciones (G3 empleada en aislamiento, aplicaciones geotécnicas, jardinería y horticultura; F3 para estructuras ligeras prefabricadas y hormigones ligeros; F5 para placas de hormigón y estructuras empleadas en construcción; A5 para morteros refractarios u hormigones ligeros; F7 para hormigones pretensados empleados en obra civil, etc.) (González-Corrochano *et al.*, 2009). Ray y colaboradores llevan a cabo investigaciones preliminares sobre la

utilización de residuos de perlita fina como una alternativa a los materiales cementosos suplementarios (Ray *et al.*, 2007).

La perlita es un mineral de origen volcánico y estructura amorfa formado por silicatos de aluminio y otros óxidos. Este mineral contiene un alto volumen de agua atrapado en su interior. Cuando el material se calienta, a temperaturas elevadas, el agua contenida se vaporiza, provocando una fuerte expansión que incrementa su volumen inicial hasta en 16 veces. La perlita expandida tiene una densidad entre 30–150 kg m⁻³.

La perlita se utiliza en diferentes áreas, tales como materiales de construcción, la agricultura, la medicina o la industria química (Torres y García-Ruiz, 2009). La perlita expandida se utiliza a menudo en el aligeramiento de hormigones. En comparación con otros materiales, tales como vermiculita expandida, arcillas expandidas, pizarras, piedras pómez o lanas minerales, la perlita expandida tiene la importante ventaja de presentar unos precios realmente competitivos.

Vermiculita es el nombre geológico que se da a un grupo de minerales formados a base de silicatos de aluminio, hierro y magnesio, de estructura laminar, semejantes a la mica. Estos minerales, sometidos a altas temperaturas, se expanden, formando copos debido a un proceso de exfoliación y expansión que puede incrementar su volumen original hasta 30 veces. Tiene una densidad entre comprendida entre 60 y 130 kg m⁻³.

Las vermiculitas han sido ampliamente investigadas por sus notables propiedades físicas y químicas: baja conductividad térmica y densidad, comportamiento refractario y alta capacidad de intercambio catiónico, propiedades que conducen a múltiples aplicaciones industriales (Marcos y Rodríguez, 2010).

2.4. Caracterización de materiales

Todo material tiene unas características físico-químicas que lo hace único, por lo que ningún material es idénticamente igual a otro en cuanto a su estructura microscópica. Los materiales, en cuanto a su comportamiento acústico, se pueden dividir en dos tipos: los constituidos por una única fase sólida y aquellos que presentan una fase sólida (esqueleto) y una fase fluida (el aire que se encuentra rodeando al esqueleto del material), denominados porosos.

El comportamiento vibroacústico de un material (aislamiento acústico, absorción acústica, etc.) viene determinado por su estructura microscópica, siendo ésta relativamente compleja al no ser homogénea; por tanto, para poder definirlos de una forma más sencilla, los materiales se estudian en base a su estructura macroscópica.

La estructura macroscópica puede caracterizarse por parámetros que no dependen del espesor del material ni de la frecuencia acústica. Estos parámetros se relacionan con las propiedades acústicas del material (coeficiente de absorción acústica, aislamiento acústico, etc.) por medio de modelos matemáticos que evalúan teóricamente el comportamiento acústico del material.

Por otro lado, las propiedades intrínsecas del material están condicionadas por las condiciones de fabricación (proporciones entre los diferentes componentes que conforman el material, método de fabricación, etc.).

El fin en el diseño de materiales acústicos absorbentes es poder obtener ciertas propiedades extrínsecas acústicas mediante el control de las condiciones iniciales de fabricación. No sólo es importante la relación entre cada tipo de variable, sino conocer cuáles de las variables que podemos controlar (parámetros de fabricación) tienen realmente un efecto destacable sobre las propiedades acústicas finales.

Existen tres tipos de transmisión de ondas acústicas en los materiales porosos, mientras que, en el caso de materiales sólidos, sólo existen las dos primeras de las que se citan a continuación:

- Compresión del marco estructural: Ondas longitudinales vibratorias.
- Cortante del marco estructural: Ondas de flexión vibratorias.
- Compresión del fluido en el material: Ondas longitudinales acústicas.

El comportamiento de estos tipos de ondas en los materiales porosos está condicionado por las siguientes propiedades:

- Propiedades del fluido:
 - Densidad del fluido.
 - Velocidad del sonido en el fluido.

- Viscosidad cinemática.
- Constante adiabática.
- Número de Prandtl.
- Propiedades mecánicas de la estructura del material poroso:
 - Densidad.
 - Modulo de elasticidad.
 - Coeficiente de Poisson.
 - Factor de pérdidas.
- Propiedades estructurales acústicas de la componente porosa del material:
 - Resistencia al flujo de aire.
 - Porosidad.
 - Tortuosidad.
 - Longitud característica viscosa.
 - Longitud característica térmica.
 - Forma de poro y distribución del tamaño de poro.

Las propiedades estructurales acústicas de la componente porosa del material son las que determinan como se comporta el aire en interior del material. Por tanto, este tipo de caracterización sólo se puede realizar en materiales porosos, ya que son los que tienen una parte sólida y otra fluida.

El comportamiento acústico de materiales porosos lleva estudiándose desde hace más de setenta años. Beranek (1942) ya insinúa la importancia de conocer las propiedades acústicas de los materiales porosos, propiedades que pueden ser de gran interés para ciertas aplicaciones. Posteriormente, otros autores, estudian el comportamiento de las ondas acústicas en el interior de estos materiales porosos (Zwikker y Kosten, 1949; Biot, 1956a, 1956b). Con el paso de los años, se van estudiando materiales fibrosos que presentan un buen comportamiento acústico, llegando incluso a modelizar su comportamiento mediante sus propiedades estructurales acústicas de la componente porosa del material, tales como la resistencia al flujo, porosidad, tortuosidad o longitudes características térmica y viscosa (Delany y Bazley, 1970; Bies y Hansen, 1980; Johnson *et al.*, 1982; Attenborough, 1992; Voronina, 1996; Horoshenkov *et al.*, 1998).

2.4.1. Propiedades no acústicas de materiales porosos

2.4.1.1. Propiedades físicas

Los procesos de atenuación de las ondas acústicas en el interior de un material poroso se deben, principalmente, a procesos de absorción relacionados con los gradientes de velocidad y temperatura que están directamente relacionados con ciertos parámetros físicos de un material poroso. Los principales parámetros físicos que intervienen en el comportamiento acústico de un material absorbente poroso son la porosidad, tortuosidad y resistencia al flujo.

Porosidad

La estructura de los materiales absorbentes porosos consiste básicamente en un esqueleto, rígido o flexible, constituido por partículas de material, en contacto permanente entre ellas, cuyo interior se encuentra relleno por un fluido interconectado, aire, por el que se propagan las ondas sonoras. El aire existente en el interior del material poroso es obligado a moverse, produciéndose pérdidas de energía por el rozamiento de las partículas de aire con el esqueleto del material, con lo que se produce una transformación de parte de la energía acústica incidente en energía calórica. Los poros del material deben estar intercomunicados entre sí, ya que esta es la vía por la que la onda sonora puede penetrar más profundamente en el interior del material (Figura 2.3).

La porosidad de un material, Φ , se puede definir como la relación existente entre el volumen de aire que ocupa los poros existentes dentro de un material y el volumen total del material poroso. Si denominamos V_E al volumen del esqueleto y V_A al volumen de aire dentro del material, podemos definir V_T como el volumen total del material poroso, $V_T = V_A + V_E$ y, teniendo en cuenta la definición de porosidad, tenemos que:

$$\Phi = \frac{V_A}{V_T} = \frac{V_A}{V_A + V_E} \quad (2.1)$$

A la hora de determinar la porosidad que interviene en el comportamiento acústico de un material poroso, porosidad abierta, los poros cerrados (no comunicados con otros) deben ser excluidos del volumen total de poros, ya que a estos no son accesibles las ondas sonoras (Figura 2.3). Por tanto, dentro del volumen total del material poroso, sólo

los poros abiertos deben ser considerados: esto se conoce como porosidad abierta o conectada.

La técnica más sencilla para obtener la porosidad abierta de un material poroso no permeable de esqueleto rígido es mediante el llenado de sus poros empleando un fluido de densidad conocida, agua. El término no permeable, en este caso, se emplea para designar a un material que presenta una red interna de poros interconectados cuya geometría no se ve modificada en presencia del fluido. Una vez vaciado el esqueleto del material poroso y medida la masa del fluido, podemos obtener el volumen de fluido y, por tanto, el volumen de poros interconectados en el interior del material poroso. La porosidad será la relación existente entre el volumen de poros abiertos que contiene el material y el volumen aparente del material poroso.

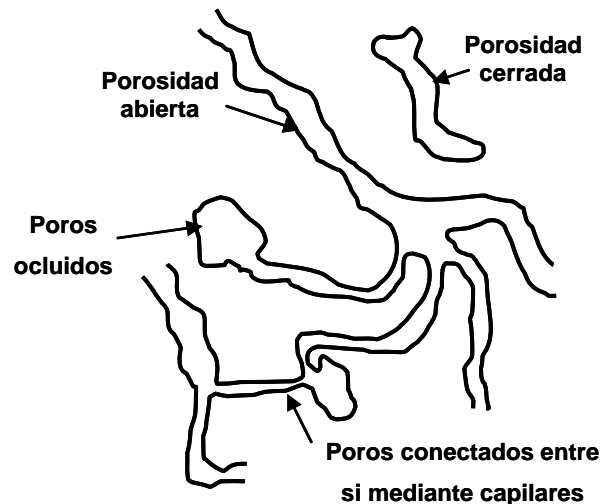


Figura 2.3. Tipos de porosidad y poros en un material poroso.

Este sencillo método sólo es aplicable a todo material poroso que sea no permeable, como por ejemplo los materiales granulares. En el caso de la mayoría de los materiales porosos absorbentes más comúnmente utilizados en edificación (fibras de vidrio, lanas de roca, espumas, etc.) este método no es aplicable, ya que, estos materiales, se pueden considerar como permeables.

Otra técnica sencilla para la determinación de la porosidad se basa en el conocimiento de la densidad del esqueleto del material poroso, ρ_E . De hecho, si conocemos esta densidad y la densidad aparente del material, ρ_M , tendremos entonces:

$$\Omega \approx 1 - \frac{\rho_M}{\rho_E} \quad (2.2)$$

Otras técnicas más elaboradas para la determinación de la porosidad abierta o conectada de un material poroso han sido propuestas por diversos autores (Beranek, 1942; Leonard, 1948; Champoux *et al.*, 1991; Leclaire *et al.*, 2003; Umnova *et al.*, 2005; Salissou y Panetton, 2007; Fellah *et al.*, 2013).

Beranek (1942) desarrolla uno de los primeros procedimientos para determinar la porosidad de un material basándose en la Ley de los Gases Ideales para compresión isoterma del aire dentro y fuera de la muestra. Para ello, se dispone de un dispositivo como el que muestra la figura 2.4. Consta de una cámara de volumen conocido, V , con válvula y en la que se mantiene una temperatura constante y a la que se le conecta un manómetro en forma de “U”. La muestra de material, de volumen V_t , se coloca en el interior de la cámara. Con la apertura de la válvula, el líquido que contiene presenta la misma altura h en ambos brazos. Posteriormente, la válvula se cierra, y la presión en el interior de la cámara se va incrementando, con lo que la altura h_1 en el brazo de la izquierda disminuye; mientras que en la parte derecha esta altura h_2 aumenta. La diferencia de niveles en h_1 y h_2 , nos va a indicar el incremento de presión en la muestra. Las alturas h y h_1 se observan por seguridad mediante un catetómetro, mientras que la diferencia entre h_2 y h se observa con precisión mediante una escala graduada (Figura 2.4):

La ecuación para la determinación de la porosidad empleada por Beranek, se puede obtener fácilmente a partir de la Ley de los Gases Ideales. En el caso de transformación isoterma:

$$pV = nRT = cte \quad (2.3)$$

$$dpV + pdV = 0 \quad (2.4)$$

$$dpV = -pdV \quad (2.5)$$

por tanto, podemos escribir,

$$\Delta p_0 (V - V_E) = -p_0 \Delta V_a \quad (2.6)$$

donde V_E es el volumen ocupado por el esqueleto del medio poroso y, si $\Delta p_0 > 0$, tenemos que $\Delta V_a < 0$. Si, además, recordamos el concepto de porosidad, como la relación entre el volumen de poros y el volumen total de la muestra, podemos escribir:

$$V - V_E(1 - \Omega) = \frac{p_0 \Delta V_a}{\Delta p_0} \quad (2.7)$$

$$\Omega = \frac{p_0}{V_t} \frac{\Delta V_a}{\Delta p_0} + 1 - \frac{V}{V_t} \quad (2.8)$$

donde p_0 es la presión atmosférica e igual a 1035 cm de agua, P_0 es la presión atmosférica, V_a el volumen del material y V el volumen de la cámara.

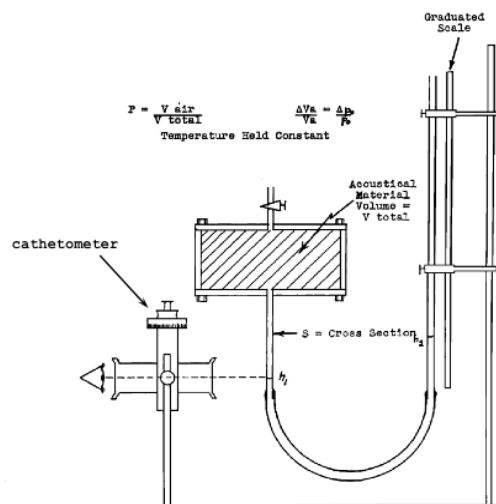


FIG. 8. Apparatus for measuring the porosity of acoustical materials (Beranek).

Figura 2.4. Detalle de montaje para la determinación de la porosidad (Beranek, 1942).

Leonard (1948) emplea un método invasivo para la determinación de la porosidad abierta mediante la inmersión en agua del material poroso no permeable de esqueleto rígido y la medida del volumen del agua contenido en los poros. La característica principal de este método dinámico es el empleo de la resistencia a la vibración del aire en los poros del material para controlar el período de la oscilación libre amortiguada de un sistema mecánico. Presenta la ventaja de ofrecer una pequeña dependencia de la temperatura y un mínimo tiempo de medida para cada muestra.

El método desarrollado por Champoux y colaboradores, al igual que el método de Beranek, se fundamenta en la Ley de los Gases Ideales (Champoux *et al.*, 1991). Una muestra del material poroso con un volumen total V_t , se introduce en el interior de una

cámara sellada (Figura 2.5). El interior de los poros interconectados del material, con un volumen V_a , está relleno de aire. Dentro de este volumen se excluye el volumen correspondiente a los poros cerrados. La fracción de volumen de aire en el material se denomina porosidad y puede expresarse:

$$\Omega = \frac{V_a}{V_t} \quad (2.9)$$

El volumen total en el interior de la cámara donde se mide es $V' = V_0 + V_a$, donde V_0 es el volumen residual en la cámara no ocupada por el material.

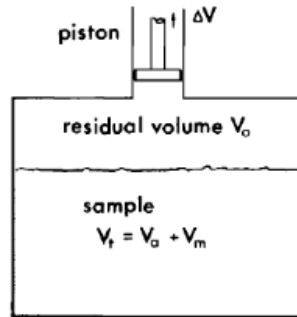


Figura 2.5. Detalle de montaje para la determinación de la porosidad por el método de Champoux y colaboradores (Champoux et al., 1991).

Inicialmente la presión en el interior de la cámara se corresponde con la presión atmosférica p_0 . Si el volumen se ve incrementado una cantidad ΔV mediante el movimiento del pistón, la presión se verá modificada una cantidad $\Delta p'$, y para una expansión isoterma, suponiendo que contiene un gas ideal, tenemos:

$$p_0 V' = (p_0 + \Delta p')(V' + \Delta V) \quad (2.10)$$

Por tanto, la medida de los cambios de presión en el interior de la cámara, conociendo p_0 y ΔV , permite determinar el volumen total de aire V' mediante la siguiente expresión:

$$V' = - \left(\frac{p_0 + \Delta p'}{\Delta p'} \right) \cdot \Delta V \quad (2.11)$$

El aire contenido en el interior de la muestra será, por tanto, $V_a = V' - V_0$ y la porosidad determinada por la expresión:

$$\Omega = \frac{V_a}{V_t} \quad (2.12)$$

Leclaire y colaboradores proponen un método basado en el método desarrollado por Beranek (1942) (Leclaire *et al.*, 2003). En este método se realiza una comparación del volumen de la cámara que contiene la muestra con la de una cámara de referencia vacía. Durante la medida, una disminución de volumen en la cámara de medida debido a la introducción del material es compensado por un aumento del volumen de un pistón conectado a la cámara.

Umnova y colaboradores proponen un método acústico para la obtención de la tortuosidad y de la porosidad de materiales porosos de esqueleto rígido (con tamaños de grano superiores a 1mm y de fibras) y con espesor elevado. Este método emplea pulsos ultrasónicos con frecuencias centrales próximas a los 12 kHz y un ancho de banda entre 3 y 20 kHz, de forma que los efectos no viscosos y la dispersión predominan en la propagación de la onda sonora en poros de gran tamaño. La tortuosidad se deduce a partir del límite de alta frecuencia de la velocidad de fase. La porosidad se obtiene a partir del límite de altas frecuencias del coeficiente de reflexión una vez conocida la tortuosidad (Umnova *et al.*, 2005).

Salissou y Panetton (2007) desarrollan un método para determinar directamente la porosidad abierta de sólidos porosos y, más en particular, los que se utilizan en revestimientos fonoabsorbentes. El método está basado en la medida de cuatro masas diferentes, sometidas a cuatro presiones estáticas diferentes, a partir de las que se determinan la porosidad y la densidad real del material. Para ello se emplea la Ley de los Gases Ideales bajo la hipótesis de un proceso isotérmico.

$$\Omega = 1 - \frac{RT}{V_t} \left(\frac{m_2 - m_1}{P_2 - P_1} - \frac{m_4 - m_3}{P_4 - P_3} \right) \quad (2.13)$$

$$\rho_1 = \frac{m_3 - m_1}{V_t} \quad (2.14)$$

Fellah y colaboradores presentan un método de medida simultánea de la porosidad, tortuosidad y longitudes características viscosas y térmicas mediante técnicas ultrasónicas. Está basado en un modelo temporal de los efectos de dispersión directo e inverso de ondas ultrasónicas transitorias en materiales porosos homogéneos de esqueleto rígido (Fellah *et al.*, 2013).

Dentro de los métodos no acústicos para la determinación de la porosidad está la porosimetría de intrusión de mercurio. La porosimetría de intrusión de mercurio es una técnica utilizada para la determinación de la distribución de tamaño de poro y la porosidad y ampliamente utilizada para el análisis de sólidos porosos. Hacia 1842 ya se menciona la posibilidad de forzar mercurio en madera para obtener su estructura porosa. El método fue propuesto por primera vez por Washburn en 1921 y los primeros datos experimentales se publicaron en 1940 por Henderson y colaboradores (1940). La técnica determina el volumen de mercurio forzado a entrar en los poros en función de la presión, relacionada con el tamaño de poro mediante la ecuación de Washburn (1921):

$$P = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{r} \quad (2.15)$$

donde P es la presión aplicada, γ es la tensión superficial del mercurio medida a la temperatura del ensayo, θ el ángulo de contacto entre el mercurio y las paredes del capilar o poro y r el radio equivalente del poro que se llena con mercurio, suponiendo que su sección transversal es circular (poros esféricos o cilíndricos). El volumen de mercurio intrusionado en la muestra es registrado junto con el valor de la presión aplicada. Estos pares de valores describen la curva del volumen de mercurio intrusionado frente a presión aplicada. La curva volumen-presión puede ser convertida, aplicando un modelo de poros adecuado, en volumen o área de poro, frente a radio de poro.

En esta técnica la muestra se coloca en un recipiente impermeable. El recipiente, con la muestra en su interior, es sometido a vacío (con el fin de desgasificar la muestra) y rellenado con un volumen conocido de mercurio. A continuación, se aplica presión al mercurio de forma progresiva, produciéndose una intrusión gradual del mercurio en el medio poroso evacuado, seguida por la extrusión (la expulsión del mercurio desde la estructura porosa) a medida que la presión va disminuyendo. A baja presión el mercurio

sólo está forzado a penetrar en canales porosos de gran diámetro de la muestra. Por lo tanto, el cambio de volumen de mercurio es pequeño. Cuando se aumenta la presión, el mercurio penetra en los poros más pequeños y se produce una gran reducción del volumen de mercurio. La porosimetría de mercurio es ampliamente empleada para determinar la distribución de tamaños de poro de sólidos porosos en el rango de 2 nm a 1 mm mediante el análisis de la curva de intrusión, desde presiones de $4 \cdot 10^{-3}$ MPa hasta 414 MPa.

El modelo más simple consiste en poros de forma cilíndrica, que se vacían completamente cuando la presión es reducida a cero. Sin embargo, este modelo no guarda relación con la naturaleza real de la mayor parte de los medios porosos, ya que están constituidos por una red de poros no cilíndricos interconectados. Cuando la presión cesa después de la intrusión, la extrusión revela dos fenómenos generales: histéresis entre la intrusión y la extrusión, y el confinamiento de mercurio cuando la presión se reduce a una atmósfera (0.1 MPa). Además, ocurre reintrusión desde el estado de retención de mercurio cuando se incrementa nuevamente la presión.

En la actualidad se considera que la histéresis de intrusión-extrusión, la retención de mercurio y la reintrusión dependen de la geometría de la red de poros tridimensional del material y no simplemente de la distribución del tamaño de poro (Figura 2.6).

Day y colaboradores proponen un modelo de intrusión/extrusión de mercurio, considerando una matriz de redes cúbicas tridimensionales de nodos conectados entre sí por un poro dividido en tres segmentos, de distintos tamaños, con distribuciones unimodales y bimodales y de diferente ancho de distribución. Las distintas clases de tamaños de poros (asignados al azar) están ubicadas, ya sea entremezcladas dentro de la matriz o bien separadas espacialmente. Los resultados de la aplicación de este modelo, mediante simulaciones llevadas a cabo con un buen número de datos experimentales de intrusión-extrusión, sobre sistemas bien caracterizados, han permitido proponer ciertas clases de comportamiento de la curva de intrusión-extrusión (Day *et al.*, 1994).

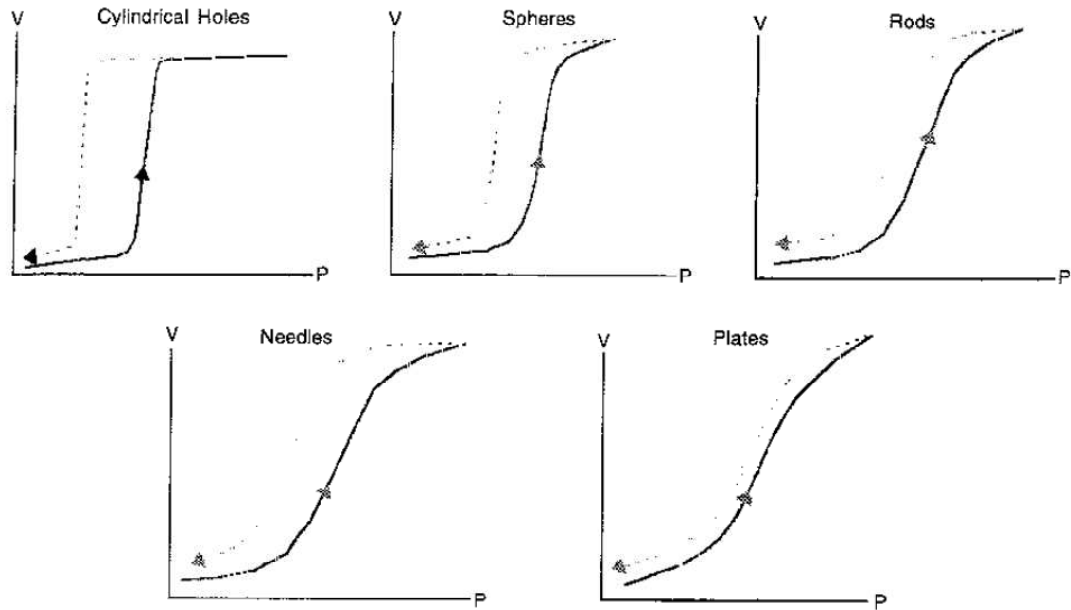


Figura 2.6. Forma de los poros en función de la curva de intrusión de mercurio. Imagen tomada de Webb y Orr (1997).

Tortuosidad

La tortuosidad constituye una de las propiedades intrínsecas que caracterizan el esqueleto de los materiales absorbentes porosos. 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 laterales. Es un parámetro que indica la facilidad que presenta el material a la hora de la penetración de la onda sonora en su interior. La tortuosidad determina el grado de sinuosidad que presenta el camino por donde el fluido atraviesa el medio.

El concepto de tortuosidad fue introducido por Carman (1937, 1956), como un factor correctivo necesario para modelar el efecto de la sinuosidad en el desplazamiento del fluido dentro del medio poroso.

Zwicker y Kosten (1949), en su teoría de propagación de las ondas sonoras en el interior de los materiales absorbentes porosos, introducen este parámetro llegando a relacionarlo con la forma de los poros. Estos autores consideran la existencia de una posible inclinación de los poros, ψ , que suponen con geometría cilíndrica, todos ellos alineados según la dirección de propagación de la onda sonora, respecto a la dirección

de incidencia de la onda (Figura 2.7). Para caracterizar este hecho introducen el parámetro factor de estructura, q , definido por la siguiente ecuación, $q=1/\cos^2(\Psi)$.

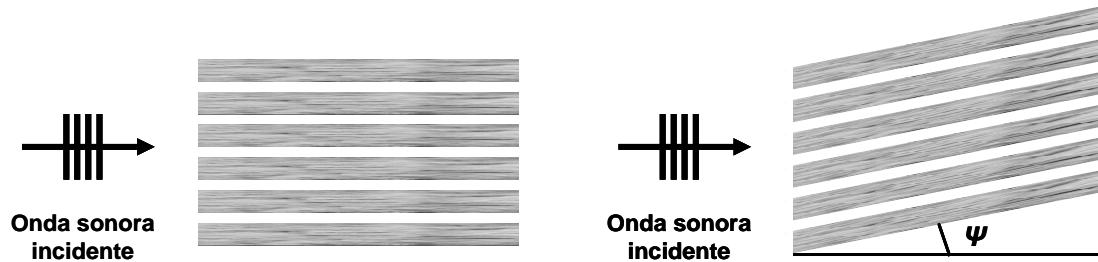


Figura 2.7. Modelo de Zwikker y Kosten (1949) para la tortuosidad en materiales porosos.

Posteriormente, los trabajos de Biot (1956a, 1956b) y Smith y Greenkorn (1972) introducen un factor de estructura que tiene en cuenta la forma y el efecto de la sinuosidad que presentan los poros del material.

Johnson y colaboradores desarrollan un modelo en el que los poros no son únicamente cilíndricos y paralelos. En él establece la existencia de una relación entre la densidad efectiva del fluido y su densidad característica por medio de la tortuosidad dinámica; siendo esta última equivalente al factor de estructura a frecuencias muy altas (cuando la tortuosidad dinámica tiende a infinito) (Johnson *et al.*, 1987).

En el caso real, en el que los poros de un material presentan geometrías extremadamente complejas, resulta imposible el cálculo de la tortuosidad a través de algoritmos matemáticos. Por ello se recurre a su determinación mediante métodos experimentales. Numerosos autores han desarrollado diferentes metodologías para su obtención. Johnson y colaboradores obtienen valores de la tortuosidad mediante métodos acústicos, empleando el índice de refracción del ^4He (Johnson *et al.*, 1982). Champoux y Stinson (1990a), se basan en métodos electroquímicos. Allard y colaboradores emplean un método basado en pulsos acústicos a través de las muestras, para frecuencias ultrasónicas, para las que no existe atenuación ni dispersión significativa de la onda acústica (Allard *et al.*, 1994). Fellah y colaboradores obtienen de forma simultánea la tortuosidad y la porosidad a través del coeficiente de reflexión para altas frecuencias. Este método no presenta limitaciones en cuanto al espesor de la muestra, aunque precisa de dos ángulos de incidencia sobre ella diferentes (Fellah *et al.*, 2003). Umnova y colaboradores proponen un método acústico para la obtención de la tortuosidad y de la

porosidad de materiales porosos de esqueleto rígido (con tamaños de grano superiores a 1 mm y de fibras) y con espesor elevado. Este método emplea pulsos ultrasónicos con frecuencias centrales próximas a los 12 kHz y un ancho de banda entre 3 y 20 kHz, de forma que los efectos no viscosos y el scattering predominan en la propagación de la onda sonora en poros de gran tamaño. La tortuosidad se deduce a partir del límite de alta frecuencia de la velocidad de fase (Umnova *et al.*, 2005).

La metodología más estudiada de este parámetro está basada en los trabajos de Brown (1980) aplicados a rocas y suelos arcillosos. El método se fundamenta en la analogía existente entre las propiedades acústicas y eléctricas de los materiales granulares no conductores, asimilando la conductividad eléctrica del material en el seno de un fluido conductor con el flujo de aire capaz de atravesar el mismo material (Figura 2.8).

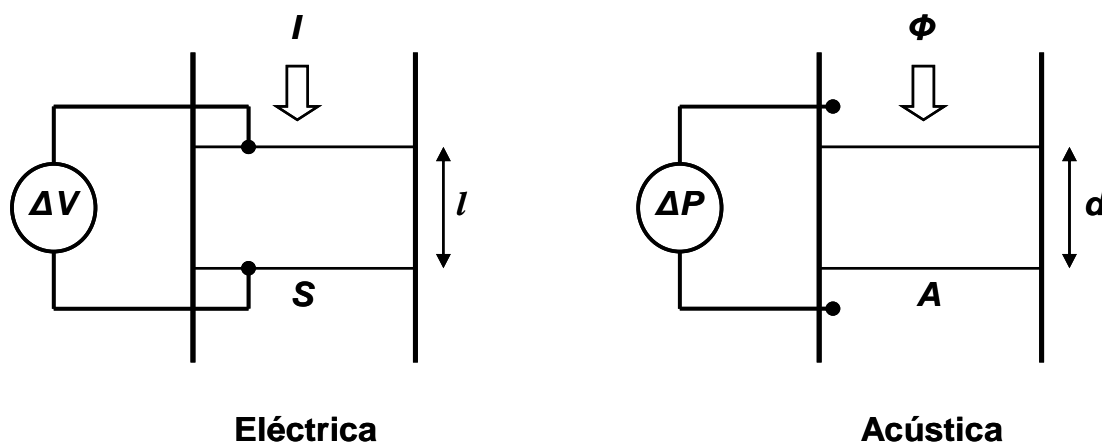


Figura 2.8. Analogía entre propiedades acústicas y eléctricas de los materiales granulares no conductores par ala obtención de la tortuosidad.

En el caso de una corriente eléctrica, I , atravesando un material que presenta cierta resistencia, R_e , al paso de esa corriente, sabemos que se cumple la Ley de Ohm; por lo que se genera una diferencia de potencial a ambos lados de la muestra ΔV , se cumplirá que:

$$\Delta V = I \cdot R_e \quad (2.16)$$

Teniendo en cuenta la definición de densidad de corriente, i , la conductividad eléctrica, σ_e , y el campo eléctrico, E :

$$i = \frac{I}{S} \quad (2.17)$$

$$\sigma_e = \frac{i}{E} \quad (2.18)$$

$$E = \frac{V_A - V_B}{l} = \frac{\Delta V}{l} \quad (2.19)$$

podemos expresar la resistencia eléctrica en función de la resistividad eléctrica, ρ_e (inversa de la conductividad eléctrica), por lo que nos quedaría la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{\Delta V}{I} = \frac{l}{S} \rho_e \quad (2.20)$$

Por analogía, en el caso de un flujo de aire, ϕ , atravesando un material que presenta cierta resistencia a su paso, R , sabemos que existe una diferencia de presión a ambos lados de la muestra, ΔP , es decir:

$$\Delta P = \phi \cdot R \quad (2.21)$$

Comparando ambas expresiones tenemos que:

- En el caso del campo eléctrico:

$$\Delta V = \left(\rho_e \cdot \frac{l}{S} \right) \cdot I \quad (2.22)$$

$$\rho_e = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{S}{l} \quad (2.23)$$

- En el caso de campo acústico:

$$\Delta P = \left(r \cdot \frac{d}{A} \right) \cdot \phi \quad (2.24)$$

$$r = \frac{\Delta P}{\phi} \cdot \frac{A}{d} \quad (2.25)$$

siendo r , la resistencia al flujo de aire. De aquí podemos extraer la equivalencia entre l y S , frente a d y A .

La medida de la tortuosidad consiste en la aplicación de un procedimiento electrolítico, midiendo la corriente que atraviesa el dispositivo en función de la tensión aplicada entre los extremos de los electrodos, para dos situaciones, en primer lugar el electrolito solo y, posteriormente, el material saturado con el electrolito (Figura 2.9).

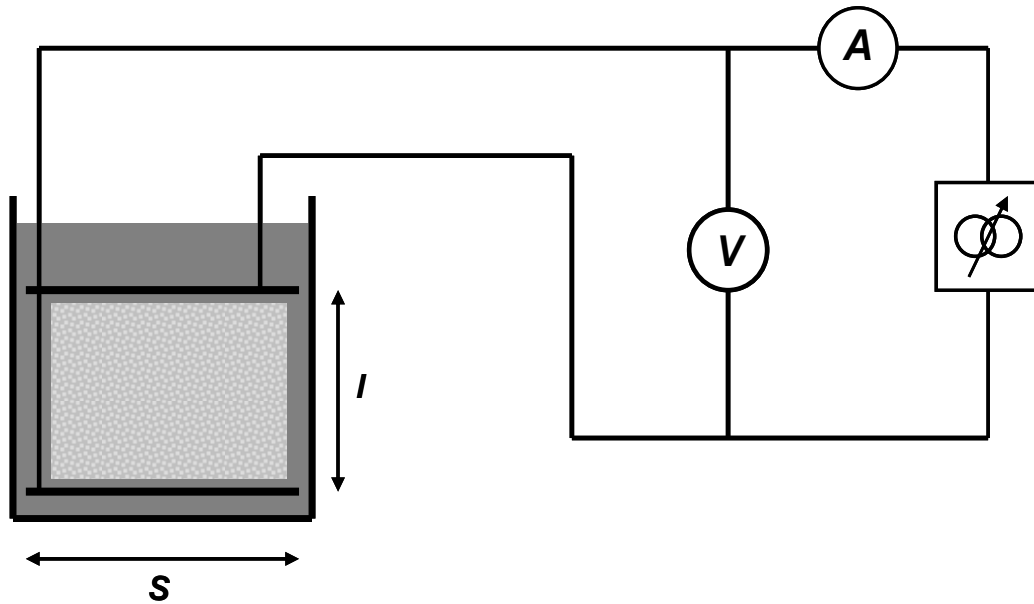


Figura 2.9. Esquema de montaje para la obtención de la tortuosidad.

Para utilizar este método es importante tener en cuenta la disolución conductora y el material empleado para los electrodos, con el fin de evitar que el proceso de electrólisis dé lugar a la formación de nuevos compuestos químicos, ya que sólo tiene lugar el transporte de los cationes de cobre de un electrodo a otro. Por ello se emplean, como electrodos, dos placas de cobre y, como electrolito, una disolución de sulfato de cobre (CuSO_4) al 10%. Es importante llevar a cabo un desgasificado inicial de los volúmenes antes de proceder a la realización del ensayo.

Si hacemos pasar una corriente eléctrica a través del electrolito y medimos la diferencia de potencial, podemos obtener la tortuosidad mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \Omega \quad (2.26)$$

siendo Ω la porosidad abierta del material y ρ_c y ρ_f las resistividades eléctricas medidas para el electrolito con y sin el material poroso, respectivamente. Como estas

resistividades son, a su vez, función de la resistencia eléctrica, R , de las superficies de los electrodos y de la distancia de separación entre ambos, manteniendo el volumen constante, podemos expresar la tortuosidad:

$$T = \frac{R_c}{R_f} \cdot \Omega \quad (2.27)$$

Empleando un generador de corriente continua, obtenemos las resistencias eléctricas R_c y R_f mediante las pendientes correspondientes a las rectas de variación de la intensidad eléctrica que atraviesa el electrolito y el material, respectivamente, con la tensión aplicada.

Resistencia al flujo

De entre todas las propiedades físicas que afectan al comportamiento acústico de los materiales acústicos empleados en edificación, la resistencia al flujo es, posiblemente, el factor más determinante. La resistencia al flujo de aire por unidad de longitud, σ , evalúa la resistencia que ofrece un material poroso al paso de un flujo de aire a través de él. Se puede definir como la relación entre la caída de presión y la velocidad del flujo de aire a través de una muestra de un material.

La resistencia al flujo de aire viene definida por la siguiente expresión:

$$R = \frac{\Delta P}{q_{vf}} \quad (2.28)$$

donde ΔP es la diferencia de presión del aire, en Pa, entre ambos lados de la muestra, en relación a la presión atmosférica y q_v es el caudal volumétrico de aire, en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, que atraviesa la muestra (Figura 2.10). Se expresa en Pa s m^{-3} o $\text{kg m}^{-4} \text{s}^{-1}$.

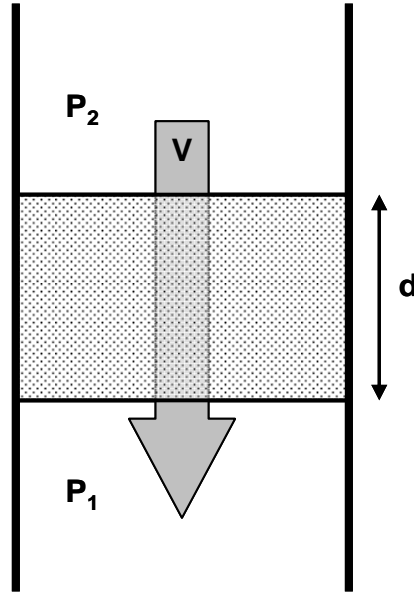


Figura 2.10. Esquema para la obtención de la resistencia al flujo.

La resistencia específica al flujo de aire, R_s , se define como la diferencia de presión a ambos lados de la muestra de sección A y la velocidad del flujo v que incide sobre ella. La resistencia específica al flujo de aire viene definida por la siguiente expresión:

$$R_s = \frac{\Delta P}{v} = \frac{\Delta P}{\phi} \cdot A = R \cdot A \quad (2.29)$$

Se expresa en Pa s m^{-1} o $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La resistividad al flujo de aire, teniendo en cuenta las ecuaciones (2.28) y (2.29), se define como la resistencia específica al flujo de aire por unidad de espesor d de la muestra. Determina la influencia de los efectos viscosos a bajas frecuencias de un material poroso. Viene definida por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{v} \cdot \frac{1}{d} = \frac{\Delta P}{\phi} \cdot \frac{A}{d} = \frac{R_s}{d} \quad (2.30)$$

Se expresa en Pa s m^{-2} o $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$.

La resistividad al flujo de aire se puede expresar en unidades MKS, rayls m^{-1} , equivalentes a Pa s m^{-2} o también se puede expresar como N s m^{-4} .

La norma internacional UNE EN 29053 (UNE EN 29053, 1994) especifica dos métodos para determinar la resistencia al flujo de aire de materiales porosos empleados para aplicaciones acústicas, el método con flujo de aire directo y el método con flujo de aire alterno. En ambos métodos se determina la diferencia de presión a ambos lados de la muestra al paso de una corriente de aire continua o alterna, respectivamente.

Ingard y Dear (1985) proponen un método de medida basado en el tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos para la obtención de la resistencia al flujo a partir de la función de transferencia (Figura 2.11).

Este método parte de la hipótesis de que la caída de presión en el interior del tubo es lo suficientemente pequeña como para considerar que la velocidad del aire es la misma en las caras anterior y posterior de la muestra. También se supone que el espesor de la muestra es mucho menor que la longitud de onda, para que la velocidad pueda considerarse constante a través del material.

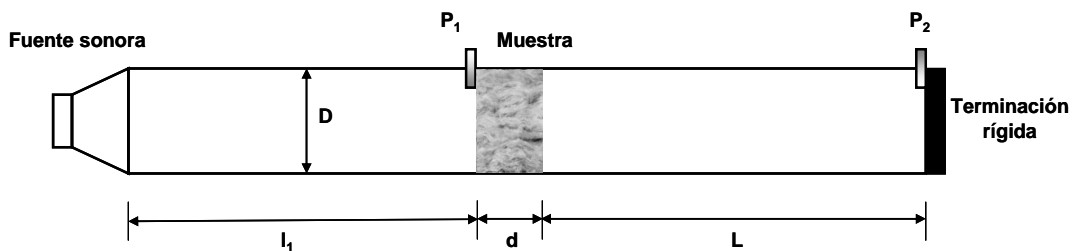


Figura 2.11. Esquema de montaje experimental descrito por Ingard y Dear (1985).

Para que se cumpla la condición de una onda plana incidente sobre la muestra, la sección del tubo debe ser pequeña comparada con la longitud de onda, λ ; por lo que $\lambda \gg 1,7 D$, donde D es el diámetro del tubo y L , la distancia entre la muestra de material y la terminación rígida, debiendo ser esta distancia de $L = (2n-1) \lambda/4$, para $n = 1,2,3,\dots$ Ingard y Dear optan por tomar $n = 1$, con lo que la distancia será $L = \lambda /4$ para la frecuencia de 100 Hz.

La relación entre la velocidad de partícula en 1 y la presión en 2 (Figura 2.11), viene dada por la ecuación:

$$u_1 = -i \frac{P_2}{\rho_0 c_0} \text{sen}(kL) \quad (2.31)$$

donde L es la distancia entre la cara no incidente de la muestra de material y la terminación rígida, ρ_0 la densidad del aire, c_0 la velocidad de la onda en el tubo y k el número de onda.

La relación entre las presiones en los dos micrófonos es:

$$p_1' = p_2 \cos(kL) \quad (2.32)$$

Con estas dos expresiones podemos expresar la impedancia al flujo como:

$$z = \frac{p_1 - p_1'}{u_1} = i\rho_0 c_0 \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{1}{\text{sen}(kL)} - i\rho_0 c_0 \cot(kL) \quad (2.33)$$

Teniendo en cuenta la función de transferencia, $H_{12} = p_2/p_1$, las frecuencias que cumplen $L = (2n-1) \lambda/4$ para $n = 1,2,3,\dots,n$; donde la parte reactiva de la impedancia al flujo es mucho menor a la parte resistiva. Por ello, esta se puede despreciar y aproximar el valor de la resistencia específica al flujo al valor de la impedancia normalizada, con lo que la impedancia al flujo normalizada queda:

$$\frac{z}{\rho_0 c_0} = \theta + i\chi = i \frac{1}{H_{12}} (-1)^{n-1} \quad (2.34)$$

$$\theta \approx \left| \frac{p_1}{p_2} \right| = \left| \frac{1}{H_{12}} \right| \quad (2.35)$$

Puesto que lo que se mide son niveles de presión, la simplificación anterior puede expresarse en función de esos niveles como:

$$Lp_1 - Lp_2 = 20 \log \frac{p_1}{p_2} \quad (2.36)$$

Por tanto, midiendo los niveles de presión sonora a las frecuencias de resonancia indicadas en los puntos p_1 y p_2 , tal y como muestra la figura 2.11, el valor de la resistencia al flujo normalizada es:

$$\theta \approx 10^{\frac{Lp_1 - Lp_2}{20}} \quad (2.37)$$

Existen otros métodos para la determinación de la resistencia al flujo de aire.

Stinson y Daigle (1988) desarrollan un sistema de medida electrónico comparativo basado en el paso de un caudal de aire, bajo una resistencia al flujo conocida y calibrada, dispuesta en serie con la muestra de material a ensayar. La relación entre las caídas de presión en las dos muestras es equivalente a la relación entre los valores de la resistencia, ya que el flujo de aire es el mismo en todo el sistema.

Ren y Jacobsen (1993) emplean un método que es una variante mejorada del trabajo de Ingard y Dear. El método de medida está basado en un tubo de impedancia, en el que se obtiene la función de transferencia entre dos micrófonos situados antes y después de la muestra y donde no es necesario que la terminación del tubo sea rígida. Permite estudiar la dependencia de la impedancia con la frecuencia, quedando descritas parte real (resistencia al flujo) y parte compleja (reactancia al flujo) de la impedancia al flujo.

Seeba y colaboradores presentan un método de medida de la resistividad al flujo de materiales porosos de esqueleto rígido. El método se basa en un modelo temporal de los efectos de scattering directo e inverso de ondas ultrasónicas transitorias en materiales porosos homogéneos de esqueleto rígido (Seeba *et al.*, 2005).

2.4.1.2. Propiedades mecánicas

La rigidez dinámica y la compresibilidad de una lámina anti-impacto, empleadas para introducir mejoras en el aislamiento a ruido de impacto, son dos de las propiedades mecánicas que determinan el comportamiento acústico de los suelos flotantes en edificación.

Rigidez dinámica

La rigidez dinámica es uno de los parámetros que condiciona el aislamiento acústico de los suelos flotantes en viviendas y que sirve para valorar la mejora a ruido de impacto. Esta magnitud se define como la relación entre la fuerza y el desplazamiento de un sistema muelle-masa.

Para la determinación de la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de una lámina anti-impacto se emplea el procedimiento indicado en la Norma UNE EN 29052-1 (UNE EN 29052, 1994). Mediante este procedimiento se evalúa la frecuencia de resonancia de la vibración vertical fundamental de un sistema masa-muelle, en el que la masa es la placa de carga y el muelle es la lámina elástica.

La rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de la lámina flotante, s'_t (N m^{-3}), se puede obtener, bajo ciertas condiciones y limitaciones, de la siguiente expresión:

$$s'_t = 4 \cdot \pi^2 \cdot m'_t \cdot f_r^2 \quad (2.38)$$

donde m'_t (kg m^{-2}) es la masa total por unidad de superficie empleada durante el ensayo y f_r (Hz) es la frecuencia en la que se produce la resonancia en las condiciones de ensayo.

En el caso de materiales elásticos porosos, la rigidez dinámica s' (N m^{-3}) se equipara a un sistema con una masa y 2 muelles conectados en paralelo, el primero representado por el esqueleto del material elástico poroso y el segundo por el aire contenido en el material y que rodea el esqueleto (Cremer *et al.*, 1988). Por lo tanto, en este caso, debemos tener en consideración la resistencia al flujo de aire del material elástico poroso, ya que el aire tiende a moverse libremente en el interior del material.

Si la resistencia al flujo de aire no es muy elevada, el reducido tamaño que presenta la muestra permitirá al aire moverse libremente dentro y fuera de la muestra durante el ensayo y, por tanto, la rigidez del aire en el interior de la muestra no afectará a los resultados obtenidos, dando éstos como resultado únicamente la rigidez dinámica del esqueleto del material elástico poroso, que está referida a la rigidez dinámica aparente por unidad de área, s'_t .

En el caso de materiales elásticos porosos con una resistencia al flujo de aire dentro del rango, $10 \leq r \leq 100 \text{ kPa s m}^{-2}$, la rigidez dinámica por unidad de área del material elástico se puede obtener de la expresión:

$$s' = s'_t + s'_a \quad (2.39)$$

siendo s'_a , la rigidez dinámica por unidad de área del aire que contiene el material en su interior, obtenida a partir de la siguiente expresión:

$$s'_a = \frac{K}{\Omega \cdot d} \quad (2.40)$$

donde K es el módulo de compresión del aire para compresión isoterma (a presión atmosférica), Ω , la porosidad abierta del material y d el espesor de material bajo carga. Es importante decir que s'_a , a menudo, representa un porcentaje bastante significativo del valor total de s' . En el caso de las lanas minerales, usadas habitualmente bajo suelos flotantes, el valor de s'_a está comprendido entre 25 y 75% de s' .

En el caso de materiales elásticos no porosos, o porosos que presentan una elevada resistencia al flujo de aire lateral, $r \geq 100 \text{ kPa s m}^{-2}$, no es preciso introducir el término s'_a , por lo que $s' = s'_t$.

En el caso de materiales elásticos porosos que presentan una baja resistencia al flujo de aire lateral, $r \leq 10 \text{ kPa s m}^{-2}$, $s' = s'_t$, sólo si $s'_a \ll s'_t$.

A partir de la rigidez dinámica del material elástico es posible determinar la frecuencia de resonancia del sistema conformado por el suelo flotante:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}} \quad (2.41)$$

siendo s'_t la rigidez dinámica aparente por unidad de área y m'_t , la masa por unidad de área de la losa flotante colocada encima de la lámina elástica y en la que se deben contemplar todos los elementos de masa colocados encima de la lámina.

El procedimiento que se lleva a cabo en este ensayo es el siguiente (Figura 2.12). La muestra de material, con forma cuadrada, con dimensión de 200 ± 3 mm de lado, se debe colocar sobre un base que presente una inercia con una magnitud tal que durante el ensayo su velocidad resulte despreciable comparada con la de la carga. En este caso, se puede emplear bien el suelo, bien una base con una masa superior a 100 kg para evitar ondas de flexión dentro del intervalo de frecuencias de interés. Sobre el material elástico se coloca un film impermeable con un espesor inferior a 0.02 mm, y sobre este una lámina de escayola fina, hasta un espesor de 5 mm como mínimo, con el objeto de compensar todas las irregularidades de la superficie de la lámina elástica. Sobre esta lámina se coloca una placa de acero con unas dimensiones de 200 ± 3 mm. Tanto la placa de carga como la base no deben presentar irregularidades en sección inferiores a 0.5 mm y ser lo suficientemente rígidas como para evitar ondas de flexión dentro del intervalo de frecuencias de interés. En la parte superior de todo el sistema se coloca, en el centro geométrico de la probeta, un acelerómetro piezoeléctrico. La carga total sobre la muestra de ensayo, incluidos equipos de medida y excitación, debe ser 8.0 ± 0.5 kg.

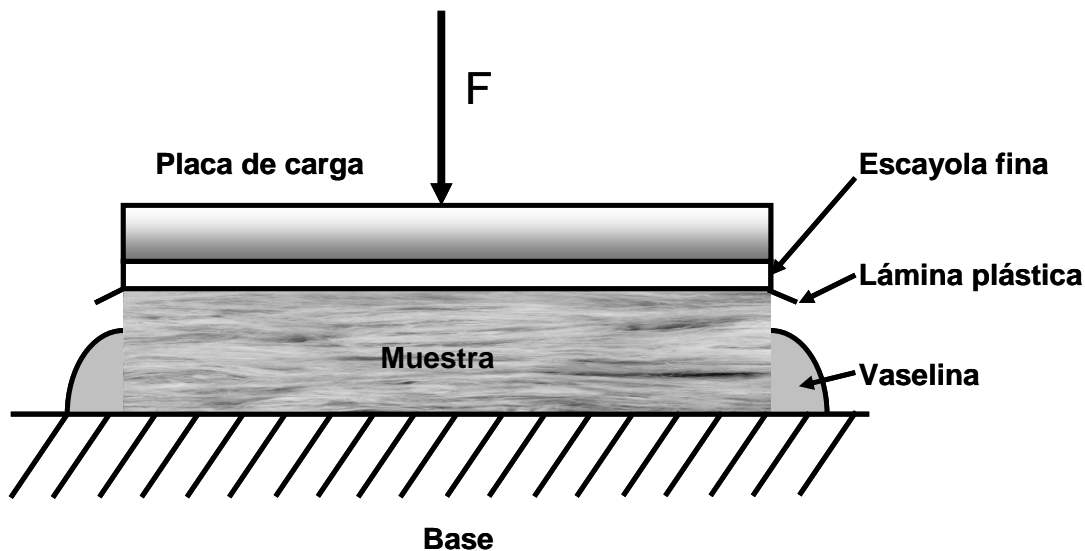


Figura 2.12. Esquema de ensayo para la determinación de la rigidez dinámica según la Norma UNE EN 29052-1:1994.

Mediante la excitación de la placa de acero con una fuerza, bien mediante señal sinusoidal, bien mediante ruido blanco o una señal impulsiva, se obtiene la aceleración de la placa. En el caso de utilizar una señal sinusoidal, se tiene una mayor facilidad para llegar a frecuencias bajas, ya que el espectro de la señal es más ancho que en el caso de

señales impulsivas, aunque el método más comúnmente empleado es el uso de una excitación mediante señal impulsiva para determinar la rigidez dinámica (Baron *et al.*, 2004; Simón *et al.*, 2006; Neves *et al.*, 2008).

Compresibilidad

La norma UNE EN 12431 (UNE EN 12431, 1999) proporciona un método para determinar el espesor de los materiales aislantes térmicos empleados para introducir una mejora al aislamiento a ruido de impacto en aplicaciones de suelos flotantes. El espesor se determina como la distancia medida entre una superficie base plana rígida sobre la cual descansa la muestra de material y un plato de precisión plano rígido que ejerce diferentes presiones sobre la superficie superior de la muestra. Para la compresibilidad se emplean muestras con forma cuadrada y unas dimensiones de $200 \times 200 \pm 3$ mm.

Se evalúan las muestras bajo tres cargas estáticas diferentes mediante un ciclo de carga y descarga en cortos intervalos de tiempo. La muestra de material debe poder expandirse libremente sin sufrir fricción. La compresibilidad c es la diferencia absoluta entre los espesores d_L y d_B , donde d_L es el espesor bajo carga estática de 0.25 kPa después de 120 s, y d_B es el espesor después de un determinado ciclo de cargas: 2 kPa (después de 120 s), 50 kPa (después de 120 s) y 2 kPa (después de 120 s) (Figura 2.13).

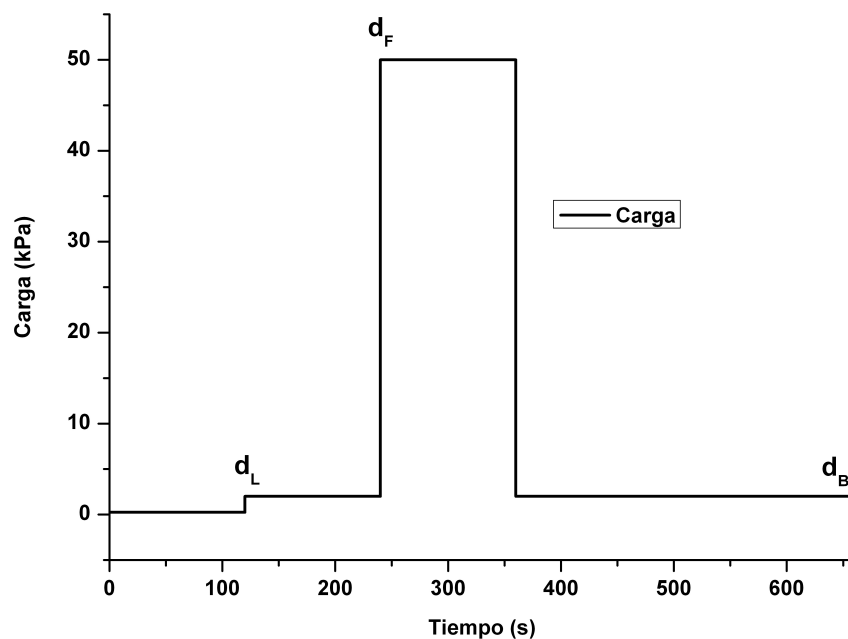


Figura 2.13. Detalle de los espesores d_L , d_F y d_B en relación con el tiempo y la carga.

Schiavi y colaboradores definen una cantidad adimensional, denominada porcentaje de disminución de espesor de la lámina elástica (Schiavi *et al.*, 2007b), de la forma:

$$h(c) = 100 \cdot \left(1 - \frac{d_B}{d_L}\right) \quad (2.42)$$

Este espesor relativo indica la cantidad, en porcentaje, de la deformación no recuperada al finalizar los ciclos de carga.

Además de la rigidez dinámica, la compresibilidad también es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de establecer la idoneidad o no de introducir una lámina anti-impacto en un suelo flotante. Esto es debido a que la deformación mecánica que sufren estas láminas reduce su rigidez dinámica y, por tanto, su comportamiento acústico.

Las frecuencias de resonancia, la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento, se obtienen a partir de la función de respuesta de frecuencia mediante el método del Punto Medio. El coeficiente de amortiguamiento se puede estimar, en el dominio de la frecuencia, por medio de la amplitud de la frecuencia de resonancia:

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2 \cdot f_0} = \frac{f_2 - f_1}{2 \cdot f_0} \quad (2.43)$$

donde f_2 y f_1 son las frecuencias para las que el nivel de aceleración obtenida disminuye en 3 dB del valor pico de la frecuencia de resonancia f_0 . A menudo es útil referir el factor de pérdidas con el amortiguamiento. El factor de pérdidas, η , convierte la energía de vibración en calor y, por tanto, es conveniente que los materiales que se empleen en este tipo de solución acústica presenten altos valores de este factor. El factor de pérdidas se puede aproximar a partir de la amortiguación (obtenida a partir de la ecuación (2.43)) mediante la relación $\eta = 2\zeta$. El módulo de Young puede ser estimado considerando que la rigidez dinámica es inversamente proporcional al espesor de la muestra:

$$E = s' \cdot d \quad (2.44)$$

donde s' es la rigidez dinámica (N m^{-3}) y d es el espesor de la muestra (m).

2.4.2. Propiedades acústicas

2.4.2.1. Acondicionamiento acústico

Para poder conseguir un campo sonoro adecuado en el interior de un recinto, disminuyendo el tiempo de reverberación hasta unos límites recomendables, se realizan tratamientos acústicos mediante la colocación de materiales que presenten unas determinadas propiedades acústicas. Estos materiales se caracterizan mediante el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal y la impedancia acústica superficial, parámetros que se pueden obtener en laboratorio mediante el uso de un tubo de impedancia.

Por otra parte, para predecir estas dos propiedades acústicas, se han desarrollado modelos y teorías que predicen el comportamiento de los materiales porosos, desde el punto de vista acústico, a partir de determinadas propiedades físicas como la porosidad, tortuosidad o resistencia al flujo.

Absorción e impedancia acústica

La absorción acústica es el fenómeno físico por el cual la energía acústica se transforma en otros tipos de energía. Cuando una onda acústica incide (*i*) sobre una superficie o elemento de separación entre dos medios diferentes (1 y 2), parte de esta energía es reflejada (*r*) y parte es transmitida al medio 2. Una parte de ella es absorbida en el medio mediante diferentes fenómenos físicos (*a*) y otra continúa su propagación en el medio (*t*) (Figura 2.14).

El coeficiente de absorción acústica, α , mide la relación entre toda la energía acústica transmitida al medio 2 respecto a la incidente:

$$\alpha = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} \quad (2.45)$$

La absorción de la energía acústica se produce por la disipación en forma de energía calorífica de la energía incidente, lo que ocurre por procesos viscoelásticos que tienen lugar entre la onda acústica y el esqueleto del material. Este fenómeno va a depender de la naturaleza y de cómo este constituido el material y también, en gran medida, del ángulo de incidencia de la onda acústica sobre el material.

Algunos materiales se caracterizan por estar formados por poros interconectados entre sí, mientras que otros están formados por fibras, que se comprimen al paso de la onda acústica (Figura 2.15). En el caso de materiales poroelásticos, la onda acústica, al ser una onda de presión, provoca ligeras deformaciones en el esqueleto del material. Estas deformaciones precisan de cierta energía que se obtiene de la energía de la onda acústica que incide sobre él. En el caso de materiales porosos de esqueleto rígido, la onda acústica se propaga por el interior de los poros, reflejando parte de esta. La vibración a la que es sometido el aire en el interior de los poros provoca un rozamiento de este con las paredes de los poros, lo que se traduce en una pérdida energética que se transforma en energía calorífica.

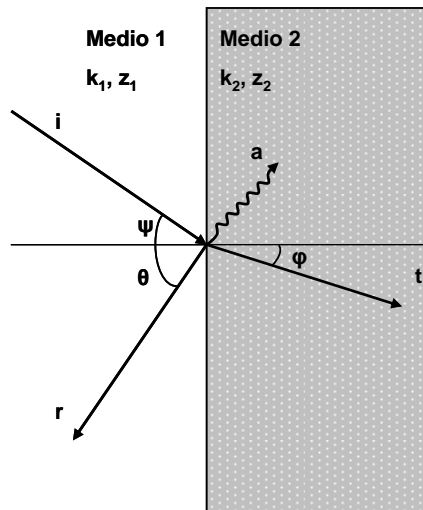


Figura 2.14. Incidencia de la onda acústica sobre una superficie. Medio 1 y Medio 2 representan los dos medios con propiedades acústicas diferentes y k_1, z_1 y k_2, z_2 el número de onda e impedancia características de los medios 1 y 2 respectivamente.

Otros tipos de energía por la que se produce el fenómeno de absorción son la energía de deformación, para el caso de absorbentes de membrana, o energía mecánica, para el caso de absorbentes tipo resonadores de Helmholtz.

El efecto que la superficie de separación entre dos materiales con propiedades acústicas diferentes ejerce sobre la onda acústica que los atraviesa, se caracteriza mediante cuatro parámetros acústicos interrelacionados entre sí; impedancia, admitancia, coeficiente de reflexión y coeficiente de absorción acústica. Los tres primeros parámetros nos van a proporcionar información de los cambios de magnitud y fase que sufre la onda, mientras que el coeficiente de absorción acústica es un número real y sólo nos

proporciona información de los cambios de energía que experimenta la onda acústica al incidir sobre una interfase entre dos medios con diferentes propiedades acústicas.

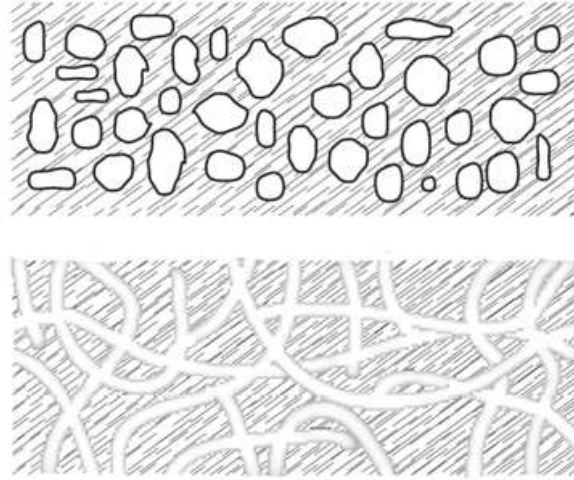


Figura 2.15. Diferencias entre la estructuras de poro cerrado y poro abierto. Imagen obtenida de Cox y D'Antonio (2004).

Si consideramos un modelo simple, como el de la figura 2.14 para un material poroso absorbente, suponiendo que el medio 1 es aire, las presiones incidente, p_i , reflejada, p_r y transmitida, p_t , son:

$$p_i = A_i e^{j(\alpha - k_x \cos(\psi) - k_y \sin(\psi))} \quad (2.46)$$

$$p_r = A_r e^{j(\alpha - k_x \cos(\theta) - k_y \sin(\theta))} \quad (2.47)$$

$$p_t = A_t e^{j(\alpha - k_x \cos(\phi) - k_y \sin(\phi))} \quad (2.48)$$

donde A_i , A_r y A_t , son las amplitudes de la onda acústica incidente, reflejada y transmitida, respectivamente; y los ángulos ψ , θ y ϕ , los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión respectivamente. Teniendo en cuenta la continuidad en la presión, tenemos:

$$A_i e^{j(\alpha - k_x \cos(\psi) - k_y \sin(\psi))} + A_r e^{j(\alpha - k_x \cos(\theta) - k_y \sin(\theta))} = A_t e^{j(\alpha - k_x \cos(\phi) - k_y \sin(\phi))} \quad (2.49)$$

Esto es cierto para todo instante de tiempo y para todos los valores de y , al ser una onda plana. Por tanto, obtenemos la relación entre los ángulos incidente y reflejado:

$$\text{sen}(\psi) = \text{sen}(\theta) \quad (2.50)$$

y entre los ángulos incidente y refractado:

$$k_1 \text{sen}(\psi) = k_2 \text{sen}(\varphi) \quad (2.51)$$

$$\frac{\text{sen}(\psi)}{c_1} = \frac{\text{sen}(\varphi)}{c_2} \quad (2.52)$$

donde c_1 y c_2 , son las velocidades del sonido en el aire y en el medio, respectivamente; ψ , θ y φ , los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión en el medio, respectivamente. El comportamiento de la onda acústica, por tanto, va a depender del valor relativo de la velocidad del sonido en ambos medios. En la mayoría de los absorbentes porosos, la velocidad del sonido es menor que la velocidad del sonido en el aire y, por tanto, el ángulo de propagación en el seno del medio menor que en el aire. De hecho, para muchos materiales absorbentes porosos, el ángulo de propagación se puede tomar como normal a la superficie.

El coeficiente de reflexión, R , se obtiene mediante la relación entre la presión incidente y la presión reflejada:

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (2.53)$$

En el coeficiente de reflexión se incluye información de variación de fase y de magnitud en el proceso de reflexión del sonido. De la ecuación (2.53) y para el caso de incidencia aleatoria tenemos:

$$R = \frac{\frac{z_1}{\rho c} \cos(\psi) - 1}{\frac{z_1}{\rho c} \cos(\psi) + 1} \quad (2.54)$$

Despejando en función de R :

$$\frac{z_1}{\rho c} \cos(\psi) = \frac{1+R}{1-R} \quad (2.55)$$

La admitancia se define como la inversa de la impedancia, es decir:

$$\beta = 1/z_1 \quad (2.56)$$

A menudo, la admitancia y la impedancia están normalizadas a la impedancia del aire y se suele denotar con el subíndice n .

La impedancia superficial se puede dar en los dos términos que la componen, resistencia (parte real) y reactancia (parte imaginaria). Por lo general, la parte real de la impedancia superficial está asociada con las pérdidas de energía y la parte imaginaria con los cambios de fase. Así pues, la impedancia acústica superficial nos proporciona una información completa de las propiedades absorbentes de un material, mientras que el coeficiente de absorción únicamente nos ofrece el valor de la absorción para cada frecuencia.

El coeficiente de absorción acústica de un material es la relación entre las energías incidente y transmitida. Viene dada por la siguiente expresión:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.57)$$

siendo R el coeficiente de reflexión acústico.

Considerando la propagación de una onda plana, la propagación del sonido en una lámina de material poroso absorbente en un sistema multicapa, se puede representar como aparece en la figura 2.16.

En la interfase de separación entre capa y capa se puede considerar que existe continuidad en la presión y en la componente normal a la superficie de la velocidad de la partícula. Esto permite establecer una relación entre la presión y la velocidad de la partícula en la parte anterior y en la parte posterior de cada capa, como se aprecia en la siguiente expresión:

$$\begin{Bmatrix} p_{li} \\ u_{li} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{xi+1} \\ u_{xi+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos(k_{xi}d_i) & j\frac{\omega\rho_i}{k_{xi}}\text{sen}(k_{xi}d_i) \\ j\frac{k_{xi}}{\omega\rho_i}\text{sen}(k_{xi}d_i) & \cos(k_{xi}d_i) \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} p_{xi} \\ u_{xi} \end{Bmatrix} \quad (2.58)$$

donde p_{xi} y u_{xi} son la presión y la velocidad de la partícula en la parte posterior de la i -ésima capa, p_{xi+1} y u_{xi+1} son la presión y la velocidad de la partícula en la parte posterior de la i -ésima más una capa, p_{li} y u_{li} son la presión y la velocidad de la partícula en la parte anterior de la i -ésima capa, d_i el espesor de la capa, ρ_i la densidad de la i -ésima capa y k_{xi} , el número de onda de la i -ésima capa.

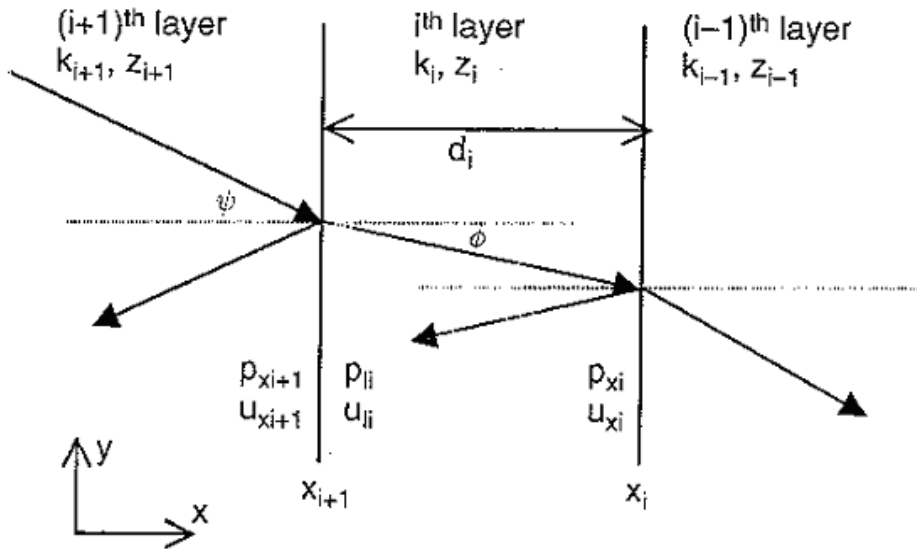


Figura 2.16. Geometría para la modelización de la matriz de transferencia para un material absorbente multicapa. Imagen tomada de Cox y D'Antonio (2004).

La componente x del número de onda se puede calcular teniendo en cuenta la Ley de Snell:

$$k_{xi} = k_i \cdot \sqrt{1 - \text{sen}^2(\phi)} = \sqrt{k_i^2 - k_{i+1}^2 \text{sen}^2(\psi)} \quad (2.59)$$

No obstante, muchos materiales absorbentes porosos presentan una velocidad del sonido pequeña en comparación con la del aire, por lo que normalmente $k_{xi} \approx k_i$ al ser $\phi \approx 0$.

Aunque este método puede ser utilizado en la obtención de los valores absolutos de velocidad y presión de la partícula, esta técnica resulta un método más potente para determinar los valores de impedancia superficial. La impedancia superficial se calcula para la capa *i-ésima* en primer lugar para, posteriormente, utilizarla en el cálculo de la impedancia superficial de la capa *i+1*; y así sucesivamente para el resto de capas que conforman el material. La relación que posibilita este proceso y que relaciona la impedancia superficial en $x = x_{i+1}$ y la impedancia en $x = x_i$ es:

$$z_{si+1} = \frac{-jz_{si}z_i \cdot \frac{k_i}{k_{xi}} \cdot \cot(k_{xi}d_i) + \left(z_i \frac{k_i}{k_{xi}}\right)^2}{z_{si} - jz_i \cdot \frac{k_i}{k_{xi}} \cdot \cot(k_{xi}d_i)} \quad (2.60)$$

donde z_{si} es la impedancia en $x = x_i$, z_{si+1} la impedancia en $x = x_{i+1}$, k_i el número de onda en la capa *i-esima* y x_i y x_{i+1} de la figura 2.16.

Para el caso de un material absorbente constituido por una única capa con terminación rígida, se puede hacer una simplificación a esta ecuación, ya que z_{si} , puede ser tomada como infinita y la impedancia superficial z_{si+1} , vendrá dada por:

$$z_{si+1} = -jz_i \cdot \frac{k_i}{k_{xi}} \cdot \cot(k_{xi}d_i) \quad (2.61)$$

Para la medida del coeficiente de absorción acústica a incidencia normal y la impedancia acústica superficial de muestras a pequeña escala se suele emplear el método descrito en la Norma UNE EN ISO 10534-2 (UNE EN ISO 10534-2, 2002). Este método precisa de un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal.

Es un método muy utilizado en la actualidad y permite la obtención de los dos parámetros citados anteriormente bajo condiciones de medida bien definidas y controladas. Es, por tanto, un método frecuentemente utilizado en la validación de los modelos de predicción para materiales absorbentes. Dado que es el procedimiento empleado para la determinación del coeficiente de absorción y la impedancia superficial de los materiales usados en esta memoria, analizaremos con detalle esta norma.

El método posee la ventaja de necesitar muestras de reducido tamaño (de unos pocos centímetros de diámetro), lo que le hace ideal para desarrolladores de materiales absorbentes, siendo una alternativa a la construcción de grandes muestras para su ensayo en cámaras reverberantes según la Norma UNE EN ISO 354 (UNE EN ISO 354, 2004) que resulta siempre más caro y laborioso. Otra ventaja que posee el método del tubo de impedancia es que puede manipularse con relativa facilidad, al ser su tamaño relativamente reducido. Por el contrario, una de las desventajas que presenta es que las medidas obtenidas pueden no ser muy representativas de las medidas obtenidas posteriormente con muestras más grandes, en cámara, como sucede en el caso de muchos resonadores. Otra de las desventajas es su limitación a materiales homogéneos. Por esta razón se utiliza fundamentalmente para materiales porosos.

La figura 2.17 muestra la configuración típica de este método de ensayo. Un altavoz es el encargado de generar ondas acústicas planas que se propagan a través del tubo. Esta onda plana se propaga a través del tubo antes de reflejarse en la muestra. La impedancia de la superficie de la muestra modifica la onda, que se refleja en ella y, mediante la medida de esta onda, se obtiene el coeficiente de absorción acústico a incidencia normal y la impedancia acústica superficial del material. Es una técnica muy utilizada en la caracterización acústica de materiales, tanto que ha sido llevada a estándares internacionales. Este procedimiento se encuentra normalizado mediante la ya mencionada Norma UNE-EN ISO 10534-2 (UNE-EN ISO 10534-2, 2002).

La necesidad de la generación de ondas planas, impone algunas limitaciones en este sistema. Las pérdidas dentro y a través del tubo deben ser minimizadas para que las ondas planas se propaguen sin sufrir ninguna atenuación. Para ello, el tubo de impedancia debe ser rectilíneo, de sección recta constante (con una precisión del 0.2%) y con paredes rígidas, lisas y no porosas, sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo. Las paredes deben ser suficientemente pesadas y macizas (preferentemente metálicas o, bien, para tubos de secciones mayores, de hormigón estanco y liso), para que no entre en vibración por acción de las señales acústicas y no presente resonancias de vibración en el intervalo de frecuencia útil del tubo (UNE-EN ISO 10534-2, 2002).

Para tubos de impedancia que trabajan con bajas frecuencias, se precisan mayores limitaciones para prevenir estas pérdidas. Por ejemplo, los tubos construidos con acero

pueden trabajar con frecuencias inferiores al umbral humano, por debajo de 20 Hz. Otro factor para minimizar las pérdidas es que el tubo debe estar limpio y no presentar rugosidades en su interior, con el fin de evitar distorsiones en la onda acústica. El tubo donde la muestra y el micrófono están colocados debe tener una sección constante a lo largo de él. Aunque la forma del tubo no es de gran importancia, en la actualidad se están empleando tubos cilíndricos. Aunque pueda parecer que los tubos cilíndricos son mejores que los prismáticos, esto no es así, además de ser estos últimos más fáciles de construir.

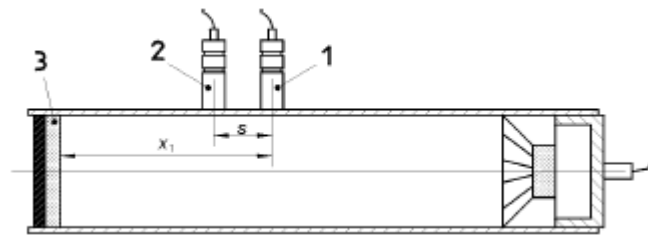


Figura 2.17. Disposición de los micrófonos de ¼ de pulgada dentro del tubo de impedancia. Imagen tomada de la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002.

En el caso de tubos cilíndricos con paredes metálicas, es recomendable un espesor del tubo de aproximadamente del 5% del diámetro. Para tubos rectangulares, las esquinas deben ser suficientemente rígidas como para evitar distorsiones de las placas de las paredes. Se recomienda que el espesor de las paredes sea aproximadamente el 10% de la sección transversal del tubo. En el caso de tubos de hormigón, las paredes deben sellarse mediante un revestimiento adhesivo liso, para asegurar la estanquidad al aire del tubo. Estos mismos principios se aplican a tubos de paredes de madera, que conviene reforzar y amortiguar mediante un revestimiento exterior de láminas de acero o de plomo.

El equipo de medida se basa en un cilindro cerrado por un extremo mediante una pared rígida en donde se incorpora la muestra. En el otro extremo, se haya una fuente emisora y dos micrófonos de ¼ de pulgada, colocados a una distancia determinada de la muestra. Dado que el tubo es, generalmente, de diámetro relativamente reducido, para determinar la impedancia acústica por este método, sólo es necesario disponer de muestras de pequeñas dimensiones. Para poder abarcar un amplio rango de frecuencias, se suelen utilizar dos tubos con distintos diámetros, uno de 100 mm, donde se obtienen

valores para el rango de frecuencias 50 – 1600 Hz, y otro de 29 mm de diámetro, para el rango de frecuencias de 500 – 6400 Hz.

El altavoz debe estar situado a unos pocos centímetros del primer micrófono para evitar que la señal decaiga hasta su llegada. La frecuencia más alta que puede ser medida con el tubo viene determinada por la siguiente ecuación:

$$f_{u \max} = \frac{c}{2d} \quad (2.62)$$

siendo d es el diámetro del tubo o la anchura máxima y c es la velocidad del sonido. Esta ecuación es la que gobierna la necesidad de emplear tubos con diferentes diámetros para obtener medidas en un amplio rango de frecuencias.

Considerando que a lo largo del tubo se están propagando ondas planas, el estado de presión en el interior del tubo viene dada por:

$$P = A(e^{ikz} + Re^{-ikz}) \quad (2.63)$$

siendo el eje z , paralelo al tubo.

La ecuación (2.63) presenta dos incógnitas, magnitud y fase. Mediante la medida de la presión en dos puntos en el interior del tubo, es posible solucionar las ecuaciones para el factor de reflexión y, a partir de ahí, obtener la impedancia y el coeficiente de absorción. Este es el principio de la función de transferencia, a menudo denominado método de los dos micrófonos.

La primera ventaja que presenta el uso de este método, es que se obtienen el coeficiente de absorción acústica y la impedancia acústica superficial para todas las frecuencias de forma simultánea, con sólo un par de rápidas medidas, por lo que es mucho más eficiente que el método de la onda estacionaria. Con este método se obtienen mejores resultados que con el uso de la sonda móvil. La razón es que, al ser la posición de los micrófonos fundamental a la hora de obtener los resultados, con dos micrófonos estas posiciones se obtienen de forma más precisa que con una sonda móvil aunque esto se podría solucionar midiendo en diferentes posiciones de micrófono y promediando después, siendo este un proceso muy lento.

La función de transferencia desde la posición del micrófono uno a la dos, se puede definir como el cociente complejo entre las presiones acústicas medidas en los dos micrófonos, P_2/P_1 . La función de transferencia entre dos posiciones de micrófonos dentro del tubo se mide como se muestra en la figura 2.17. Teniendo en cuenta que la función de transferencia es simplemente una relación de presiones, si este concepto se introduce en la ecuación (2.63), la función de transferencia entre las posiciones de micrófono 1 y 2 queda de la forma:

$$H = \frac{e^{jkz_2} + Re^{-jkz_2}}{e^{jkz_1} + Re^{-jkz_1}} \quad (2.64)$$

Donde z_1 y z_2 son las posiciones de los micrófonos de la figura 2.17. Despejando de aquí el factor de reflexión tendríamos:

$$R = \frac{He^{jkz_1} - e^{jkz_2}}{e^{-jkz_2} - He^{-jkz_1}} \quad (2.65)$$

De aquí podemos obtener la impedancia y el coeficiente de absorción acústicos.

Existen varias opciones para la medida de la función de transferencia expresada en la ecuación (2.65). La instrumentación para el procesado de las señales suele estar constituida por un amplificador y un procesador bicanal de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Se requiere que el sistema mida la presión acústica en dos posiciones de micrófono y calcule la función de transferencia H_{12} entre ellas. Es necesario también disponer de un generador capaz de producir la señal necesaria, compatible con el sistema procesador. El generador de señales debe poder generar una señal estacionaria con densidad espectral plana en el rango de frecuencias de interés. Puede generar una o varios tipos de señales de excitación: aleatoria, pseudo-aleatorias, pseudo-aleatorias periódicas, o trinos, según se necesite.

Existen algunas restricciones en cuanto al espacio de separación de los micrófonos. Si la distancia de separación entre los micrófonos es pequeña, la función de transferencia medida será inadecuada, ya que el cambio en la presión será demasiado pequeño como para ser una medida óptima. Esto nos lleva a introducir una frecuencia límite inferior para el espacio que separa los micrófonos:

$$f_1 > \frac{c}{20|z_1 - z_2|} \quad (2.66)$$

En el caso de que la distancia de separación entre los dos micrófonos sea demasiado grande, también se pueden presentar problemas. Como la separación se aproxima a la longitud de onda, las ecuaciones simultáneas pueden llegar a ser imposibles de resolver, ya que la presión medida en ambos micrófonos es idéntica. Esto nos lleva a introducir una frecuencia límite superior dada por:

$$f_u > \frac{0.45c}{|z_1 - z_2|} \quad (2.67)$$

Las frecuencias límite, baja y alta, nos indican que, para cubrir un número razonable de frecuencias, es necesario utilizar más de dos posiciones de micrófono en el tubo, normalmente son tres. Esas tres posiciones de micrófono suponen tres distancias de separación diferentes entre los micrófonos y, por lo tanto, es posible cubrir un amplio rango de frecuencias. También es importante que los orificios para otros micrófonos estén completamente bloqueados, y que los micrófonos estén correctamente montados en sus posiciones.

Resumiendo, las ventajas que presenta este método son (Oldham *et al.*, 2011):

- Determina el coeficiente de absorción a incidencia normal, coeficiente de reflexión, impedancia y admitancia, para un rango determinado de frecuencias al mismo tiempo.
- Resulta muy apropiado para la investigación y el desarrollo de nuevos materiales.
- Precisa de muestras pequeñas y de un espacio reducido para la realización del ensayo.
- Las condiciones en las que se realizan los ensayos son muy concretas y muy controladas, por lo que sirven de orientación para el diseño de este tipo de materiales.

Las desventajas de este método son:

- El coeficiente de absorción difuso sólo puede ser estimado mediante una ecuación.
- En el caso de materiales heterogéneos cuya estructura porosa varíe considerablemente a lo largo de su espesor, se introduce incertidumbre en la medida, al ser una fuente de error no controlada.
- No pueden ser usadas muestras grandes.
- Es necesario el uso de un equipo especial (tubo de impedancia).
- Puede no llegar a representar las condiciones reales de trabajo en las que estos tipos de materiales van a funcionar a lo largo de su vida útil.

Modelos del comportamiento acústico de materiales absorbentes

La propagación de la onda acústica en el interior de un material poroso homogéneo viene determinada por dos parámetros, la constante de propagación compleja (Γ) y la impedancia característica compleja (Z), directamente relacionados con la capacidad de absorción del material. Se han llevado a cabo numerosos trabajos en los que se han desarrollado modelos y teorías que intentan predecir el comportamiento de los materiales porosos desde el punto de vista acústico, obteniendo estos dos parámetros a partir de determinadas propiedades físicas.

Inicialmente, el comportamiento acústico que presentaban ciertos materiales porosos fue estudiado por Kirchoff (1876), quien propuso que la propagación del sonido en un fluido, contenido dentro de un tubo, estaba afectada por la viscosidad y la conductividad térmica, basándose en el estudio de las interacciones entre las ondas acústicas y el material y de cómo los poros de estos pueden ser considerados como conjuntos de capilares. Posteriormente, el estudio de la propagación acústica en medios porosos se ha llevado a cabo, tanto de forma empírica, como a través de modelos teóricos.

Modelos empíricos

Estos modelos tienen como principal entrada la resistencia al flujo del material. Uno de los primeros modelos empíricos fue llevado a cabo por Delany y Bazley (1970), en el que obtuvieron, a partir de la medida en numerosos materiales absorbentes fibrosos (lanas minerales), una serie de expresiones en las que relacionan las características acústicas, impedancia característica, Z_c , y el número de onda complejo, k_c , con la

resistencia al flujo de aire (propiedad relacionada con la fricción entre el esqueleto del material y el aire). En este modelo se parte, como parámetro determinante, del valor de la resistencia al flujo del material poroso para obtener su comportamiento acústico. Los valores Z_c y k_c dependen principalmente de la frecuencia de la onda acústica y de la resistencia al flujo del material. La validez de este modelo viene condicionada al cumplimiento de $0.01 < X < 1$ debido al tipo de materiales empleados. Los materiales que estudian son altamente porosos y se rigen por las siguientes expresiones:

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.057 X^{-0.754} - j0.087 X^{-0.732} \right] \quad (2.68)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 0.0978 X^{-0.700} - j0.189 X^{-0.595} \right] \quad (2.69)$$

donde ρ_0 y c_0 son la densidad del aire y la velocidad del sonido en el aire y X un parámetro adimensional igual a:

$$X = \frac{\rho_0 f}{\sigma} \quad (2.70)$$

siendo f la frecuencia, relacionada con $\omega = 2\pi f$, y σ la resistencia al flujo.

Este modelo, a pesar de funcionar en un rango acotado de resistencias al flujo y de frecuencias, ha sido muy empleado para diferentes tipos de aplicaciones en ingeniería debido a su simplicidad y a los interesantes resultados que proporciona.

Mechel (1976) estudia las limitaciones introducidas por el modelo de Delany y Bazley para bajas frecuencias y las complementa mediante una modificación de los coeficientes en las ecuaciones proporcionadas por Delany y Bazley.

Para valores $1/60 < \rho_0 f / \sigma < 1$:

$$\text{Re } z_c = 1 + 0.0489 X^{-0.754} \quad (2.71)$$

$$\text{Im } z_c = 0.087 X^{-0.731} \quad (2.72)$$

$$\operatorname{Re}\left(\frac{k_b}{k_0}\right) = 1 + 0.0978 X^{-0.693} \quad (2.73)$$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{k_b}{k_0}\right) = 0.1819 X^{-0.618} \quad (2.74)$$

Para valores $\rho_0 f / \sigma < 1/60$:

$$\operatorname{Re} z_c = \frac{1.403 k_0}{k_b} \quad (2.75)$$

$$\operatorname{Im} z_c = \frac{k_0}{2 \pi C k_b} \quad (2.76)$$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{k_b}{k_0}\right) = (1.466 + i0.212 X^{-1})^{1/2} \quad (2.77)$$

Dunn y Davern (1986), emplean el modelo de Delany y Bazley en espumas de poliuretano con valores bajos de la resistividad al flujo, proponiendo nuevos coeficientes en el modelo. Posteriormente, Miki (1990a, 1990b) realiza modificaciones al modelo de Delany y Bazley con el fin de ampliar la limitación impuesta por estos y obtiene los valores de la impedancia característica y la constante de propagación mediante un nuevo modelo de regresión. Estas modificaciones presentan buenas predicciones para aquellos valores donde el modelo de Delany y Bazley presentaba restricciones. Se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.070 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.632} - j0.107 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.632} \right] \quad (2.78)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[0.160 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.618} + j \left(1 + 0.109 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.618} \right) \right] \quad (2.79)$$

Es de resaltar que, tanto el modelo de Delany y Bazley, como el de Miki, están limitados a materiales que presentan una porosidad cercana a la unidad. Wu (1988),

establece relaciones entre la impedancia característica y la constante de propagación en espumas plásticas de celda abierta, obteniendo un modelo muy preciso con coeficientes de correlación superiores a 0.99. Voronina (1994), determina un modelo que depende de ciertos parámetros estructurales para materiales fibrosos, con diferentes densidades y tamaños de fibra, comparando los resultados obtenidos mediante el modelo con numerosas medidas. Posteriormente este modelo es mejorado (Voronina, 1996), para poder tener en cuenta a los materiales porosos con esqueleto flexible. Este mismo autor desarrolla modelos para materiales de esqueleto rígido en función de la frecuencia, porosidad y tamaño de poro que presentan valores altos (1997) y bajos (1999) de porosidad. En 2003, Voronina y Horoshenkov, desarrollan un modelo para materiales granulares sin aglutinar, y proponen una clasificación del material en función del tamaño característica de la partícula/grano. Este modelo es capaz de predecir el primer máximo de resonancia del espectro del coeficiente de absorción acústica de mezclas granulares. Este valor depende, en gran medida, del espesor del material y de otros parámetros físicos que caracterizan la microestructura del medio poroso. Las ecuaciones 2.80 a 2.85 muestran el modelo para determinar el valor de la frecuencia f_r donde se produce ese primer máximo de absorción acústica. Estas ecuaciones relacionan los parámetros que describen la microestructura del material y su espesor:

$$a = 1 + \frac{\Omega}{(1 + \Omega)(1 + M)} \quad (2.80)$$

$$b = \frac{0.2(1 - \Omega)(1 + \Omega)^2}{\sqrt{D\xi}} \quad (2.81)$$

$$p = 1.65/d \quad (2.82)$$

$$f_r = \frac{c}{8\pi a^2} \left(\sqrt{b^2 + 4ap} - b \right)^2 \quad (2.83)$$

donde:

$$M = \frac{\rho_s}{10^3 \rho_0} \quad (2.84)$$

$$\xi = \frac{D\rho_0 c}{\mu} 10^{-4} \quad (2.85)$$

donde Ω es la porosidad conectada, D la dimensión característica de la partícula, c la velocidad de sonido en el aire, d el espesor de la muestra, ρ_0 , la densidad de equilibrio del aire (kg m^{-3}), ρ_s , la densidad real del material (kg m^{-3}), μ la viscosidad dinámica del aire, ξ y M , dos parámetros adimensionales, que introducen las pérdidas de energía viscosas y el rozamiento entre los componentes del material poroso con baja densidad específica respectivamente.

Garai y Pompoli (2005) desarrollan un modelo teniendo como partida el modelo de Delany y Bazley, pero aplicado a fibras de poliéster, donde predicen la resistencia al flujo, impedancia acústica y coeficiente de absorción de este tipo de material para fibras con diámetros medios aproximadamente de $33 \mu\text{m}$.

Modelos teóricos

Dentro de los modelos teóricos, se puede hacer distinción entre modelos fenomenológicos, consistentes en sustituir un sólido poroso saturado por un fluido compresible y disipativo, y modelos microestructurales, en los que la propagación de la onda acústica se estudia de forma independiente en los poros, extendiéndose posteriormente a todo el material.

Modelos fenomenológicos

En estos modelos el material poroso se sustituye por un fluido compresible en el que tiene lugar la disipación viscosa, debida a los gradientes de velocidad que aparecen en el seno del fluido, y la disipación térmica, debida a los intercambios de calor entre el esqueleto y el fluido.

El modelo de Zwicker y Kosten (1949) (a menudo denominado modelo fenomenológico) introduce como parámetros de entrada la resistencia al flujo, la porosidad y la tortuosidad; esta última interpretada a partir del factor de estructura como

el cuadrado de la desviación por unidad de longitud del flujo de corriente normal a la superficie del material. Se puede escribir como:

$$Z_c = \frac{1}{h} \left(T + \frac{i\Omega R_s}{\omega \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.86)$$

$$k = \Omega k_0 Z_c \quad (2.87)$$

donde R_s es la resistencia al flujo, Ω la porosidad y T la tortuosidad, siendo esta última obtenida mediante métodos no acústicos (Attenborough *et al.*, 2007; Attenborough y Ver, 2008). No obstante, la ecuación de Z_c puede ser reescrita de forma que utilice sólo dos parámetros $h_e = \Omega/T^{1/2}$ y $R_e = R_s/T^{1/2}$ con lo que quedaría:

$$Z_c = \frac{1}{h_e} \left(1 + \frac{ih_e R_e}{\omega \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.88)$$

Este modelo presupone la existencia de condiciones adiabáticas en los poros.

Morse (1952) y Morse y Ingard (1968) parten de la idea de que el medio poroso está compuesto por partículas sólidas compactadas en el seno de un fluido. Estos modelos se basan en considerar que la propagación de la onda acústica se ve modificada por el esqueleto del sólido por el que se propagan. Se introducen tres parámetros, la resistencia al flujo (R_s), la porosidad abierta (Ω) y el factor de estructura (K), llegando a expresar la impedancia característica como:

$$Z_c = \frac{\sqrt{T}}{\Omega} \left(1 + \frac{i\Omega R_s}{\omega \rho_0 K} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.89)$$

$$k = \Omega k_0 Z_c \quad (2.90)$$

$$Z(d) = Z_c \coth(-ikd) \quad (2.91)$$

Donde $k_0 = \omega/c_0$. La introducción del parámetro porosidad en este modelo considera que la propagación del fluido en el interior del material está limitada por el propio esqueleto

del material y la introducción del parámetro factor de estructura, para delimitar el movimiento del fluido, ya que este no se propaga en la dirección del gradiente de presión macroscópico.

Thomasson (1977), obtiene buenas predicciones con datos de materiales utilizando una versión del anterior modelo fenomenológico basado en cuatro parámetros, introduciendo la ecuación Z_c en $Z(d)$ para evaluar la impedancia superficial de un material. Hamet y Bérengier (1993) desarrollan, a partir de este último, un modelo que introduce la dependencia con la frecuencia de los efectos térmicos y viscosos para evaluar el comportamiento de los asfaltos porosos. El modelo se puede escribir de la siguiente forma:

$$Z_c = \left(\frac{1}{h}\right)\left(\frac{T}{\gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \left(\frac{1}{F_0}\right)^{\frac{1}{2}} \right\} F_\mu^{1/2} \quad (2.92)$$

$$k = \gamma h k_0 Z_c \quad (2.93)$$

donde:

$$F_\mu = 1 + i\omega_\mu / \omega, \quad F_0 = 1 + i\omega_0 / \omega, \quad \omega_\mu = (R_s / \rho_0)(h/T), \quad \omega_0 = \omega_\mu (T / N_{PR})$$

y N_{PR} el número de Prandtl para el aire.

Mediante relaciones establecidas entre la tortuosidad y porosidad, y entre permeabilidad (relacionada con la inversa de la resistencia al flujo) y porosidad, Taraldsen (2005) modifica el modelo fenomenológico basado en tres parámetros (Zwiker y Kosten, 1949) para llevarlo a un modelo basado únicamente en uno. Este modelo, expresado en función de la admitancia es:

$$\beta = \sqrt{\gamma} \frac{h}{\sqrt{T}} \left(1 + \frac{f^*}{f} \right)^{-0.5} \quad (2.94)$$

$$f^* = \frac{1}{2\pi\rho_0} \frac{h}{\sqrt{T}} R_{eff} \quad (2.95)$$

donde:

$$\frac{h}{\sqrt{T}} = 100(10^{X/10}) \quad (2.96)$$

$$X = \frac{1}{19.76} \left[-Y + 404.55 + \sqrt{546.166 + (9.35 - Y)^2} \right] \quad (2.97)$$

$$Y = 10 \log(R_{eff}) \quad (2.98)$$

La constante de propagación del medio poroso, k , se obtiene sustituyendo por la inversa de la admitancia en la ecuación $k = \gamma h k_0 Z_c$ (Taraldsen y Jonasson, 2011).

Modelos microestructurales

Estos modelos aparecen debido a la necesidad de emplear parámetros físicos para describir el material, evitando el uso de parámetros como el factor de forma y logrando un mayor ajuste entre los datos experimentales y teóricos. Estos modelos tienen en cuenta la forma de los poros del material, en muchos casos mediante formas geométricas con mayor o menor grado de aproximación. La mayor parte de estos modelos parten del concepto inicial de sistemas porosos con forma de capilares cilíndricos paralelos a la dirección de propagación de la onda acústica. A partir de ahí se establecen una serie de parámetros de ajuste que permitan aproximar los resultados obtenidos mediante el modelo a los obtenidos experimentalmente.

En estos modelos son dos los parámetros complejos que describen el comportamiento acústico del material, la densidad dinámica equivalente, $\rho(\omega)$, y el módulo dinámico de elasticidad, $K(\omega)$. Los mecanismos de absorción en el seno del material poroso son la energía disipada debido a los intercambios de calor (mediante el módulo dinámico de elasticidad), y las pérdidas por fricción de la onda acústica con el esqueleto del material poroso (mediante la densidad dinámica equivalente).

El primer modelo basado en un conjunto de capilares cilíndricos alineados y paralelos a la dirección de propagación de la onda acústica fue propuesto por Lord Rayleigh (1877), en el que presupone una estructura rígida y diferencia los efectos térmicos y viscosos.

Zwikker y Kosten (1949) en su teoría de propagación de las ondas sonoras en el interior de los materiales absorbentes porosos, partiendo de la misma estructura que establece Lord Rayleigh, consideran la existencia de una posible inclinación de los poros e introducen el parámetro factor de estructura para introducirlo en el caso de que los poros cambien su sección a lo largo de su longitud o no estén alineados en el sentido de propagación de la onda acústica.

Los primeros modelos microestructurales parten de estudios de Attenborough (1983, 1987), que trata de evitar el empleo de parámetros que no pueden ser explicados desde un punto de vista acústico, interesándose tanto por materiales fibrosos como granulares. Este autor se centra en el estudio de la estructura del poro, comenzando por evaluar la propagación de la onda acústica en un único poro, para posteriormente extenderlo a todo el material. Para ello introduce dos funciones complejas, la función de densidad, que describe la influencia de los efectos viscosos y, el módulo de compresibilidad, que describe los efectos térmicos. Esto ofrece una base más rigurosa que los modelos empíricos y fenomenológicos a la hora de evaluar la impedancia de un material. El modelo se puede escribir:

$$\rho_b = (q^2 / \Omega) \rho_p(\omega) \quad (2.99)$$

$$\rho_p(\omega) = \rho_0 \left[1 - 2(\lambda_p \sqrt{i})^{-1} T(\lambda_p \sqrt{i}) \right]^{-1} \quad (2.100)$$

$$\lambda_p = (1/n) (8\rho_0 q^2 s \omega / \Omega \phi)^{1/2} \quad (2.101)$$

$$k_b^2 = q^2 \omega^2 C_p(\omega) \rho_p(\omega) \quad (2.102)$$

$$C_p(\omega) = (\gamma p_0)^{-1} \left\{ 1 + (\gamma - 1) \left[\left(N_{Pr}^{1/2} \lambda_p \sqrt{i} \right)^{-1} 2T \left(N_{Pr}^{1/2} \lambda_p \sqrt{i} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (2.103)$$

$$k_b^2 = \frac{q^2(\omega/c_0)^2 \left[1 - 2(\lambda_p \sqrt{i})^{-1} T(\lambda_p \sqrt{i}) \right]^{-1}}{\left[1 + 2(\gamma - 1) \left(N_{Pr}^{1/2} \lambda_p \sqrt{i} \right)^{-1} T \left(N_{Pr}^{1/2} \lambda_p \sqrt{i} \right) \right]} \quad (2.104)$$

$$Z_c = R + iX = \omega \rho_b(\omega) / k_b \quad (2.105)$$

siendo la ecuación (2.105) la impedancia característica del medio

Como se ve, este modelo presenta una dependencia de cinco parámetros: porosidad y resistencia al flujo (que se pueden obtener de forma independiente por métodos acústicos o no acústicos), tortuosidad (obtenido mediante medidas de conductividad (Brown, 1980) y los factores de forma dinámico y estático, de los que Attenborough ofrece una relación entre ambos para el caso extremo de poros con forma de cilindros alineados. Este modelo muestra una fuerte dependencia de los factores de forma con la frecuencia.

El modelo propuesto por Champoux y Stinson (1990b, 1992) intenta minimizar la dependencia de de los factores de forma con la frecuencia. Su modelo emplea poros con sección de forma triangular, circular y rectangular. Las expresiones teóricas, validadas con medidas de materiales fabricados expresamente para tal fin, establecen una relación general entre las funciones de densidad compleja y compresibilidad compleja. El modelo parte de la ecuación del módulo dinámico de densidad definido por Biot (1956a, 1956b) para materiales porosos de esqueleto rígido:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty - \left(\frac{i \alpha \Omega}{\omega} \right) F(\lambda_p) \quad (2.106)$$

donde ρ_0 es la densidad del aire, α_∞ es la tortuosidad, Ω la porosidad, ω es la frecuencia angular:

$$F(\lambda_p) = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda \sqrt{-i} T(\lambda \sqrt{-i})}{\left[1 - 2T(\lambda \sqrt{-i}) / \lambda \sqrt{-i} \right]} \quad (2.107)$$

con

$$\lambda_p = s_p \left(\frac{8\alpha_\infty \rho_0 \omega}{\sigma \Omega} \right)^{1/2} \quad (2.108)$$

donde $T(\zeta) = J_1(\zeta) / J_0(\zeta)$ es la relación entre las funciones de Bessel de orden 0 y 1. Si en este modelo se aplica las restricciones impuestas para $F(\lambda_p)$ establecidas por Johnson y colaboradores la expresión de la densidad dinámica del material queda (Johnson *et al.*, 1987):

$$\rho(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left(1 + \frac{\sigma \Omega}{i \omega \alpha_\infty \rho_0} G_j(\omega) \right) \quad (2.109)$$

donde

$$G_j(\omega) = s_p \left(1 + \frac{\lambda_p}{16} \right)^{1/2} \quad (2.110)$$

La ecuación siguiente muestra el modulo dinámico de densidad de un material poroso propuesto por Zwicker y Kosten y empleado por Champoux y Stinson en su modelo:

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\left(1 + \frac{2(\gamma-1)}{N_{pr}^{1/2} \lambda_k \sqrt{-i}} T(N_{pr}^{1/2} \lambda_k \sqrt{-i}) \right)} \quad (2.111)$$

con,

$$\lambda_k = s_k \left(\frac{8\alpha_\infty \rho_0 \omega}{\sigma \Omega} \right)^{1/2} \quad (2.112)$$

Las propiedades absorbentes del material poroso se determinan mediante la impedancia característica $Z_c(\omega)$, el número de onda complejo $k_c(\omega)$, la impedancia acústica superficial Z_s y el coeficiente de absorción acústica α :

$$Z_c(\omega) = \frac{1}{\Omega} \sqrt{\rho(\omega) \cdot K(\omega)} \quad (2.113)$$

$$k_c(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega) / K(\omega)} \quad (2.114)$$

$$Z_s = -iZ_c(\omega \cdot \cot(k_c(\omega)d)) \quad (2.115)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2 \quad (2.116)$$

donde Z_0 es la impedancia característica del aire y d el espesor de la muestra.

Si introducimos la simplificación descrita por Johnson y colaboradores (1987), la expresión del modulo de densidad queda:

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left(\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{s_k \sigma \Omega}{i N_{pr} \omega \rho_0 \alpha_\infty} G_j(N_{pr} \omega) \right] \right)^{-1} \quad (2.117)$$

donde

$$G_j(N_{pr} \omega) = \left(1 + i N_{pr} \left(\frac{\lambda_k}{4 s_p s_k} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.118)$$

En las ecuaciones (2.99) a (2.118), ρ_0 es la densidad del aire, σ , la Resistencia al flujo, ω , la frecuencia angular, $i^2 = -1$, γ , el coeficiente de dilatación adiabática del aire, N_{pr} , el número de de Prandtl del aire, P_0 , la presión atmosférica, s_p y s_k son los factores de forma de los poros definidos por Champoux y Stinson (1990b, 1992).

Este modelo, denominado modelo generalizado de Champoux y Stinson, emplea los factores s_p y s_k , necesarios para controlar los diferentes aspectos de la geometría del poro.

Allard (1993), desarrollando las teorías de Biot, asume que el movimiento del esqueleto del material es despreciable, por lo que la densidad dinámica se extrae directamente de las teorías de Biot, mientras que para la compresibilidad dinámica, emplea la formulación clásica de Zwikker y Kosten. Posteriormente, propone un modelo en el que combina la definición de los efectos viscosos propuestos por Zwikker y Kosten para

cilindros de sección circular, con la relación entre estos fenómenos y los térmicos desarrollado por Stinson, aplicando los resultados a cilindros con sección circular, triangular, rectangular y hexagonal. Se apoya además en los trabajos de Johnson y colaboradores sobre permeabilidad y tortuosidad en medios porosos (Johnson *et al.*, 1987), en los que se introducen los parámetros denominados longitudes características térmica, A' , y viscosa, A .

Horoshenkov y colaboradores, continuando con los desarrollos de autores como Yamamoto y Turgut (1988) y Attenborough (1993), desarrollan un modelo teórico en el que introduce la distribución del tamaño de los poros y por la que tratan de explicar la variación de la porosidad a través del material. A diferencia de algunos modelos teóricos anteriores, que utilizan modelos empíricos para la determinación del factor de forma, este modelo utiliza otro tipo de aproximación para obtenerlo (Horoshenkov *et al.*, 1998). El material puede ser modelado como un conjunto de tubos capilares con una cierta longitud, pero cuyo tamaño sigue una distribución estadística característica. En este modelo sólo se tienen como parámetros de entrada la porosidad, la resistencia al flujo, la tortuosidad y la desviación estándar del tamaño de poro, parámetros no acústicos que se obtienen mediante técnicas de medida sencillas (Horoshenkov y Swift, 2001).

La aproximación estadística para obtener una expresión de la impedancia característica y el número de onda, confirmando la necesidad de aplicar una corrección viscosa, es continuación del trabajo de Yamamoto y Turgut (1988). La introducción de la función de corrección viscosa supone una función de distribución de tamaño de poro y una variable compleja, especificada en términos de una variable de factor de forma compleja. La ecuación para la densidad compleja queda entonces:

$$\rho_x(\omega) = \rho_0 \left(1 - \frac{\sigma_x}{i\omega\rho_0} \bar{F}(\omega) \right) \quad (2.119)$$

donde ρ_0 , es la densidad del aire, σ_x , la resistencia al flujo específica, ω , la frecuencia angular y $F(\omega)$ la función de distribución del tamaño de poro o función de corrección viscosa. De igual forma, Horoshenkov y colaboradores, muestran que la compresibilidad compleja puede ser escrita como (Horoshenkov *et al.*, 1998):

$$C_x(\omega) = \frac{1}{\gamma P_0} \left(\gamma - \frac{\rho_0(\gamma-1)}{\rho_x(\omega)(N_{PR}\omega)} \right) \quad (2.120)$$

Donde γ es el coeficiente de dilatación adiabática del aire, P_0 la presión atmosférica, ρ_0 la densidad del aire, ρ_x la densidad compleja, ω la frecuencia angular y N_{PR} el número de Prandtl del aire.

En la realidad, la mayoría de los materiales absorbentes porosos están compuestos por poros de diferentes formas y tamaños que obedecen a una distribución estadística característica de cada uno de ellos, aunque algunos autores sugieren que, para este tipo de materiales, la forma de estos poros carece de importancia. Horoshenkov y colaboradores introducen la densidad compleja y la compresibilidad compleja, promediadas dentro del rango de los tamaños reales de los poros identificados en el seno del material (Horoshenkov *et al.*, 1998). Este argumento también se aplica a las propiedades acústicas, como son la impedancia característica y a la constante de propagación. Esta aproximación consiste en un método fácilmente aplicable en la predicción de propiedades acústicas de medios porosos que presentan una distribución log-normal del tamaño de poro. Este modelo presenta buena correlación entre los valores experimentales y los valores teóricos, aunque se observan ciertas variaciones en los valores del coeficiente de absorción en las proximidades de las frecuencias de resonancia, que se asocian a la hipótesis de suponer poros con geometrías cilíndricas.

Para el desarrollo de esta tesis se ha investigado, de forma experimental y teórica, las propiedades acústicas de nuevos materiales absorbentes, elaborados, entre otros materiales, a partir de los residuos de neumáticos fuera de uso; caucho granulado, fibra textil y metálica, materiales naturales como la perlita, arlita y vermiculita y a partir de granulado de corcho, procedente del sobrante empleado en la fabricación de tapones de corcho. Además, se realiza una comparativa de sus propiedades acústicas con algunos de los materiales acústicos porosos comerciales actualmente empleados en la construcción en España.

2.4.2.2. Aislamiento acústico a ruido de impacto

El aislamiento a ruido de impacto está referido al aislamiento a la transmisión de la energía acústica originada por los golpes. Una de las formas para conseguir una mejora

en el aislamiento a ruido de impactos es mediante la colocación de un revestimiento en la base inferior del forjado. Otra de las formas es mediante la colocación de un suelo flotante (Schiavi *et al.*, 2007b; Vigran, 2008).

En España, el CTE DB-HR obliga a la disposición de suelos flotantes en los cerramientos de separación horizontal entre recintos y a conocer de antemano las propiedades acústicas de los distintos sistemas constructivos implicados.

Un suelo flotante consiste por lo general en una superficie rígida que “flota” sobre un material elástico y que está desolidarizado de las particiones adyacentes y del forjado (Figura 2.18). Existen tres tipos de suelos flotantes (Figura 2.19), en los que la conexión entre el forjado y el acabado puede ser mediante una lámina elástica continua, tacos elásticos repartidos por toda la superficie o bien mediante rastreles de material elástico. Estas conexiones elásticas forman un sistema masa-muelle asociado al suelo flotante.

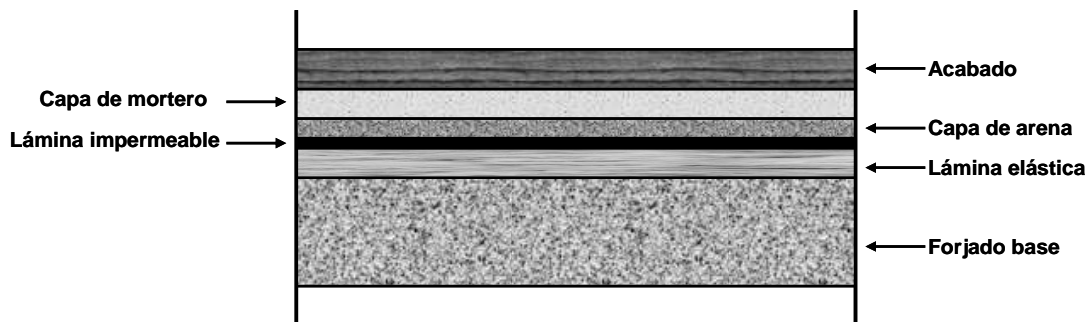


Figura 2.18. Detalle de los diferentes componentes de un suelo flotante.

Los materiales que desacoplan el forjado base del resto de componentes empleados en los suelos flotantes se denominan láminas elásticas. En la actualidad existen numerosos tipos de láminas elásticas en el mercado que presentan unas propiedades acústicas relativamente buenas.

Para un buen diseño de un suelo flotante, es fundamental comprender cómo éstos son capaces de reducir los ruidos y las vibraciones y cómo la modificación de ciertos parámetros de la lámina anti-impacto, tales como la densidad, la rigidez dinámica o la compresibilidad, afectan al rendimiento de esta solución constructiva (Sun Il y Ho-Hwan, 2008). Los conceptos básicos y el modelo matemático para un suelo flotante lo podemos encontrar en el trabajo de Cremer y colaboradores (1988). Se pueden emplear

diferentes tipos de suelos flotantes para conseguir un aislamiento a ruido de impactos, en los que podemos incluir suelos ligeros y pesados (Stewart y Craik, 2000; Hopkins y Hall, 2006; Hui y Ng, 2007).

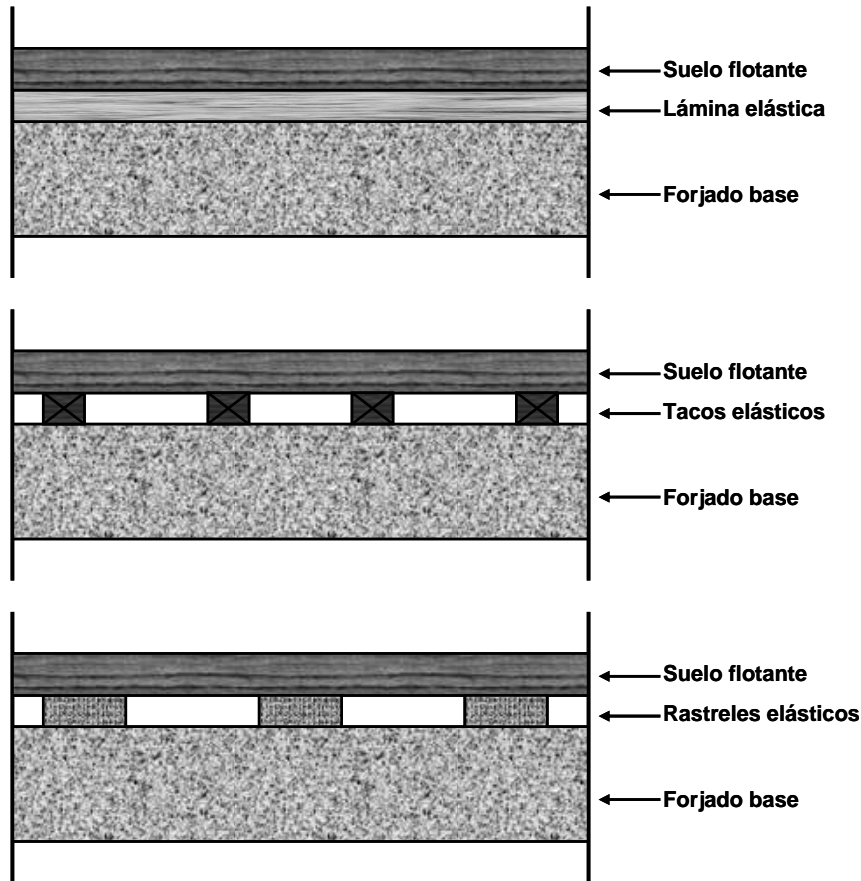


Figura 2.19. Esquema de los diferentes tipos de suelos flotantes.

El efecto que introduce la inclusión de láminas elásticas en forjados fue primeramente estudiado por Cremer (1948) y por Craik y Osipov (1995), mostrando que, mediante la inclusión en paredes de una lámina elástica de corcho, espumas, paneles de fibras o materiales reciclados, se obtenían mejoras considerables en el aislamiento. Pritz (1996), estudia las propiedades mecánicas, modulo de elasticidad dinámico y factor de pérdidas, de ciertos materiales, fieltros, corcho, PVC y espuma de PVC para su uso como recubrimientos en forjados. Últimamente se han realizado numerosos estudios basados en el empleo los residuos procedentes de los neumáticos fuera de uso (NFU), en los que se ha comprobado que se pueden obtener materiales que presenten un comportamiento físico y acústico óptimo para su utilización como láminas anti-impacto. Sirva como ejemplo los trabajos desarrollados por MirafTAB y colaboradores (1999) y Taylor (2004)

que muestran un proceso de fabricación en el que se obtienen, a partir de residuos de alfombras, materiales con propiedades viscoelásticas que tendrían aplicaciones como potenciales láminas anti-impacto. Rushforth y sus colaboradores muestran que ciertas muestras de láminas elaboradas con una proporción óptima de fibra y grano presentan un excelente comportamiento como aislante acústico comparable con algunos productos comerciales empleados en la actualidad (Rushforth *et al.*, 2005).

Para el desarrollo de esta tesis se ha investigado, de forma experimental, las propiedades acústicas de nuevas láminas anti-impacto, elaboradas a partir de caucho granulado procedente de los neumáticos fuera de uso y a partir de granulado de corcho, procedente del sobrante empleado en la fabricación de tapones de corcho. Los resultados experimentales obtenidos en laboratorio se han utilizado para desarrollar nuevas láminas elásticas para su implementación en suelos flotantes. Además, se realiza una comparativa de sus propiedades físicas y acústicas con algunas de las láminas comerciales actualmente empleadas en la construcción en España.

Mejora del aislamiento a ruido de impacto. Modelización teórica.

Para evaluar el comportamiento acústico teórico de las láminas elásticas se utiliza el modelo desarrollado por Cremer *et al.* (1988). Este modelo parte de la hipótesis de considerar el forjado base y la terminación del suelo flotante con unas dimensiones infinitamente grandes y homogéneas, acopladas entre sí mediante una lámina elástica continua caracterizada únicamente por su rigidez dinámica (Figura 2.20).

La mejora del aislamiento a ruido de impactos, ΔL , se define como la reducción del nivel de presión acústica de impactos normalizado resultante de la colocación de un recubrimiento del suelo base. Cremer y colaboradores (1988) muestran que:

$$\Delta L = 40 \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 20 \cdot \log\left[1 + \frac{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot m_h}{Z_1}\right] \quad (2.121)$$

donde f es la frecuencia central de la banda de tercio de octava (Hz), f_0 es la frecuencia de resonancia del sistema masa-muelle (Hz), m_h es la masa de la martillo y Z_1 es la impedancia mecánica del suelo flotante. Esta frecuencia de resonancia se puede expresar mediante la ecuación:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (2.122)$$

siendo s' la rigidez dinámica (N m^{-3}) y m' , la masa por unidad de área (kg m^{-2}) de la losa flotante colocada encima de la lámina elástica.

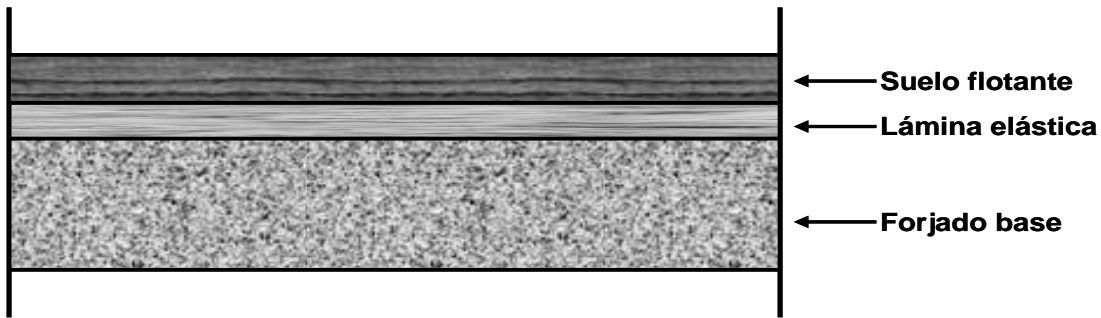


Figura 2.20. Esquema de suelo flotante ensayado en este trabajo.

En el caso de suelos flotantes pesados, que estén contruidos con un forjado base de hormigón macizo y cuya masa sea mucho mayor respecto a la masa del resto de componentes del suelo flotante, el segundo término de esta ecuación puede despreciarse, obteniendo de este forma una mejora teórica en el aislamiento a ruido de impacto de 12 dB por banda de octava. Sin embargo, esta hipótesis no se corresponde con los valores obtenidos en la realidad para los suelos flotantes pesados, resultando estos, inferiores a los predichos por esta ecuación (Vigran, 2008).

La Norma UNE EN 12354-2 (UNE EN 12354-2, 2001), en su Anexo C, propone una modificación de la ecuación (2.121), donde la constante 40 es sustituida por 30, debido a que, en base a la experiencia, se sugiere que este valor es más preciso, reduciendo de este modo la dependencia de la frecuencia a 9 dB por banda de octava. Esta ecuación quedaría entonces expresada como:

$$\Delta L = 30 \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (2.123)$$

Esta mejora en el aislamiento a ruido de impacto de un suelo flotante, como función de la frecuencia, tiene una pendiente de 30 dB respecto a la frecuencia de resonancia

(Schiavi *et al.*, 2005). Las limitaciones que presenta la ecuación (2.123) son la compresibilidad de la lámina elástica y la dependencia de la frecuencia con el tiempo.

Una lámina elástica que forma parte de un suelo flotante, con el tiempo, puede sufrir deflexión bajo el peso del forjado base, originando posibles roturas en la lámina. Estas pequeñas roturas se ven reflejadas en una disminución de su espesor, lo que puede ocasionar un aumento de su rigidez dinámica relativa y, por tanto, una disminución de las propiedades acústicas de la lámina (Schiavi *et al.*, 2005).

Mejora del Aislamiento a ruido de impacto en cámara normalizada

Para evaluar la mejora del aislamiento a ruido de impacto, las medidas de la reducción de ruido de impacto de suelos con revestimientos se llevan a cabo de acuerdo a la norma UNE EN ISO 140-8 (UNE EN ISO 140-8, 1998). En este ensayo, la lámina se coloca sobre un forjado de referencia, diseñado para simular un suelo flotante empleado habitualmente. La muestra se somete a continuación a los impactos de una máquina de martillos normalizada. Según lo establecido por la norma UNE EN ISO 140-8, el ensayo se realiza entre dos cámaras normalizadas verticalmente adyacentes, la superior, la cámara emisora, en la que está instalada el suelo flotante objeto de ensayo, y la inferior, cámara receptora.

Con este ensayo se obtienen los valores de los niveles de presión sonora a ruido de impactos normalizado para las bandas de tercio de octava en el rango de frecuencia de 100 Hz a 5000 Hz para el suelo de referencia, L_{n0} , y para el suelo de referencia con el sistema constructivo completo, L_n . La mejora a ruido de impactos normalizada, ΔL se obtiene a partir de la diferencia entre L_{n0} y L_n .

El valor $L_{n,r,0,w}$ (nivel normalizado de presión sonora de impactos ponderado para el suelo de referencia) y el valor $L_{n,r,w}$ (nivel normalizado ponderado de presión sonora de impactos para el suelo de referencia con el recubrimiento), se obtienen después de comparar los espectros obtenidos frente a la curva de referencia, definida en la tabla 3 de la norma UNE EN ISO 717-2 (UNE EN ISO 717-2, 2007) para aislamiento acústico a ruido de impactos.

Los valores de la mejora a ruido de impactos obtenidos a partir del modelo de Cremer y colaboradores (1988), $L_{n,r,0,w}$ se definen en tabla 4 según UNE EN ISO 717-2 por lo que $L_{n,r,w}$ es la diferencia entre $L_{n,r,0,w}$ y ΔL .

Para evaluar los resultados en bandas de tercio de octava con precisión de 0.1 dB, se desplaza la curva de referencia en saltos de 1.0 dB hacia la curva obtenida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor de 32.0 dB. El valor de la curva de referencia a 500 Hz, después del desplazamiento, es el valor de $L_{n,r,0,w}$ y $L_{n,r,w}$. La mejora a ruido de impactos ponderada ΔL_w , se obtiene conforme a la norma UN EN ISO 717-2 mediante la siguiente expresión:

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \quad (2.124)$$

donde $L_{n,r,0,w}$ es el nivel normalizado de presión sonora de impactos ponderado para el suelo de referencia y el valor $L_{n,r,w}$ el nivel normalizado ponderado de presión sonora de impactos para el suelo de referencia con el recubrimiento.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se detalla la metodología empleada para la consecución de los objetivos planteados en esta Memoria de Tesis Doctoral. En él se describen las diferentes técnicas para la obtención de las propiedades no acústicas y acústicas que intervienen en el comportamiento acústico de los materiales porosos.

3.1. Propiedades no acústicas de materiales porosos

3.1.1. Propiedades físicas

A continuación se describe la metodología utilizada, en esta Memoria de Tesis Doctoral, para la obtención de las propiedades físicas como son la porosidad, la tortuosidad y la resistencia al flujo, que intervienen en el comportamiento acústico de los materiales absorbentes porosos.

3.1.1.1. Porosidad

Debido a la naturaleza de los materiales estudiados en esta tesis, ha sido necesario emplear dos métodos diferentes para obtener la porosidad de las muestras. Por un lado, se ha empleado el método de saturación de agua (Vasina *et al.*, 2006), en el que, por la diferencia de las masas de una muestra, saturada y sin saturar, se puede obtener de forma rápida la porosidad. Por otro lado, el ensayo de estereopícnometría de Helio por el que a partir de las densidades real y aparente de una muestra, podemos obtener el mismo parámetro (Voronina y Horoshenkov, 2003).

En el método de saturación de agua, inicialmente, con el objetivo de eliminar la humedad y la presencia de burbujas de aire en su interior, las muestras se introducen en una estufa a 70 °C durante 10 días. Antes de comenzar el ensayo, se obtiene el peso de las muestras en seco. Posteriormente, las muestras se introducen en un recipiente en el que se cubren por completo con agua con una densidad de 1000 kg m⁻³. Pasadas 24 horas se retiran cuidadosamente y se pesan de nuevo. La porosidad abierta o conectada se obtiene mediante la expresión $\Omega = V_w / V_s$, donde V_w es el volumen de agua de la muestra una vez saturada con agua y V_s es el volumen total de la muestra. El volumen de agua que contiene la muestra se puede obtener mediante la expresión $V_w = (m_{wet} -$

3. Metodología

$m_{dry}) / \rho_w$, donde m_{wet} y m_{dry} son las masas de la muestra saturada en agua y seca, respectivamente.

Con el ensayo de estereopícnometría de Helio, podemos determinar la densidad real de las muestras. Se ha utilizado un estereopícnómetro de helio, Quantachrome SPY-3, con una celda calibrada con un volumen de 153.59 cm^3 (Figura 3.1). Con esta técnica podemos evaluar, de forma muy precisa, la densidad real de las muestras y determinar la porosidad conectada mediante la siguiente expresión:

$$\Omega = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad (3.1)$$

Donde ρ_m es la densidad aparente de la muestra y ρ_s es la densidad real de la muestra. La densidad aparente la obtenemos mediante el Principio de Arquímedes.



Figura 3.1. Estereopícnómetro de helio Quantachrome SPY-3 y celda calibrada.

Para cada una de las muestras se realizan cinco medidas de ambas densidades, con el objeto de obtener un promediado de estas. Para eliminar posibles burbujas de aire o humedad en el interior de las muestras, antes de realizar las medidas, las muestras se introducen en una estufa durante 15 días a $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Este método presenta valores más precisos que los obtenidos con el método de saturación de agua, que emplean algunos autores para materiales granulares (Vasina *et al.*, 2006) debido a las pequeñas dimensiones atómicas del helio, que le permiten acceder al interior de poros donde el

aire o el agua no pueden acceder, aumentando de esta forma el valor obtenido para la porosidad conectada de la muestra.

3.1.1.2. Tortuosidad

La medida de la tortuosidad se ha realizado mediante el empleo de un procedimiento electrolítico en el que se mide la corriente que atraviesa el dispositivo en función de la tensión aplicada entre los extremos de los electrodos, para dos situaciones. En primer lugar el electrolito solo y posteriormente el material saturado con el electrolito (Figura 3.2). Como electrodos tenemos dos placas de cobre y como electrolito una disolución de sulfato de cobre (CuSO_4) al 10%. Si hacemos pasar una corriente eléctrica a través del electrolito y medimos la diferencia de potencial, podemos obtener la tortuosidad mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \Omega \quad (3.2)$$

siendo Ω la porosidad del material, y ρ_c y ρ_f las resistividades eléctricas medidas para el electrolito con y sin el material poroso, respectivamente. El empleo de este método para granza de caucho ha sido probado en anteriores trabajos (Pfretzschner y Rodríguez, 1999). Este método se basa en el método no acústico desarrollado por Brown (1980).

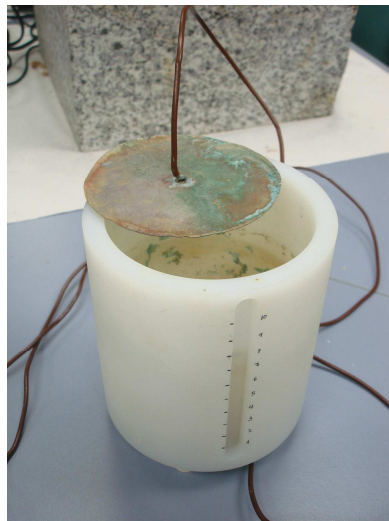


Figura 3.2. Vaso portador de la disolución de sulfato de cobre y ánodo de cobre empleados para la medida de la tortuosidad por el método de Brown (1980).

3.1.1.3. Resistencia al flujo

Como se ha descrito anteriormente, la resistencia al flujo está definida como la relación existente entre la diferencia de presiones a ambos lados de un material respecto al paso de un caudal de aire a través de éste y viene determinada por la porosidad y el tamaño de poro; siendo este último dependiente del tamaño y forma del esqueleto del material absorbente. Existen numerosas aproximaciones experimentales y semi-experimentales que se pueden emplear para estimar la resistencia al flujo de materiales porosos absorbentes en función de diferentes variables, como el radio de las fibras, tamaño de grano, la porosidad, el grado de compactación del material, la cantidad de aglutinante o la densidad de los materiales (Bies y Hansen, 1980; Mechel, 2002; Garai y Pompoli, 2005). En este trabajo se han empleado diferentes expresiones, en función del tipo de material a estudiar.

En el caso de materiales fibrosos se ha empleado la expresión dada por Mechel (2002) para fibras con tamaños comprendidos entre 20 y 30 μm .

$$\sigma = \frac{6.8\eta(1-\varepsilon)^{1.296}}{a^2\varepsilon^3} \quad (3.3)$$

donde η es la viscosidad del aire ($1.84 \cdot 10^{-5}$ Pa s), a el radio de la fibra y ε la porosidad.

Para materiales elaborados con granza de caucho aglutinada con resina se ha empleado la expresión dada por Horoshenkov y Swift (2000) y que muestra una dependencia experimental entre el porcentaje de resina y la resistencia al flujo:

$$\log_{10} \sigma = 3.074\beta + 3.794 \quad (3.4)$$

donde β es el porcentaje en peso de resina utilizada, comprendido entre 0 y 30 %.

Para el estudio de materiales elaborados con granos de corcho se ha utilizado el modelo empleado por Voronina y Horoshenkov (2003) según la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{400\mu(1-\Omega)^2(1+\Omega)^5}{\Omega D^2} \quad (3.5)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del aire (kg/m s), Ω es la porosidad de la muestra y D es la dimensión característica de la particular (mm), obtenida mediante el método descrito por Voronina y Horoshenkov (2003, 2004). Este modelo se puede emplear para determinar la resistencia al flujo de materiales granulares sin aglutinar y muestra una clara dependencia de la resistencia al flujo con la porosidad y el tamaño de grano.

En el estudio de partículas granulares esféricas se ha utilizado el modelo para materiales granulares propuesto por Umnova y colaboradores (2000) suponiendo que las partículas son esféricas de radio r_b , mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{9\mu(1-\Omega)}{2r_b^2\Omega^2} \cdot \frac{5(1-\Omega)}{5-9\Theta^{(1/3)}+5\Theta-\Theta^2} \quad (3.6)$$

donde $\Theta=0.675(1-\Omega)$, siendo Ω la porosidad abierta del material.

3.1.2. Propiedades mecánicas

A continuación se describe la metodología utilizada, en esta Memoria de Tesis Doctoral, para la obtención de las propiedades mecánicas que caracterizan las láminas elásticas que se emplean para introducir la mejora a ruido de impacto en suelos flotantes.

3.1.2.1. Rigidez dinámica

La determinación de la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de las láminas anti-impacto estudiadas en la presente tesis, se ha evaluado mediante el procedimiento indicado en la Norma UNE EN 29052-1 (UNE EN 29052-1, 1994). Mediante este procedimiento se evalúa la frecuencia de resonancia correspondiente a la vibración vertical fundamental de un sistema masa-muelle, en el que la placa de carga hace de masa y la lámina elástica de muelle (Figura 3.3).

La señal de entrada es una señal impulsiva generada mediante un martillo modal, con puntas de metacrilato y de goma, de la marca Endevco, modelo 2302-100, en un rango de 220 N, sensibilidad de 22.7 mV N⁻¹, con objeto de obtener diferentes tipos de excitación para diferentes bandas de frecuencia (Figura 3.4). El martillo modal produce una fuerza impulsiva, por cada golpe ejercido sobre la placa, capaz de excitar el sistema con una fuerza constante en el rango de frecuencias a estudiar. El ancho de banda

3. Metodología

excitado, mediante el uso de los dos tipos de punta empleados con el martillo modal, está en el rango de 0 a 200 Hz. En el caso de la banda de 200 Hz, se corresponde con una velocidad de muestreo de 512 puntos por segundo, con un tiempo total de adquisición de datos de 8 s para 4096 puntos, necesarios para obtener 1600 líneas de frecuencia. Con este número de líneas de frecuencia se obtiene una resolución de 0.125 Hz, para un ancho de banda de 200 Hz ($200 \text{ Hz}/1600 = 0.125 \text{ Hz}$). Los pulsos generados por el martillo modal son detectados por un acelerómetro piezoeléctrico de Brüel & Kjaer, modelo 4507B 005, con una sensibilidad de 1.064 mV g^{-1} (Figura 3.4). Las señales de entrada y de salida fueron analizadas mediante un sistema de adquisición de datos portable PULSE de Brüel & Kjaer, modelo 3560-C, con cuatro canales de entrada.



Figura 3.3. Disposición del ensayo para la determinación de la frecuencia de resonancia de la lámina elástica según UNE EN 29052-1.

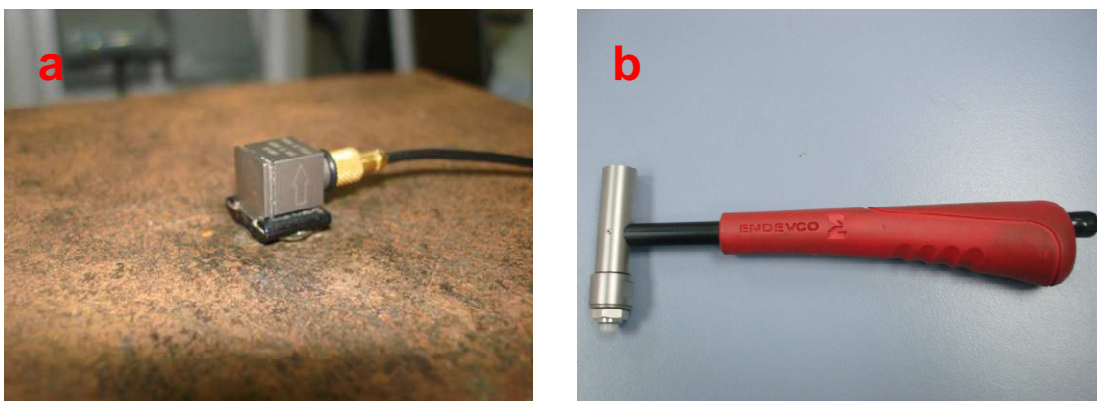


Figura 3.4. Acelerómetro piezoeléctrico 4507B 005 de Brüel & Kjaer (a) y martillo modal 2302-100 de Endevco (b).

3.1.2.2. Compresibilidad

La compresibilidad de las diferentes muestras estudiadas en la presente tesis se ha realizado conforme la Norma UNE-EN 12431 (UNE-EN 12431, 2013), que determina del espesor de los productos de aislamiento de suelos flotantes. El ensayo se ha llevado a cabo mediante una prensa Shimadzu SERVOPULSER Serie universal U Frame Body (Figura 3.5), con una fuerza máxima de 100 kN, que opera bajo control de carga.



Figura 3.5. Prensa Shimadzu SERVOPULSER Serie universal U Frame Body empleada para la determinación de la compresibilidad.

3.2. Propiedades acústicas

3.2.1. Absorción e impedancia acústica

Para la medida del coeficiente de absorción acústica a incidencia normal y la impedancia acústica superficial de las muestras de laboratorio estudiadas en la presente tesis, se ha empleado el método descrito en la Norma UNE EN ISO 10534-2 (UNE EN ISO 10534-2, 2002) en el rango de frecuencias de 100 Hz a 5000 Hz y de 100 Hz a 6400 Hz. Para ello se ha empleado un tubo de impedancia 4206, dos micrófonos de 1/4 de pulgada 4187, amplificador 2716C, calibrador sonoro 4231 y un sistema de adquisición y procesamiento de datos PULSE 3560-C con cuatro canales de entrada y dos de salida, todos de la marca Brüel & Kjaer (Figura 3.6).

3. Metodología

Para poder abarcar el rango de frecuencias estudiado, se han utilizado dos tubos con distintos diámetros, uno de 100 mm, donde se obtienen valores para el rango de frecuencias 100 – 1600 Hz, y otro de 29 mm de diámetro, para el rango de frecuencias de 500 – 6400 Hz. El software empleado para la calibración y postprocesado de datos que ha sido el programa comercial Pulse Material Testing type 7758.

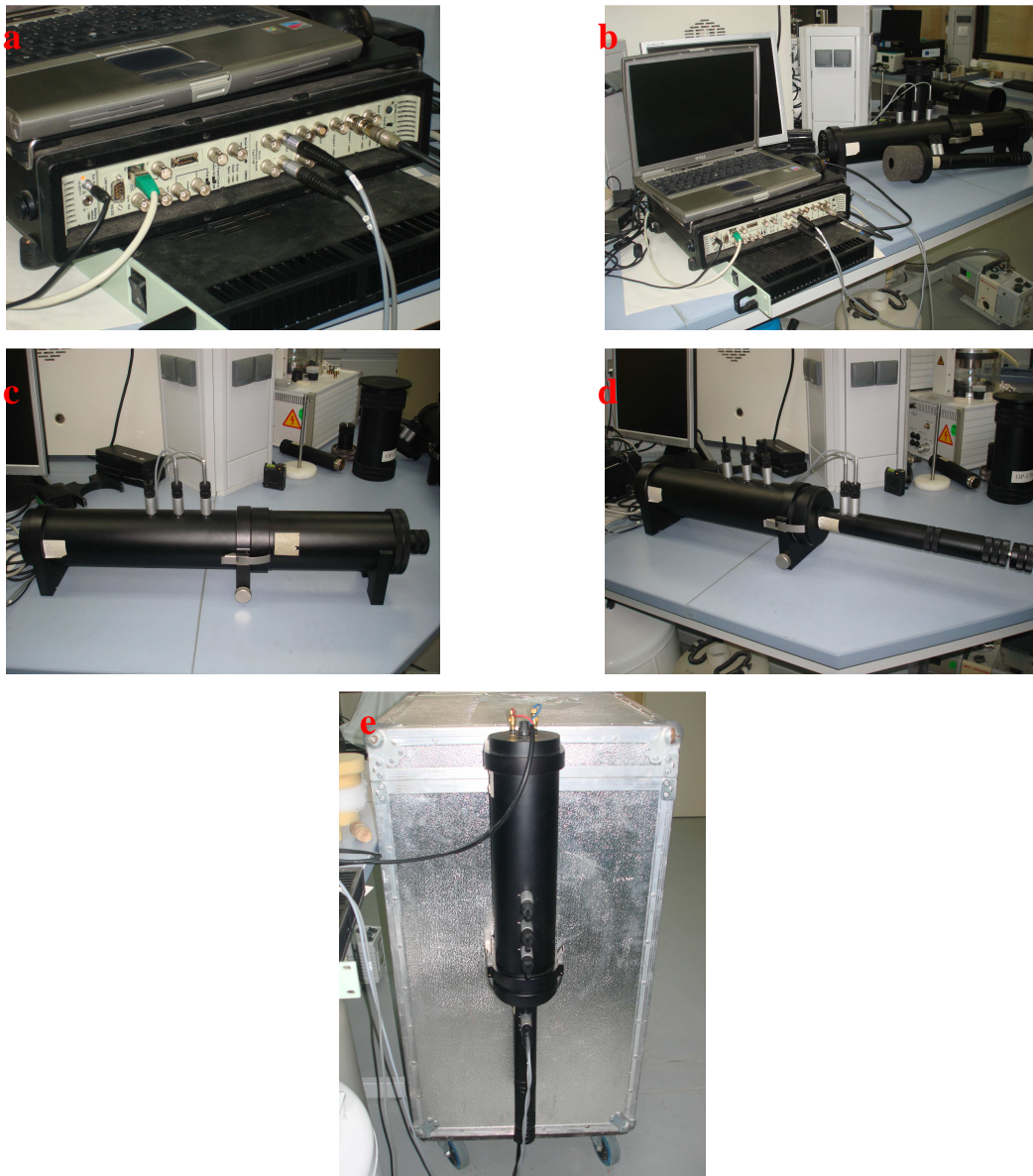


Figura 3.6. Sistema de adquisición y procesado de datos PULSE 3560-C con cuatro canales de entrada y dos de salida (a), disposición de ensayo (b), tubo de impedancia de 100 mm (c) y 29 mm (d) de diámetro utilizado en la obtención del coeficiente de absorción e impedancia acústica y sistema de montaje para muestras sin aglutinar (d).

3.3. Aislamiento acústico

3.3.1. Mejora del aislamiento a ruido de impacto en cámara normalizada

Para comparar el comportamiento acústico teórico y experimental de las láminas elásticas, las medidas de la reducción de ruido de impacto de suelos con revestimientos se han llevado a cabo de acuerdo a la norma UNE EN ISO 140-8 (UNE EN ISO 140-8, 1998).

El ensayo se ha llevado a cabo en las cámaras normalizadas que tiene la empresa AUDIOTEC de Valladolid. El volumen de las cámaras emisora y receptora es de 52.8 m³ con una superficie común es de 12.1 m². El suelo de referencia estaba compuesto por un forjado unidireccional de bovedilla de 25 + 5 cm enlucido con yeso en la cara inferior. El sistema constructivo a evaluar está formado por el suelo de referencia más la lámina elástica y una solera de mortero de cemento de 5 o 7 cm, presentando un espesor total de 37.5 o 39.5 cm, respectivamente (Figura 3.7). La lámina elástica desacopla de forma dinámica el forjado de referencia del suelo flotante. La lámina elástica se ha aplicado con una pistola de aire comprimido a la que se le había colocado una boquilla con una punta especial. Este ensayo se ha realizado en primer lugar para el forjado de referencia y, posteriormente, con el sistema constructivo completo, con la lámina elástica y la solera.

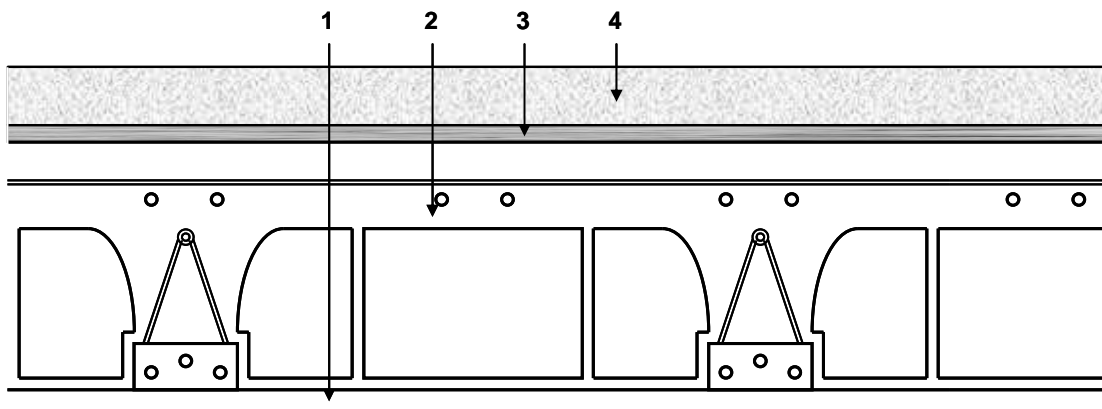


Figura 3.7. Detalle constructivo del forjado. (1) enlucido de yeso, (2) forjado unidireccional de bovedilla de 25 + 5 cm, (3) lámina elástica, (4) solera de mortero de cemento.

En este ensayo se ha utilizado una máquina de impactos normalizada de Brüel & Kjaer modelo 3207 colocada en cuatro posiciones diferentes en el recinto emisor, con un

ángulo de 45° respecto a las paredes de la sala y a más de un metro de ellas. El nivel de presión sonora en la sala receptora se midió con un micrófono móvil de Brüel & Kjaer modelo 4189 y con un analizador PULSE de Brüel & Kjaer modelo 3560-B-030, con una duración de un minuto. No fue necesaria la corrección por ruido de fondo. El tiempo de reverberación en la sala receptora se midió teniendo en cuenta una posición de la fuente sonora omnidireccional de Brüel & Kjaer modelo 4292, para tres posiciones de micrófono con dos caídas por posición.

Este ensayo, debido a su coste económico y a lo laborioso del mismo, ya que precisaba de una muestra de dimensiones considerables, únicamente se ha realizado para las muestras que presentan mejor comportamiento en laboratorio.

3.3.2. Mejora del aislamiento a ruido aéreo en cámara normalizada

El aislamiento a ruido aéreo se obtuvo en cámara normalizada conforme a la Norma UNE EN ISO 140-3 (UNE EN ISO 140-3, 1995). El ensayo se ha llevado a cabo en las cámaras normalizadas que tiene la empresa AUDIOTECH de Valladolid.

En primer lugar se ha realizado el ensayo del forjado base, forjado unidireccional de bovedilla de 25 + 5 cm, enlucido con yeso en la cara inferior. Posteriormente, se ha procedido a colocar el revestimiento del suelo. El sistema constructivo a evaluar estaba formado por el suelo de referencia más la lámina elástica y una solera de mortero de cemento de 5cm (433 kg m⁻²) o 7 cm (473 kg m⁻²), presentando un espesor total de 37.5 o 39.5 cm, respectivamente.

Para la construcción del forjado base se ha empleado un bastidor de dimensiones 4.4 m por 4 m, en el que se colocan las viguetas, bovedilla, zunchos y ferralla. Posteriormente se vertió el hormigón y se vibró hasta igualar la superficie. El tiempo de secado de la muestra fue de 40 días. Posteriormente se aplicó un enlucido de 1.5 cm de yeso por la cara inferior. Para colocar el revestimiento a ensayar, se proyectó mediante máquina la lámina elástica cubriendo por completo toda la superficie de ensayo, dejándola secar tres días para, a continuación, verter una capa de mortero.

En este ensayo, para la medida de los niveles de ruido en las salas emisora y receptora, se generó ruido rosa en dos posiciones de fuente, emplazadas como mínimo a 0.7 m de

las paredes. Para cada posición de fuente se realizaron 3 mediciones con un micrófono giratorio en la zona de campo difuso de la cámara emisora, teniendo en cuenta mantener una distancia mínima de 0.7 m entre el micrófono y las paredes de la sala, y 1 m respecto a la fuente emisora y el suelo en la sala emisora, con un barrido de 1 m. El ruido de fondo se midió inmediatamente después de medir el nivel de ruido en la sala receptora. El tiempo de medida, para obtener una señal estabilizada, fue de 48 segundos. Las medidas se realizaron en bandas de tercio de octava para las frecuencias comprendidas entre 100 y 5000 Hz. Para las medidas del tiempo de reverberación se emplearon 3 posiciones de micrófono y dos posiciones de fuente separadas al menos tres metros entre ellas en la cámara receptora.

Los instrumentos de medida empleados fueron una fuente de ruido omnidireccional 4292, un analizador PULSE 3560, micrófonos 4189 y un calibrador 4231, todos de la marca Brüel & Kjaer.

4. CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS MATERIALES ACÚSTICOS PARA SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN

Este capítulo constituye el núcleo fundamental de esta Memoria de Tesis Doctoral. En él, se exponen los resultados más relevantes del trabajo de investigación desarrollado. Consta de seis apartados en los que se compilan otros tantos trabajos de investigación, de los que cuatro ya han sido publicados en revistas internacionales indexadas, uno pendiente de publicar y otro aún en la revisión inicial.

En ellos se aborda el estudio del comportamiento acústico de diferentes tipos de materiales sostenibles. En todos estos trabajos, inicialmente, se realiza un estudio en detalle de las propiedades estructurales acústicas de los materiales a evaluar.

En los cuatro primeros trabajos, se estudia el comportamiento de materiales destinados a funcionar como materiales porosos absorbentes del sonido. En el primer trabajo se analiza el comportamiento acústico como material absorbente de la fibra textil y el caucho, procedentes de los residuos de neumáticos de vehículos pesados, mezclados con una resina acrílica y conformados mediante un proceso de termocompresión.

En el segundo trabajo, se estudia el comportamiento acústico de granos de caucho, con diferente granulometría, mezclados con resina de poliuretano empleando el modelo de Champoux y Stinson (1992) y el tubo de impedancia.

En el tercer trabajo, basado en el estudio del comportamiento acústico de granos de corcho de diferente granulometría, se realiza una comparativa entre los resultados experimentales, obtenidos en tubo de impedancia, y el modelo desarrollado por Voronina y Horoshenkov (2003, 2004) para materiales granulares sin aglutinar.

En el cuarto trabajo, se estudia el comportamiento acústico, como material acústico absorbente, de materiales naturales, como la perlita, arlita y vermiculita, y su comportamiento en función de las proporciones de resina empleadas en su fabricación.

Los trabajos quinto y sexto, están relacionados con el comportamiento acústico de láminas elásticas empleadas en suelos flotantes. En el quinto trabajo se estudia, inicialmente, el comportamiento experimental y teórico de láminas elásticas fabricadas

con granos de caucho y resina poliuretano en diferentes proporciones; para, finalmente, comparar los resultados teóricos y experimentales obtenidos en laboratorio, con los obtenidos en cámaras normalizadas.

En el sexto trabajo, el grano de corcho es el componente principal de las láminas elásticas desarrolladas. En este trabajo, se realiza un estudio teórico y experimental de las propiedades de estas láminas y se analiza su comportamiento en función del tipo de resina empleada y en función del tamaño de grano empleado.

4.1. Nuevos materiales absorbentes elaborados con fibras textiles procedentes de los neumáticos fuera de uso

Maderuelo-Sanz, R.; Nadal-Gisbert, A.V.; Crespo-Amorós, J.E.; Parres-García, F. (2012). A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). Appl. Acoust. 73:402-408.

4.1.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento acústico de materiales absorbentes porosos fabricados con la fibra textil y el caucho procedente de los neumáticos fuera de uso, con y sin resina, y que habían sido conformados mediante un proceso de termocompresión. Además se analizó el comportamiento acústico de un sistema multicapas formado por una capa de estos materiales compuestos y un panel perforado fabricado con granos de caucho reciclado (GTR).

4.1.2. Materiales empleados

El material empleado en este trabajo fue la fibra textil procedente de los neumáticos fuera de uso. Esta fibra presentaba diámetros en el rango comprendido entre 20 y 30 μm . Para la medida de los diámetros de la fibra se utilizó una máquina de visión digital Mitutoyo Digital Micrometer, tomando un promediado del diámetro correspondiente a 30 fibras por cada muestra. El material estaba compuesto, principalmente, por un residuo de naturaleza elastomérica, denominado Ground Tire Rubber (GTR), suelto y aglutinado, fibra textil y fibra metálica (acero). La fibra textil, sin ser previamente limpiada, fue mezclada junto con el caucho y la fibra metálica, que no pudo ser aislada durante el proceso de separación inicial. La composición aproximada de este material empleado se muestra en la tabla 4.1.

Para determinar las diferencias en el comportamiento acústico, las muestras fueron fabricadas con y sin resina. La cantidad de resina utilizada en la fabricación de las muestras se determinó mediante el Índice de Impregnación, I , definido por la siguiente expresión:

$$I(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (4.1)$$

donde P_h es la masa de la muestra humedecida con la resina y P_s es la masa de la muestra seca. La resina utilizada fue una resina acrílica, RESITEX CPS, fabricada por Francotex y diluida en solución acuosa de 53 g L^{-1} .

Material	Porcentaje
GTR (Ground Tire Rubber)	72.4
Fibra textil	27.2
Acero (fibras)	0.1
Otros	0.3

Tabla 4.1. Composición aproximada del material empleado, en % en peso.

Para fabricar las muestras, la fibra textil fue inicialmente tamizada con el fin de lograr la separación del GTR y, posteriormente, mediante separación manual, se eliminaron las fibras de mayor longitud. Un ejemplo típico de las muestras se puede apreciar en la figura 4.1.

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de termocompresión, mediante una prensa de 10 toneladas y dos soportes macho-hembra de dimensiones $184 \times 169 \times 20 \text{ mm}^3$ y $255 \times 175 \times 70 \text{ mm}^3$. Para finalizar, las muestras se recortaron mediante un disco circular con los diámetros adecuados para su empleo en el tubo de impedancia, con dimensiones de 100 mm y 29 mm de diámetro, con el objeto de obtener los valores del coeficiente de absorción acústica para frecuencias entre 50 Hz a 1.6 kHz y 500 Hz a 6.4 kHz, respectivamente. En la tabla 4.2 se muestra el espesor, la densidad, así como los parámetros de fabricación, presión aplicada, temperatura e índice de impregnación de cada una de las muestras.

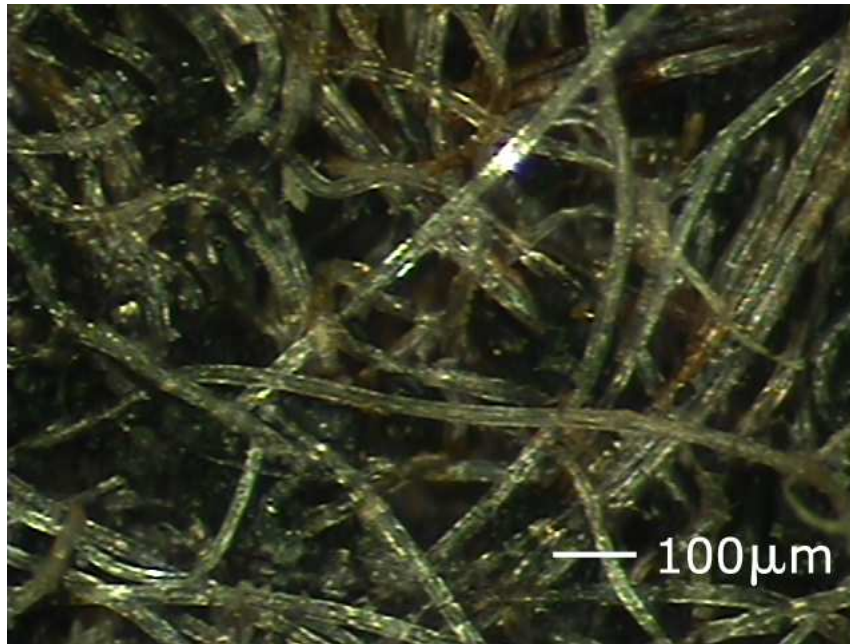


Figura 4.1. Fibra textil con partículas de caucho.

Muestra	Espesor (cm)	Densidad (kgm^{-3})	Presión (MPa)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Índice Impregnación (%)
M-A	0.54	693	0.315	130	80
M-B	0.63	511	0.032	130	80
M-C	0.63	546	0.032	130	0
M-D	0.52	637	0.158	130	80
M-E	2.28	441	0.003	220	80
M-F	1.65	591	0.011	130	0
M-G	1.00	739	0.126	130	80

Tabla 4.2. Propiedades y parámetros de fabricación de las muestras.

4.1.3. Propiedades no acústicas

Debido a las diferentes condiciones de fabricación de las muestras, se encontraron diferentes propiedades no acústicas derivadas de diferentes microestructuras del material. Estas propiedades se muestran en la tabla 4.3.

Cuando un material absorbente fibroso es sometido a compresión, sus propiedades acústicas se ven modificadas, disminuyendo su capacidad de absorción de la onda acústica. El material sometido a compresión sufre una disminución de su porosidad conectada, al mismo tiempo que incrementa su tortuosidad y, por tanto, su resistencia al flujo. En el caso de la muestra M-A, la aplicación de una presión relativamente alta supone que el bajo valor de porosidad viene acompañado por un aumento de la resistencia al flujo. La muestra M-E, como era de esperar, presenta el valor más alto de porosidad, ya que la presión a la que es sometida en su fabricación presenta el valor más bajo de todas las muestras estudiadas. La variación de las propiedades no acústicas de las muestras M-D y M-G, disminución de porosidad y aumento de resistencia al flujo, y en el caso de las muestras M-B y M-C, aumento de porosidad y disminución de resistencia al flujo, no se corresponde con un aumento o disminución de la tortuosidad respectivamente.

Muestra	Porosidad	Tortuosidad	Resistencia al flujo (Pa s m ⁻²)
M-A	0.418	1.138	34549
M-B	0.569	1.550	11067
M-C	0.544	1.480	7780
M-D	0.466	1.268	23832
M-E	0.630	1.716	14543
M-F	0.501	1.365	16538
M-G	0.390	1.063	14460

Tabla 4.3. Propiedades no acústicas de las muestras.

Todas las muestras presentan un sistema poroso en el que los poros están interconectados entre sí. Este es uno de los factores más importantes en la absorción acústica, así como la resistencia al flujo causada por la estructura del material, lo que ocasiona la disipación de energía acústica en los poros. En todas las muestras las formas de los poros, así como su tamaño, presentaban varios órdenes de magnitud (Figura 4.2).

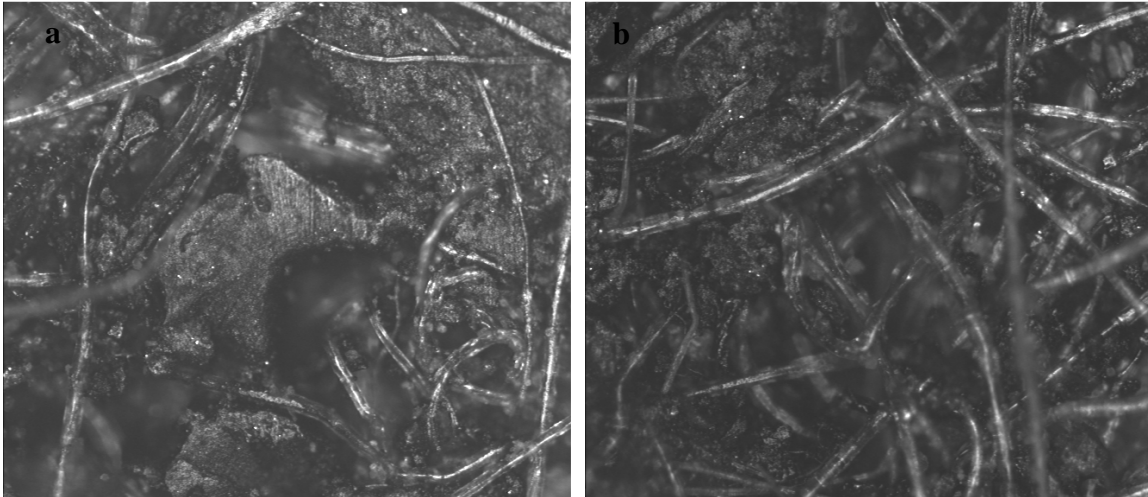


Figura 4.2. Microfotos de la muestra M-G (a) y M-E (b) y forma de poro, caucho y fibra textil.

4.1.4. Comportamiento acústico de muestras simples

Cuando una onda acústica incide sobre un material poroso absorbente, la estructura del material tiende a vibrar. Esas vibraciones ocasionan la aparición de pequeñas cantidades de calor debido a la fricción entre las fibras, por lo que existe una transformación de la energía acústica en energía calorífica. El empleo de una resina para aglutinar las fibras introduce una disminución de la porosidad en el material de partida, aumentando la resistencia al flujo, disminuyendo las pequeñas vibraciones existentes entre fibras y, por tanto, disminuyendo la capacidad de absorción acústica del material.

La figura 4.3 muestra el coeficiente de absorción a incidencia normal de todas las muestras analizadas en este trabajo. Estos resultados muestran que la muestra M-E presenta el mejor comportamiento acústico de todas las ensayadas en cuanto a valor del coeficiente de absorción. Para este material, el máximo del coeficiente de absorción, con un valor de 0.99, se obtiene a la frecuencia de 2000 Hz. Las muestras M-B y M-C, presentan comportamientos similares, aún teniendo índices de impregnación diferentes.

La adición de resinas introduce un aumento en la rigidez de la muestra M-B. Estas resinas, utilizadas por lo general para unir fibras sintéticas, reducen la fricción entre las fibras y, por lo tanto, la disipación de energía calorífica y el coeficiente de absorción.

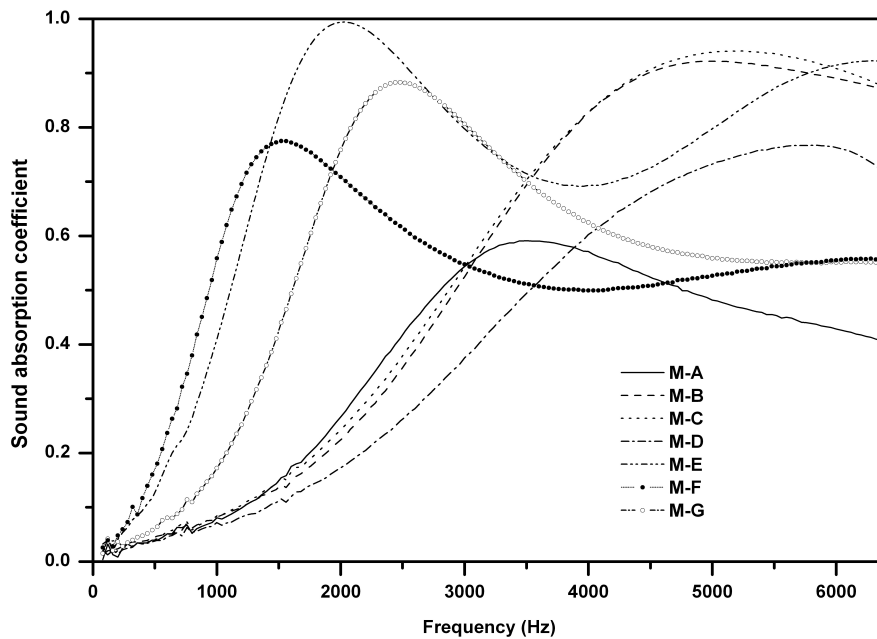


Figura 4.3. Espectro de los coeficientes de absorción de las muestras usadas en este trabajo.

Las muestras M-A y M-D presentan propiedades físicas similares a excepción de la presión de compactación. Castagnede y colaboradores muestran que la compresión en un material fibroso disminuye sus propiedades acústicas (Castagnede *et al.*, 2000). Bajo compresión, las fibras se encuentran unas más cerca de otras, sin haber cambios en las dimensiones y posiciones de estas. Esta compresión da lugar a una disminución del espesor del material. Además de esto, un aumento de la compresión da lugar a un aumento de la densidad. Como se ha explicado antes, al aumentar la compresión se obtiene un ligero aumento en la tortuosidad y en la resistencia al flujo y una disminución en la porosidad y las longitudes características térmica y viscosa.

Las muestras M-F y M-G presentan un comportamiento acústico similar. En el caso del material M-F, un aumento del espesor de la muestra y la ausencia de resina supone un primer máximo del coeficiente de absorción a la frecuencia de 1200 Hz. La muestra M-G, con una disminución del espesor y un índice de impregnación del 80%, muestra un máximo del coeficiente de absorción a la frecuencia de 2500 Hz, siendo este último superior al anterior.

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran, respectivamente, la parte real y la parte imaginaria de la impedancia superficial de las muestras. La parte real es la resistencia, asociada a las pérdidas de energía y la parte imaginaria, la reactancia, asociada a los cambios de fase de la onda acústica. En este caso, se aprecia un mejor comportamiento para las muestras M-B, M-C y M-D que para el resto de muestras.

Para poder comparar los resultados de las muestras estudiadas con materiales absorbentes empleados actualmente en construcción, se obtuvieron los coeficientes de absorción acústica para cuatro espesores diferentes, 0.75, 1.05, 1.35 y 2.10 mm, de un fibra de vidrio, con una densidad de 120 kg m^{-3} y un diámetro de fibra de entre 8 y 12 μm .

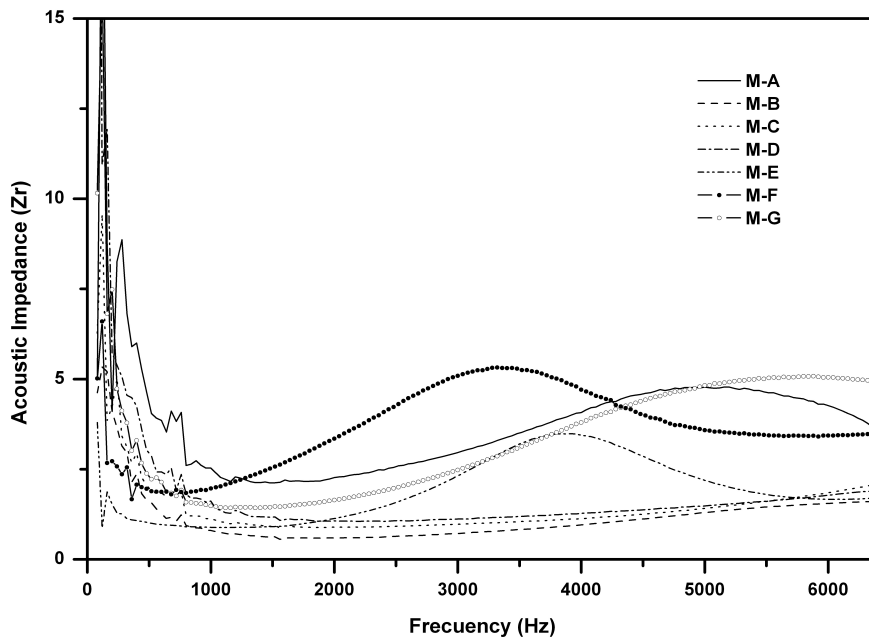


Figura 4.4. Parte real de la impedancia superficial de las muestras.

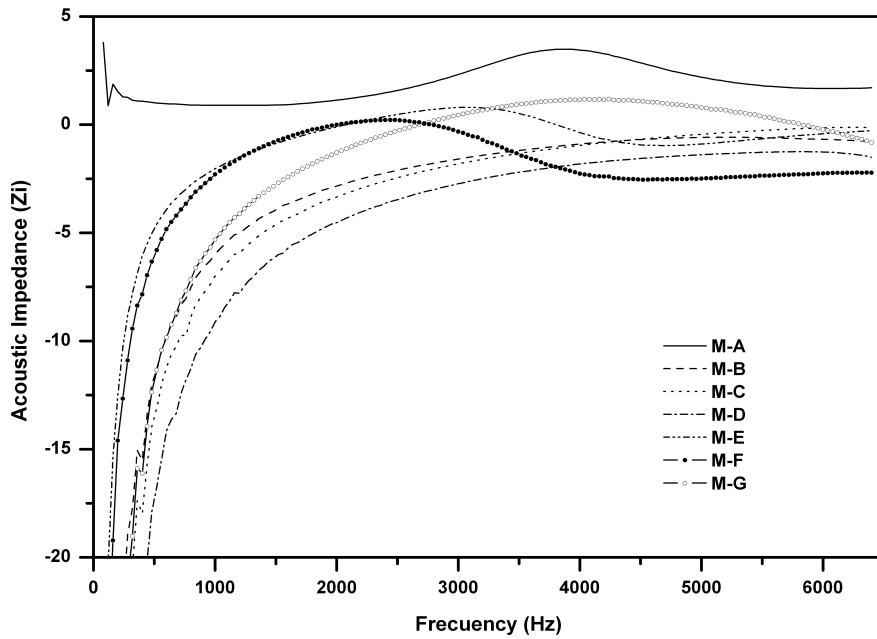


Figura 4.5. Parte imaginaria de la impedancia superficial de las muestras.

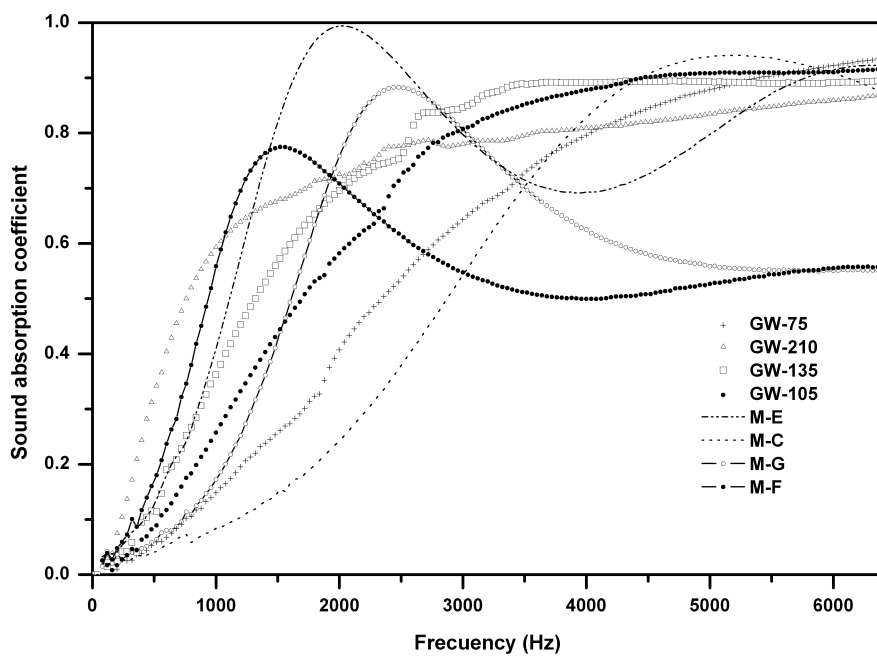


Figura 4.6. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras utilizadas en este trabajo y de fibra de vidrio con diferentes espesores.

La figura 4.6 muestra el coeficiente de absorción a incidencia normal de muestras con espesores similares a los de la fibra de vidrio, las muestras M-C, M-E, M-F y M-G. El mejor comportamiento acústico, en el caso de la fibra de vidrio, lo presenta la muestra GW-210. La muestra M-E, con un espesor similar al anterior, presenta un mejor comportamiento que GW-210. Las muestras M-C y GW-75, presentan un comportamiento acústico similar.

4.1.5. Comportamiento acústico de materiales multicapas

Para evaluar el comportamiento de materiales multicapas, compuestos por doble capa, se estudiaron las muestras de materiales M-F-B (M-F + M-B), M-B-D (M-B + M-D) y M-E-D (M-E + M-D) para compararlas, posteriormente, con los materiales que las conformaban de forma individual.

El coeficiente de absorción de la muestra M-B-D presenta un aumento con la frecuencia entre 0 y 4000 Hz. En las muestras M-D-E y M-B-F, el primer máximo aparece a la frecuencia de 1000 Hz, tendiendo el máximo de absorción a desplazarse hacia las bajas frecuencias (Figuras 4.7 a 4.9).

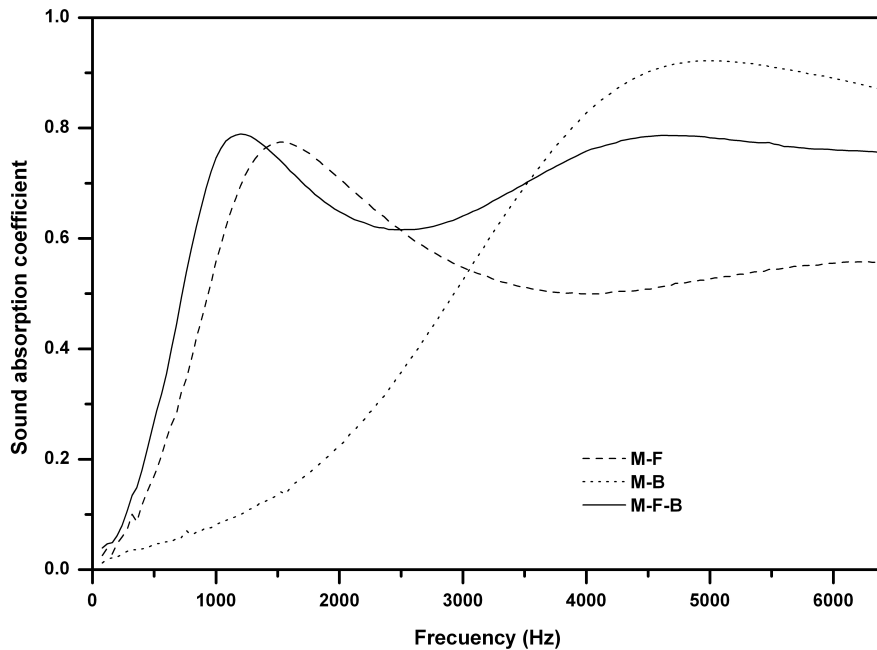


Figura 4.7. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras M-F, M-B y M-F-B.

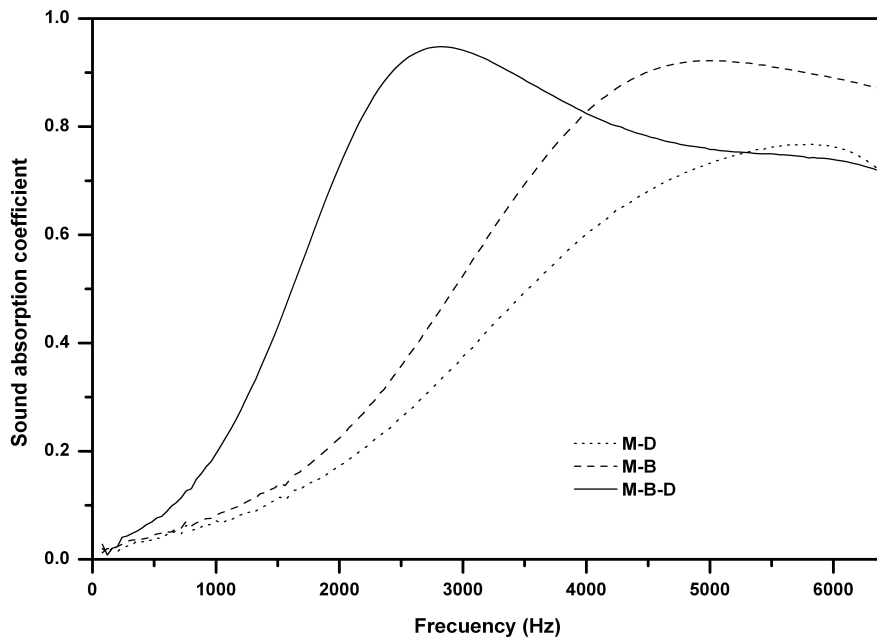


Figura 4.8. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras M-D, M-B y M-B-D.

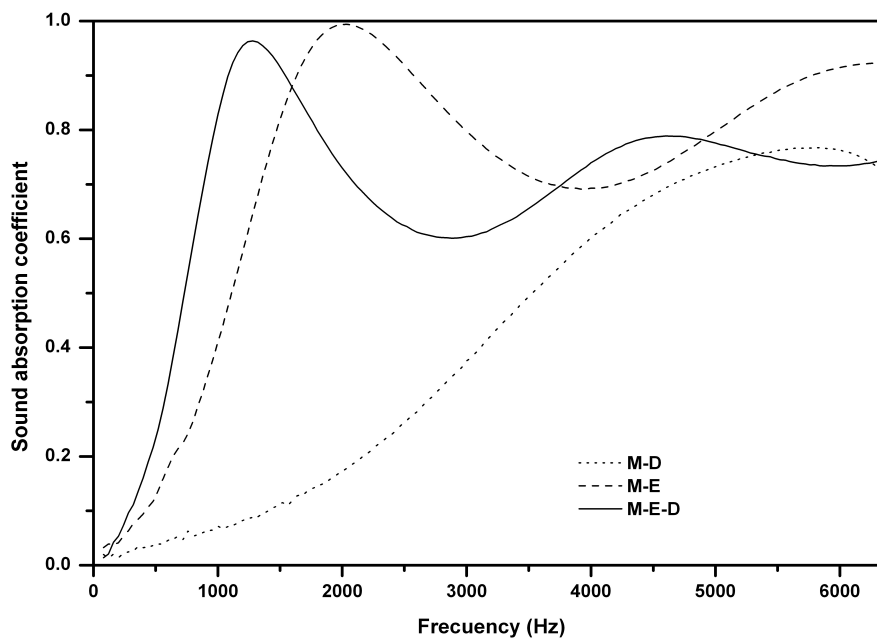


Figura 4.9. Espectro del coeficiente de absorción de las muestras M-D, M-E y M-E-D.

Se puede apreciar que, en estos materiales multicapas, elaborados con dos muestras, la muestra que está enfrentada a la onda acústica incidente es la principal causante del comportamiento acústico de la muestra. El desplazamiento del máximo de absorción hacia frecuencias menores es consecuencia, únicamente, de un aumento en el espesor de la muestra.

4.1.6. Comportamiento acústico del panel perforado

Para mejorar el comportamiento acústico de un material absorbente poroso, se pueden emplear paneles perforados. La porosidad, número y tamaño de las perforaciones, espesor del panel y la densidad del material fibroso, pueden modificar de forma considerable la impedancia acústica superficial y el coeficiente de absorción acústica de la muestra. Para este trabajo se fabricaron dos paneles perforados para las muestras M-E y M-G. El panel perforado, de un espesor de 3 mm, se fabricó mediante GTR, sinterizado a 220 °C, con una porosidad de 17.2%.

El efecto que introduce el panel perforado en el coeficiente de absorción de las muestras M-E y M-G se puede ver en la figura 4.10. Este panel hace que el primer máximo del coeficiente de absorción de ambas muestras se desplace hacia frecuencias más bajas y que disminuya ligeramente para altas frecuencias. En el caso de la muestra M-E, ese desplazamiento es muy pequeño, alrededor de 200 Hz, mientras que en el caso de la muestra M-G el desplazamiento es de 500 Hz. El material fibroso es el que nos va a dar los valores del coeficiente de absorción, mientras que el panel perforado hace que el máximo se desplace hacia la izquierda.

El coeficiente de absorción acústica para este tipo de materiales, compuestos por un panel perforado y un material absorbente fibroso, se puede obtener a partir de los valores de la impedancia acústica del material fibroso, mediante las siguientes expresiones (Hong *et al.*, 2007):

$$\alpha_n = \frac{4\rho_0 c_0 (R_p + R_1)}{(\rho_0 c_0 + R_p + R_1)^2 + (\omega M_p + M_1)^2} = \frac{4(r_p + r_1)}{(1 + r_p + r_1)^2 + (\omega m_p + m_1)^2} \quad (4.2)$$

$$r_p = \frac{32\eta t}{\varepsilon \rho_0 c_0 d^2} \sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} \quad (4.3)$$

$$\omega m_p = \frac{\omega t}{\sigma c_0} \left(1 + \left(3^2 + \frac{k^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (4.4)$$

$$k = d \sqrt{\omega \rho_0 / 4\eta} \quad (4.5)$$

donde $\rho_0 c_0$ es la impedancia característica del aire; k es la constante del panel perforado, $\rho_0 = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$, $c_0 = 340 \text{ m s}^{-1}$, $\eta = 1.85 \times 10^{-5} \text{ kg m s}^{-1}$, R_p , R_l , M_p y M_l son, respectivamente, la resistencia y la reactancia de la muestra compuesta por el panel perforado y del material fibroso. La impedancia superficial se obtiene a partir de la medida en tubo de impedancia y la porosidad, ε (%), el espesor, t (mm), y el diámetro de las perforaciones, d (mm), del panel perforado son fácilmente medibles.

En la figura 4.11, se observa que los valores obtenidos por este modelo muestra la tendencia que presenta el material multicapa CM-G. Existe un buen ajuste entre los valores experimentales y los teóricos obtenidos a través del modelo.

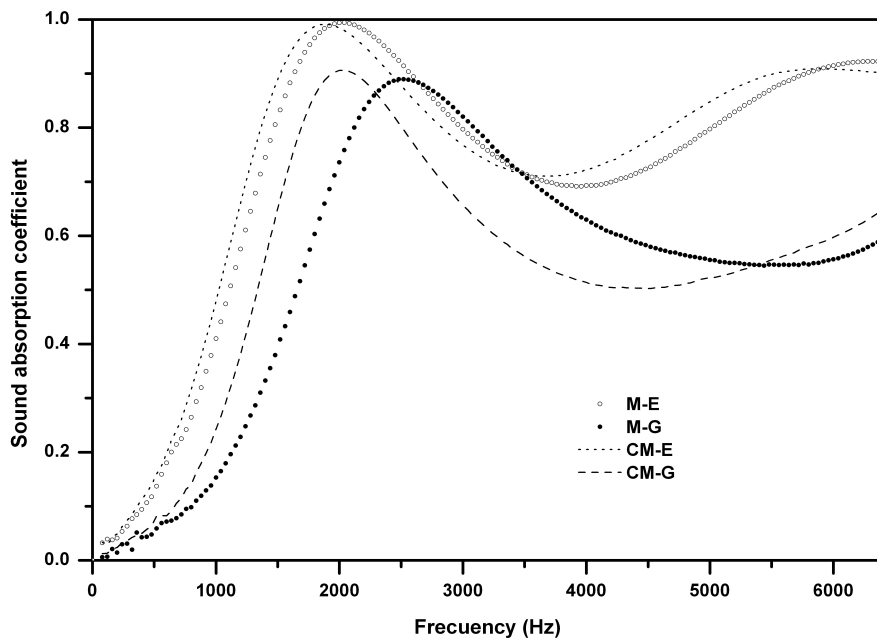


Figura 4.10. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-E y M-G frente a las mismas muestras con el panel perforado, CM-E y CM-G, respectivamente.

El máximo valor del coeficiente de absorción experimental, 0.90, se obtiene a la frecuencia de 2040 Hz. En el caso del valor teórico, el máximo valor del coeficiente de absorción se obtiene a la frecuencia de 2200, dando un valor de 0.93. En el caso de la muestra M-E, el ajuste entre valores teóricos y experimentales es bueno hasta la frecuencia de 2000 Hz. Para frecuencias mayores, encontramos que la aproximación no es la esperada.

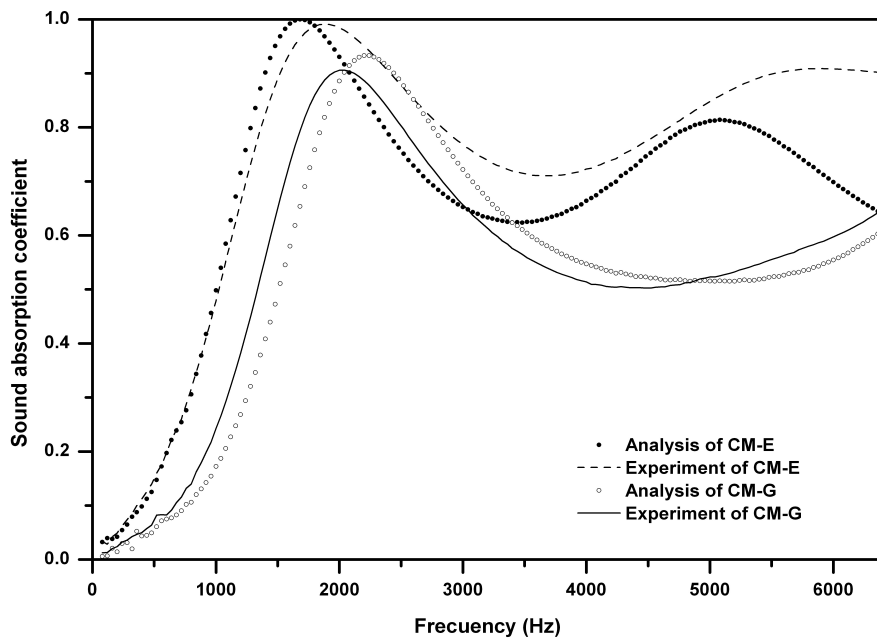


Figura 4.11. Coeficiente de absorción teórico y experimental de las muestras CM-E y CM-G.

4.2. Comportamiento acústico materiales absorbentes porosos fabricados con caucho reciclado y resina poliuretano

Maderuelo-Sanz, R.; Barrigón, J.M.; Martín-Castizo, M.; Gómez, V.; Rey, G. (2013). Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. Lat. Am. J. Solids Struct. 10:585-600.

4.2.1. Objetivos

Se pretendía investigar, de forma experimental, las propiedades acústicas de materiales absorbentes porosos fabricados con granos de caucho, de diferentes tamaños, procedente de los neumáticos de vehículos pesados y aglutinados con resina de poliuretano. Para evaluar su comportamiento acústico se compararon los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos con el modelo de Champoux y Stinson (1990b, 1992). Este modelo teórico es el que ha mostrado la mejor aproximación entre los valores teóricos y los valores experimentales para este tipo de materiales (Pfretzschner y Rodríguez, 1999). Tiene como parámetros de entrada propiedades no acústicas fácilmente medibles, como la porosidad, tortuosidad y la resistencia al flujo y dos factores de forma que se obtuvieron al ajustar el modelo teórico con los resultados experimentales.

4.2.2. Materiales empleados

El material empleado en este trabajo fue el grano de neumático, con diferentes tamaños de partículas, procedente del triturado de los neumáticos fuera de uso de vehículos pesados. Este material estaba principalmente compuesto por un residuo de elastómero denominado Ground Tyre Rubber (GTR). Además de este material, en la fabricación de las muestras a analizar, se emplearon otro tipo de materiales como la vermiculita, el poliestireno expandido (EPS) (figura 4.12) y un mortero de cemento. Para conseguir unir estos materiales, se mezclaron con una resina, en base poliuretano, de baja viscosidad (SikaBond T53, elaborada por Sika) como aglutinante, en un rango de proporciones comprendido entre 5-25% en peso. El empleo de este tipo de resina se debió a su baja viscosidad ya que no es recomendable utilizar resinas de alta viscosidad puesto que estas pueden llegar a reducir la porosidad y provocar que la mezcla de los

componentes de las muestras sea poco eficiente. En la tabla 4.4 podemos ver los componentes y las propiedades físicas de las diferentes muestras fabricadas.

El proceso de fabricación de las láminas estudiadas se puede resumir de la siguiente manera. Los componentes fueron mezclados en sus respectivas proporciones como muestra la tabla 4.4, en un rango de temperatura de 20-30 °C. Una vez hecha la mezcla, y siempre teniendo en cuenta la temperatura y el tiempo de secado de la resina, se aplicaron con una pistola de aire comprimido, que presentaba una boquilla rectificada con un diámetro especial para evitar la obturación de la misma. Posteriormente, una vez secada la resina, se obtuvieron muestras circulares de 29 y 100 mm de diámetro.



Figura 4.12. Microfoto de la muestra M-1 obtenida con una máquina de visión digital Mitutoyo Vision Machine en donde se pueden apreciar las partículas de caucho, EPS y vermiculita

Muestra	Tamaño de grano (mm)	Componentes de la muestra	Densidad (kg m ⁻³)	Resina %	Espesor A (mm)	Espesor B (mm)
M1	<2.0	GTR/ EPS /Vermiculita	408.7	5	14.0	26.5
M2	<3.5	GTR (75%)	526.6	25	14.0	28.5
M3	0.5-1.0	GTR (80%)	559.8	20	16.0	30.0
M4	1.0-3.0	GTR (88%)	547.6	12	16.5	29.5
M5	1.0-3.0	GTR (84%)	554.7	16	17.0	31.5
M6	0.5-1.0	GTR (84%)	594.6	16	14.0	29.0
M7	<0.5	GTR (80%)	520.0	20	17.5	32.5

Tabla 4.4. Propiedades físicas y composición de las muestras.

4.2.3. Propiedades no acústicas

Debido a los diferentes componentes de las muestras, se han observado diferentes microestructuras que derivan en diferentes propiedades no acústicas, como se puede apreciar en la tabla 4.5; y, por tanto, en diferentes comportamientos acústicos. La porosidad se distribuye entre poros comprendidos en un rango de 1 μm a 1 mm.

Muestra	Porosidad	Tortuosidad	Resistencia al flujo (Pa s m^{-2})
M-1	0.617	2.749	8865
M-2	0.600	1.580	36517
M-3	0.360	1.880	25633
M-4	0.535	2.402	14551
M-5	0.472	1.303	19313
M-6	0.589	1.635	19313
M-7	0.310	1.291	25633

Tabla 4.5. Propiedades no acústicas de las muestras.

A excepción de las muestras M-3 y M-6, se aprecia como la porosidad disminuye conforme aumenta la proporción de resina. La muestra M-1 presenta los valores más altos de porosidad debido a la composición de la mezcla, ya que la vermiculita y el EPS contribuyen con la presencia de microporos propios al valor total de porosidad abierta/conectada del material. En el caso de la muestra M-2, el tamaño de partícula de GTR, con una gran proporción de tamaños de partícula grandes, y la proporción de resina, son los que determinan su porosidad. Las muestras M-3 y M-7 presentan un valor de porosidad muy similar, que puede ser atribuido a la proporción de resina y al tamaño de grano de ambas. Estos valores tan bajos de porosidad se deben a que los poros entre las partículas se rellenan de resina. En el resto de muestras, los valores similares de porosidad, aun difiriendo en las proporciones de resina, son debidos a los diferentes tamaños de granos y la proporción de éstos en cada muestra.

Los valores de la resistencia al flujo vienen determinados, en cierta medida, por la porosidad, tamaño de poro y proporción de resina de cada muestra. Los rangos de resistencia al flujo de estas muestras están comprendidos en el rango de 8865 a 36517 Pa s m^{-2} (Tabla 4.5). La resistencia al flujo aumenta progresivamente con el aumento de

la concentración de resina para partículas de tamaños comprendidos entre 0 y 6 mm (Swift *et al.*, 1999). La figura 4.13 muestra esta tendencia, a medida que la porosidad aumenta, la resistencia al flujo disminuye.

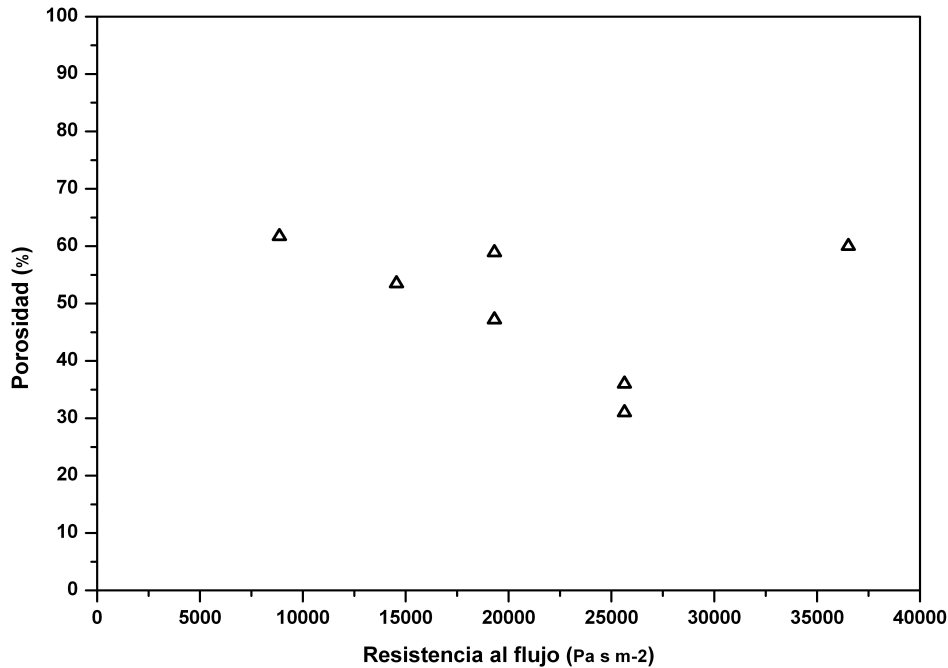


Figura 4.13. Porosidad en función de la resistencia al flujo para las muestras de GTR.

Los valores de tortuosidad para cada muestra, obtenidos mediante el método de Brown (1980), se muestran en la tabla 4.5. Estas medidas fueron realizadas aplicando una corriente continua, advirtiendo una linealidad en los resultados (Figura 4.14).

Muestra	Modelo de regresión	R ²
M-1	0.0731 I – 0.0165	0.9981
M-2	0.0929 I – 0.0440	0.9977
M-3	0.0678 I – 0.0044	0.9980
M-4	0.0780 I – 0.0257	0.9965
M-5	0.0816 I – 0.0249	0.9974
M-6	0.0780 I – 0.0247	0.9983
M-7	0.0773 I – 0.0407	0.9915

Tabla 4.6. Recta de regresión y coeficiente de variabilidad de los puntos evaluados experimentalmente para la obtención de la tortuosidad, donde I se corresponde con la intensidad (A).

La tabla 4.6 muestra la recta de regresión de estos puntos, junto con su coeficiente de determinación. Las diferencias encontradas en los valores de tortuosidad de las diferentes muestras se deben a las diferentes microestructuras de estas. El rango está comprendido entre 1.291 a 2.749. Estas diferencias se deben a la proporción de resina, así como a la proporción en los tamaños de grano de cada una de ellas. En el caso de la muestra M-1, el valor tan elevado se debe la composición de esa muestra.

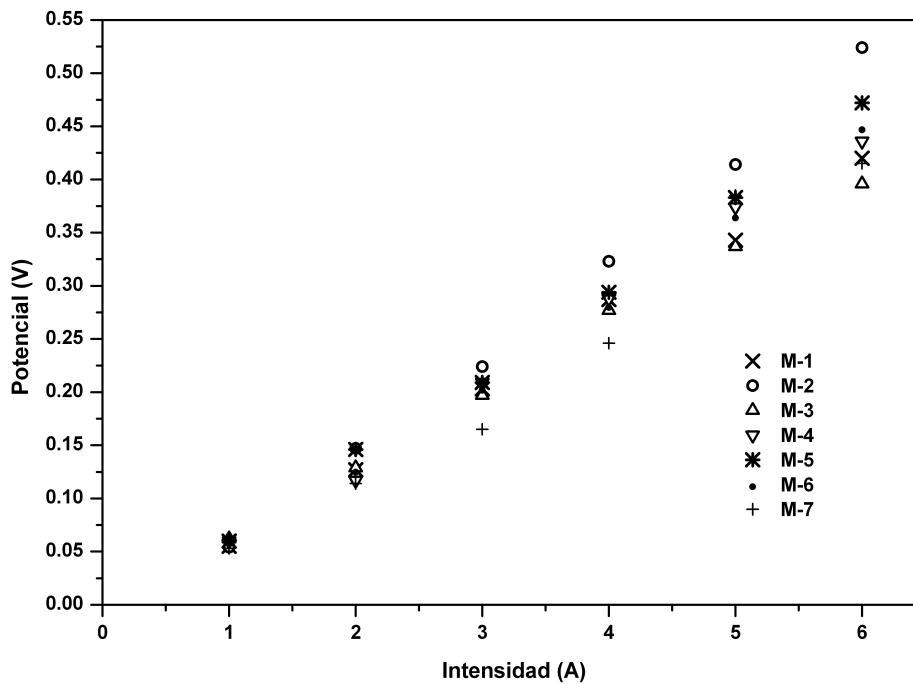


Figura 4.14. Diferencia de potencial en función de la intensidad aplicada para la determinación de la tortuosidad mediante el método de Brown (1980).

4.2.4. Propiedades acústicas

Es sabido que el comportamiento acústico de un material poroso depende fundamentalmente de su porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo y espesor. Cuando la onda acústica se propaga en el interior de un material poroso, la energía acústica se va disipando. Estas pérdidas de energía son debidas a la compleja microestructura del material y a los efectos viscosos, pérdidas térmicas y viscosas en la interfase de separación de dos materiales con propiedades distintas. El aire es un fluido y la energía acústica se disipa por rozamiento con los poros. Las pérdidas térmicas se deben al paso

de calor del aire al esqueleto del material y son más importantes a bajas frecuencias. Un aumento del espesor del material hace que aumente la absorción a bajas frecuencias.

En este trabajo se han ensayado dos espesores diferentes por cada muestra. La figuras 4.15 y 4.16 muestran los coeficientes de absorción acústica a incidencia normal para los espesores A y B definidos en la tabla 4.4. Se pueden apreciar los máximos de absorción para las muestras M-1 y M-4, con valores de 1.00 y 0.96, respectivamente, para la frecuencia de 2560 Hz. Ambas muestras presentan un comportamiento similar presentando, sin embargo, diferentes espesores, 14.0 y 16.5 mm, y porosidades, 0.617 y 0.535, respectivamente.

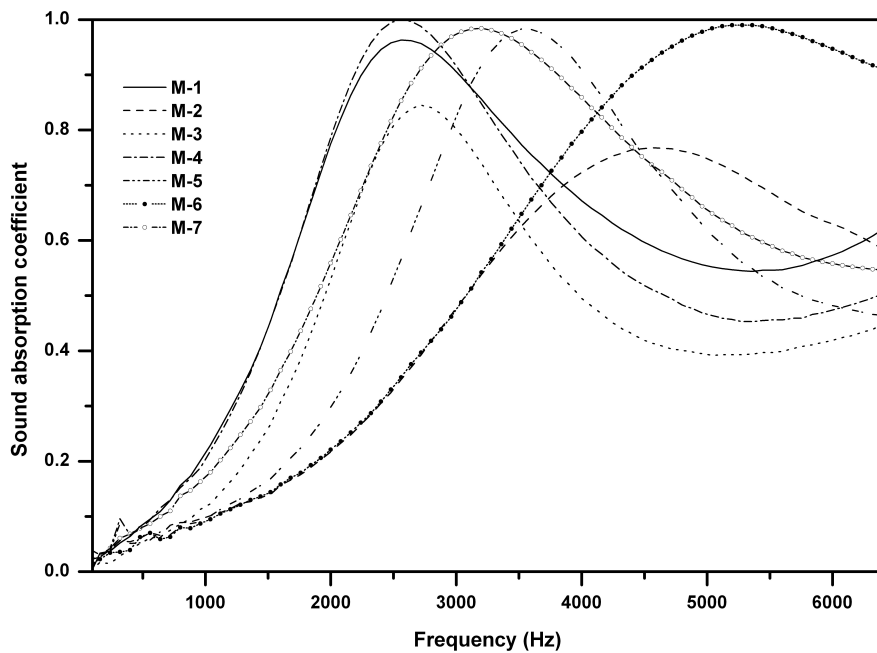


Figura 4.15. Coeficiente de absorción para muestras con espesor A.

Los resultados experimentales obtenidos parecen indicar que, con un material absorbente elaborado con GTR, vermiculita y EPS, con tamaño de partícula inferior a 2 mm, con 14.0 mm de espesor y, consolidado con 12% en peso de resina, podemos obtener un espectro de absorción elevado respecto al resto de muestras ensayadas en este trabajo. Todo esto se debe a la porosidad adicional que introducen la vermiculita y

el EPS, que modifica de forma sustancial los valores de la porosidad, resistencia al flujo y tortuosidad del material.

Las muestras M-3 y M-7 presentan valores de porosidad similares, aunque sus tamaños de partícula difieren ligeramente. El porcentaje de resina es el mismo para las dos, aunque para la muestra M-3 con un mayor espesor y un aumento de la tortuosidad, podemos observar un desplazamiento del máximo de absorción a la frecuencia de 2600 Hz, con un valor del coeficiente de absorción de 0.86. La muestra M-7, teniendo un espesor y una tortuosidad inferiores a la muestra M-3, presenta un máximo de absorción de 0.98 a la frecuencia de 3220 Hz. En el caso de la muestra M-5, su comportamiento acústico es similar al de la muestra M-7, alcanzando el máximo de absorción a 3560 Hz. Las muestras M-6 y M-2, presentan propiedades no acústicas similares a excepción de la proporción de resina. Sin embargo, el espectro del coeficiente de absorción de la primera es mejor que el de la muestra M-2, debido a su alto valor de tortuosidad y a su mayor espesor.

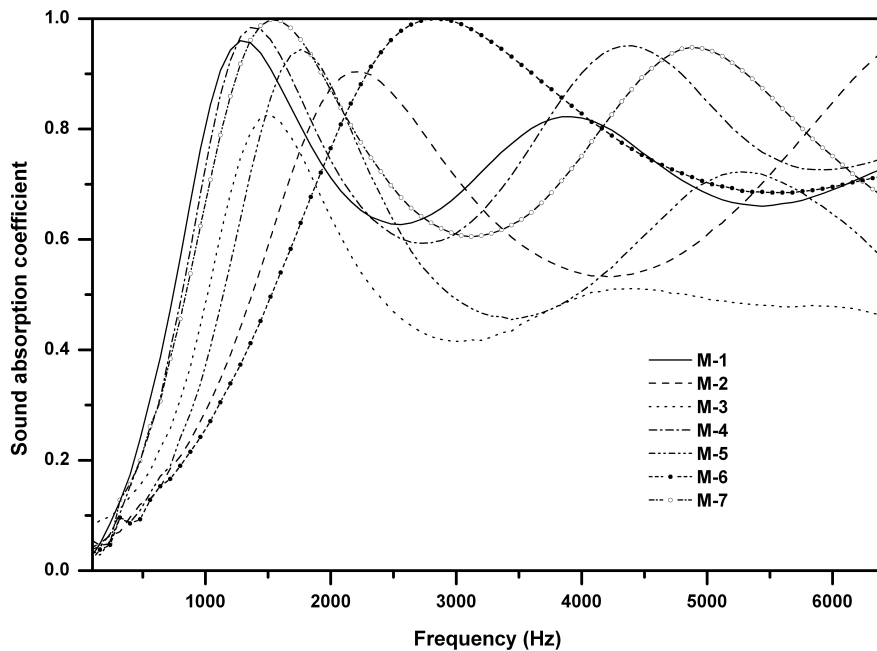


Figura 4.16. Coeficiente de absorción para muestras con espesor B.

En la figura 4.15 podemos apreciar el coeficiente de absorción a incidencia normal para las todas las muestras con espesor B, dado en la tabla 4.4. Como ya es conocido, un aumento en el espesor del material supone un desplazamiento del espectro de absorción hacia frecuencias menores. Este nuevo espesor podría no acompañar a una mejora del coeficiente de absorción, por lo que se puede establecer que existe un espesor que tiene en cuenta los efectos viscosos y térmicos con la estructura del material (Swift *et al.*, 1999).

Las figuras 4.17 y 4.18 muestran la parte real e imaginaria de la impedancia superficial de las muestras con espesor A. En este caso, se aprecia un mejor comportamiento para las muestras M-1 y M-4. El valor del máximo de la parte real de la impedancia de las muestras M-1, M-3 y M-4 es inferior al resto de las muestras, lo que se traduce en un aumento del coeficiente de absorción en la proximidad del máximo de absorción (Figura 4.15).

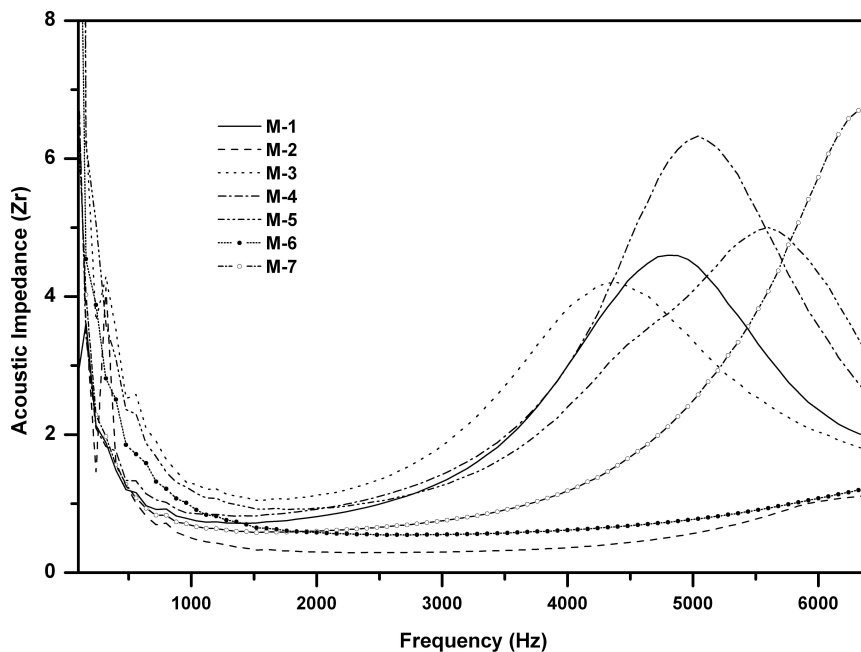


Figura 4.17. Parte real de la impedancia acústica de las muestras con espesor A.

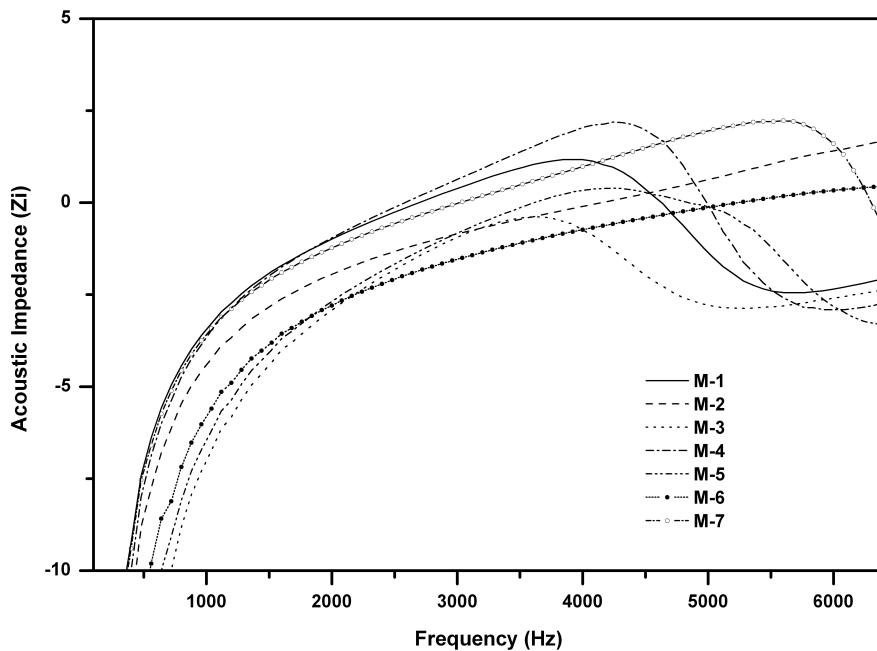


Figura 4.18. Parte imaginaria de la impedancia acústica de las muestras con espesor A.

Las partes real e imaginaria de la impedancia superficial tienden a desplazarse hacia las bajas frecuencias, como consecuencia del aumento de la tortuosidad de las muestras. En el caso de las muestras M-2 y M6, este máximo se mantiene lo que resulta en una disminución del coeficiente de absorción.

4.2.5. Comparativa entre resultados experimentales y teóricos

Para diseñar materiales acústicos adecuados para su uso como absorbente poroso es necesario evaluar, teóricamente, cual va a ser su comportamiento acústico en función de determinadas propiedades no acústicas de estos materiales. Hoy en día se han desarrollado numerosos modelos capaces de predecir este comportamiento, minimizando tiempo y pruebas experimentales.

Los modelos de materiales absorbentes, con una estructura porosa compleja, precisan de mayor detalle para poder evaluar la interacción entre la estructura porosa del material y las ondas acústicas. En este trabajo se ha utilizado el modelo de Champoux y Stinson (1990b, 1992), cuyas ecuaciones hemos descrito anteriormente (ecuaciones (2.99) a

(2.118)). Este modelo precisa de cinco parámetros de entrada, porosidad, resistencia al flujo, tortuosidad y dos factores de forma de poro. Los tres primeros se han obtenido de forma no acústica, mientras que, los factores de forma de poro, mediante la comparación entre los resultados experimentales y teóricos.

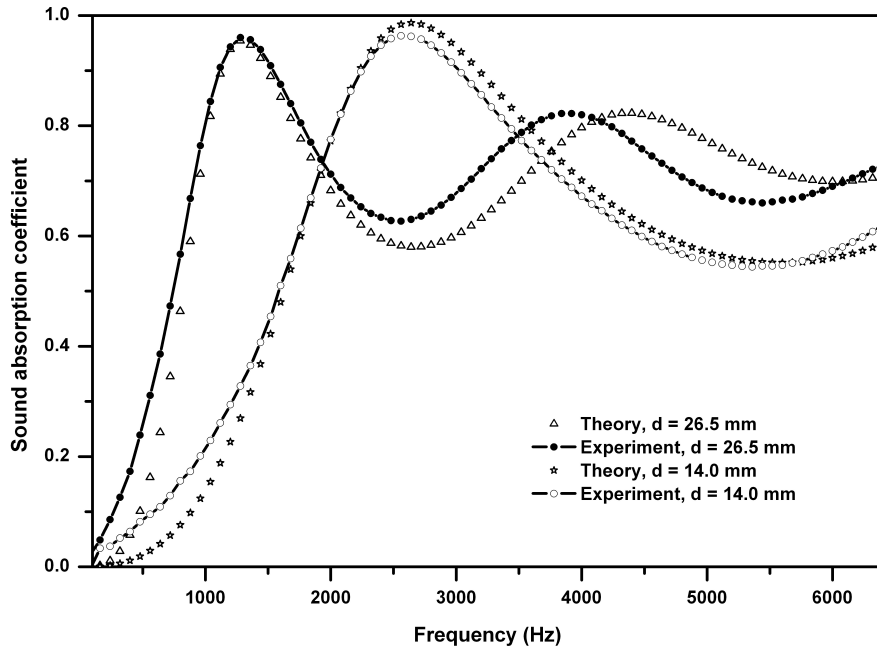


Figura 4.19. Resultados experimentales y teóricos, con $s_p = 3.100$ y $s_k = 0.350$ para la muestra M-1.

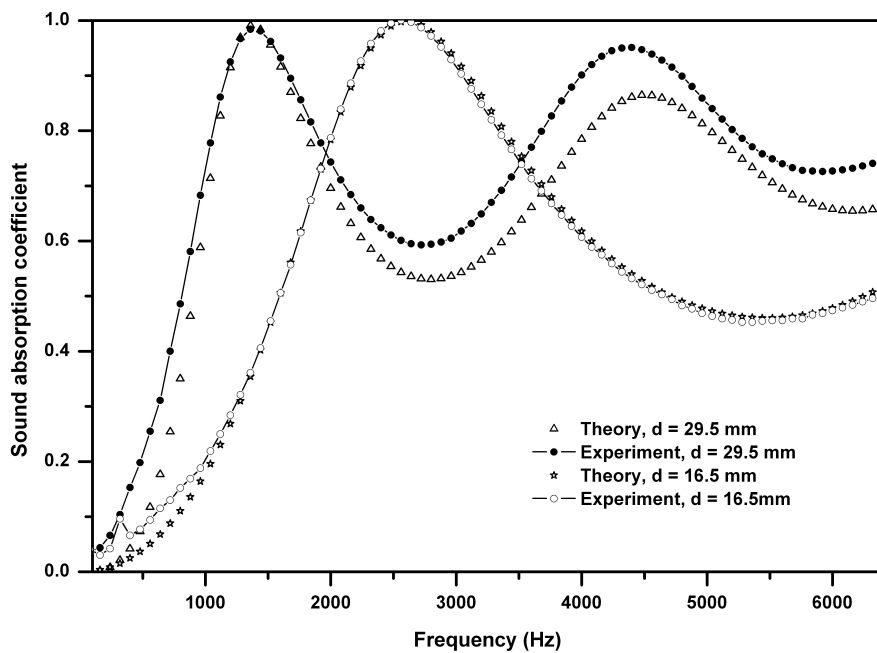


Figura 4.20. Resultados experimentales y teóricos, con $s_p = 2.590$ y $s_k = 0.285$ para la muestra M-4.

En las figuras 4.19 y 4.20 podemos apreciar los resultados, experimentales y teóricos, de las muestras M-1 y M-4, respectivamente, para los dos espesores. En el caso de la muestra M-1, los valores de s_p y s_k que mejor ajustan la curva de absorción son 3.100 y 0.350. Para la muestra M-4, los valores de s_p y s_k que mejor ajustan la curva de absorción son 2.590 y 0.285. En ambas figuras se puede apreciar un ajuste realmente bueno para espesores pequeños, mientras que, si aumentamos el espesor, ese ajuste se mantiene para frecuencias inferiores a 2000 Hz. Para frecuencias superiores a 2000 Hz aparecen diferencias relativamente importantes.

4.3. Comportamiento acústico de granos de corcho sin aglutinar

Maderuelo-Sanz, R.; Barrigón Morillas, J.M.; Gómez Escobar, V. (2014). Acoustical performance of loose cork granulates. *Eur. J. Wood Prod.* 72:321-330.

4.3.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue el de estudiar experimentalmente las propiedades acústicas de granos de corcho sueltos sin aglutinar y con diferente granulometría. Por otro lado, se compararon los resultados experimentales de la primera frecuencia de resonancia, obtenidos mediante el tubo de impedancia, con los resultados teóricos que se obtuvieron mediante el modelo de Voronina y Horoshenkov (2003, 2004).

4.3.2. Materiales empleados

El material utilizado en este trabajo fue el grano de corcho blanco, procedente del sobrante de la fabricación de los tapones de corcho de las industrias corcheras transformadoras de San Vicente de Alcántara de Cáceres. El grano de corcho, proporcionado por IPROCOR, se separó mediante una tamizadora mecánica utilizando ocho tamices, obteniendo muestras con un tamaño de grano comprendido entre 0.5 y 8.0 mm. Por otro lado, se estudiaron cuatro espesores diferentes: 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0 cm.

El comportamiento acústico de las diferentes muestras de corcho se comparó con otros materiales granulares, como el refugo de corcho (corcho procedente de la saca de corcho en campo, siendo inservible para la fabricación de tapones de corcho natural), vermiculita y arlita, con tamaños de grano comprendidos entre 4.0 mm y 5.0 mm.

4.3.3. Propiedades no acústicas

El corcho es un medio granular que puede ser caracterizado por dos tipos de porosidades, la porosidad entre las partículas (interparticular) y la porosidad existente dentro de cada partícula (intraparticular) (Glé *et al.*, 2011). Se han apreciado pequeñas diferencias en los valores de la porosidad abierta ya que, ésta, se distribuye entre poros de diferentes tamaños y entre las partículas. La porosidad intraparticular se debe a los canales lenticulares, que son huecos y con forma cilíndrica (Pereira, 2007). Estos canales, normalmente asociados a los poros que presenta el corcho, su número y

dimensiones, tienen una gran variabilidad entre las diferentes muestras, al igual que en diferentes partes dentro de la misma planta. El área media de los poros observados está en el rango de 0.4 a 3.2 mm².

Los resultados experimentales (Tabla 4.7) muestran que el valor medio de la porosidad es de 0.850. Existen pequeñas diferencias entre las distintas muestras y se puede apreciar que esta porosidad es independiente del tamaño de partícula, como ya fue confirmado con anterioridad por Horoshenkov y Swift (2001) en su trabajo desarrollado para granos de caucho. Se aprecian relaciones indirectas entre el tamaño de partícula y la forma de los granos. La disposición de las partículas en la muestra de ensayo, donde la forma de éstas tiene un gran efecto en su densidad, supone una disminución de la porosidad con el aumento de la densidad. La angularidad de las partículas presenta también un importante efecto; a mayor angularidad, mayor porosidad tendrá la muestra.

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Porosidad	Tortuosidad	Resistencia al flujo (Pa s m ⁻²)	Tamaño característico de partícula (mm)
M-1	CB (6.3 < d < 8.0)	0.842	1.274	60	8.8
M-2	CB (5.6 < d < 6.3)	0.840	1.288	89	7.3
M-3	CB (5.0 < d < 5.6)	0.837	1.265	123	6.3
M-4	CB (4.0 < d < 5.0)	0.837	1.302	163	5.5
M-5	CB (3.15 < d < 4.0)	0.838	1.357	187	5.1
M-6	CB (2.0 < d < 3.15)	0.840	1.304	325	3.8
M-7	CB (1.0 < d < 2.0)	0.863	1.607	795	2.1
M-8	CB (0.5 < d < 1.0)	0.862	1.645	2580	1.2
M-9	A (4.0 < d < 5.0)	0.797	1.559	376	4.4
M-10	V (4.0 < d < 5.0)	0.943	1.754	87	2.9
M-11	R (4.0 < d < 5.0)	0.832	1.434	185	5.3

Tabla 4.7. Composición y propiedades no acústicas de las diferentes muestras, (CB, corcho blanco; A, arlita; V, vermiculita; R, refugio de corcho)

La porosidad total disminuye con una peor “colocación” de las partículas, ya que las partículas más pequeñas son capaces de rellenar los poros existentes entre partículas mayores, reduciendo la porosidad. Los valores de porosidad de las muestras de corcho

están en el rango comprendido entre 0.837 y 0.863, en donde la muestra M-7 presenta los valores más altos de porosidad. En la figura 4.21 podemos observar la forma de los granos de las muestras M-1 y M-8. En ella se puede ver que, la muestra con las partículas más pequeñas, presentan una mayor angularidad.

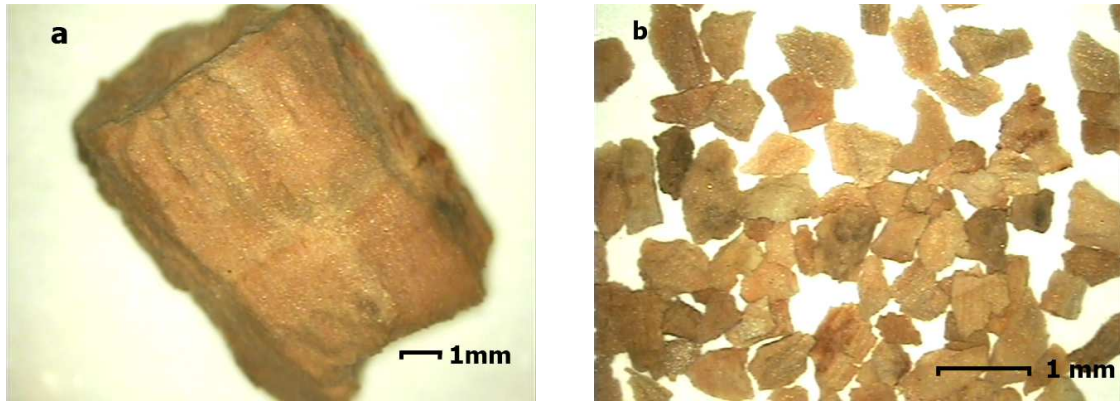


Figura 4.21. Microfotos de las muestras M-1 (a) y M-8 (b) tomadas con un microscopio Mitutoyo en donde se puede observar la diferente angularidad de las muestras.

La resistencia al flujo, determinada por el modelo de Voronina y Horoshenkov a partir de la porosidad y del tamaño de partícula, siendo este último dependiente del tamaño y forma de los poros, está en el rango comprendido entre 60 y 2580 Pa s m⁻².

En la determinación de la tortuosidad, mediante el método de Brown (1980) aplicando corriente continua, se ha conseguido muy buena linealidad en los valores obtenidos para todas las muestras. El rango de valores obtenidos está comprendido entre 1.265 y 1.754. Estos valores son los responsables de las posiciones de los máximos y mínimos en el espectro del coeficiente de absorción a incidencia normal. Estos resultados sugieren que existe cierta dependencia entre la tortuosidad y el tamaño característico de partícula.

4.3.4. Propiedades acústicas

Las figuras 4.22 a 4.24 muestran los espectros del coeficiente de absorción a incidencia normal de las diferentes muestras de corcho granulado con espesores 5.0, 7.5 y 10.0 cm.

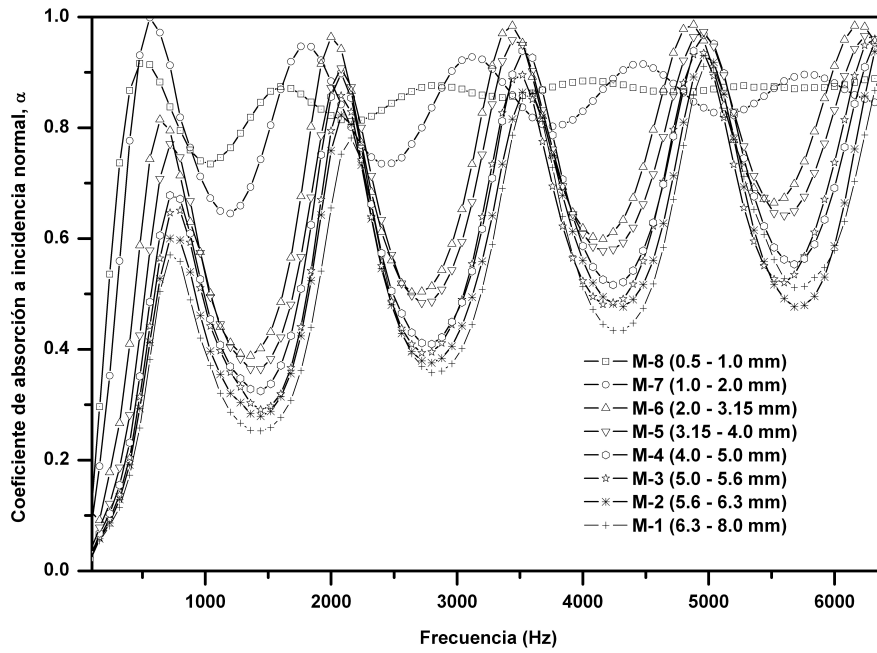


Figura 4.22. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado de 10 cm de espesor.

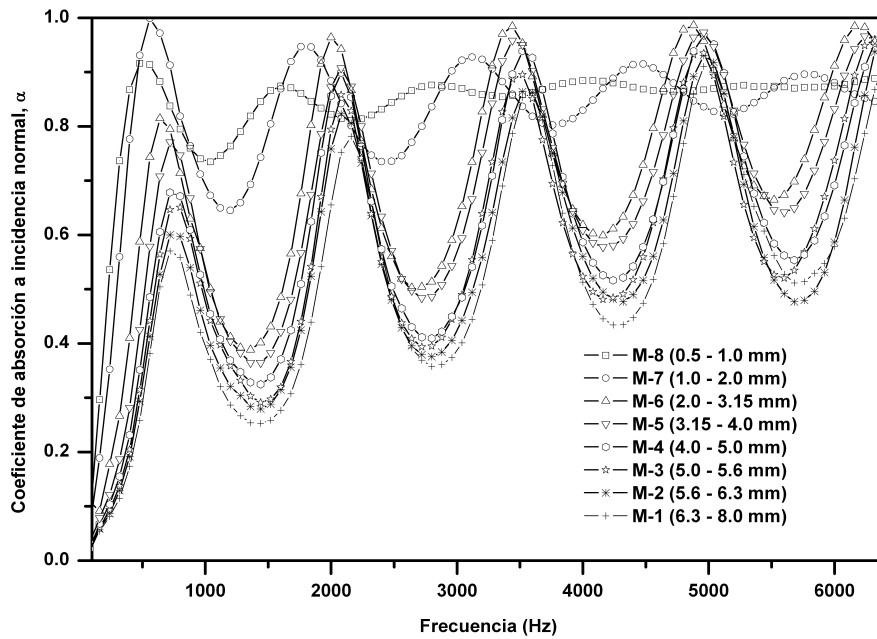


Figura 4.23. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado de 7.5 cm de espesor.

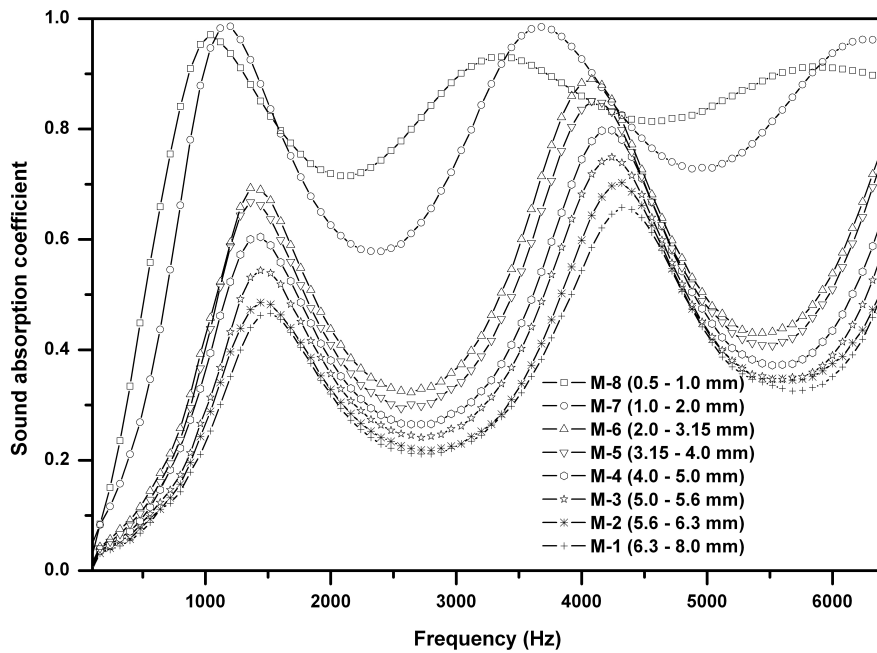


Figura 4.24. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado de 5 cm de espesor.

Cuando una onda acústica incide sobre un material granular poroso absorbente no aglutinado, los granos que componen la muestra comienzan a vibrar. Esta vibración origina pequeñas cantidades de calor, debido al rozamiento entre estos granos y, por tanto, la absorción del ruido lleva asociada una conversión de la energía acústica en calor.

Se puede observar, de forma generalizada para todas las muestras, un desplazamiento del primer máximo de absorción hacia frecuencias más bajas conforme aumenta el espesor de la muestra. También se aprecia que, conforme disminuye el tamaño de partícula, aumenta progresivamente el valor del coeficiente de absorción, notándose un salto relativamente elevado entre las muestras M-6 y M7. Para la muestra M-7, el valor del coeficiente de absorción del primer máximo es de 0.97 a una frecuencia de 1040 Hz con un espesor de 50 mm y por la muestra M-8, el valor del coeficiente de absorción es de 1.00 a una frecuencia de 560 Hz con un espesor de 100 mm. Estos valores se deben principalmente a los valores de la resistencia al flujo.

En el caso de la muestra M-8, el coeficiente de absorción disminuye conforme aumenta el espesor y disminuye la frecuencia mientras que tiende de forma asintótica a 0.90 para altas frecuencias (Figura 4.25). Esto se debe a la existencia de un espesor crítico a partir del cual, el coeficiente de absorción no aumenta, es decir, la atenuación de la energía alcanza un límite que depende de la frecuencia de la onda y de las características físicas del material, principalmente de su resistencia al flujo. Para la muestra M-1, el coeficiente de absorción aumenta cuando aumenta el espesor y disminuye la frecuencia, es decir no se ha alcanzado para ésta el espesor crítico.

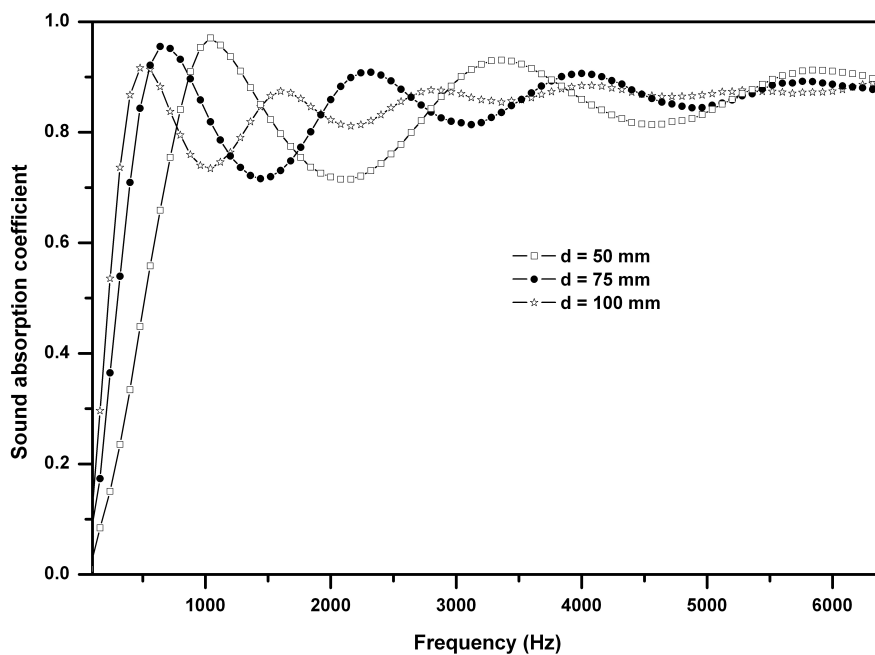


Figura 4.25 Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado M-8 de distintos espesores.

En las figuras 4.25 a 4.27 también se puede observar como, a medida que aumenta el espesor de las muestras, el primer máximo y mínimo de absorción se desplaza hacia frecuencias más bajas, reduciéndose el intervalo de frecuencias en que esto ocurre. Para las muestras M-1 a M-6 el valor máximo de absorción aumenta conforme aumenta la frecuencia. En las figuras 4.26 y 4.27 se muestran los espectros del coeficiente de absorción acústica de las muestras M-1 y M-4. En el caso de la muestra M-1, el valor máximo del coeficiente de absorción presenta un valor de 0.92 a 6400 Hz y un espesor de 10 cm y para la muestra M-4, el valor máximo del coeficiente de absorción presenta un valor de 0.97 a 4960 Hz para el mismo espesor que la muestra M-1. Estos valores

muestran la influencia de la porosidad intraparticular, que son típicos en este tipo de material, para rangos de frecuencias altas, son debidos a los microporos, que no están en equilibrio térmico (Boutin *et al.*, 1998).

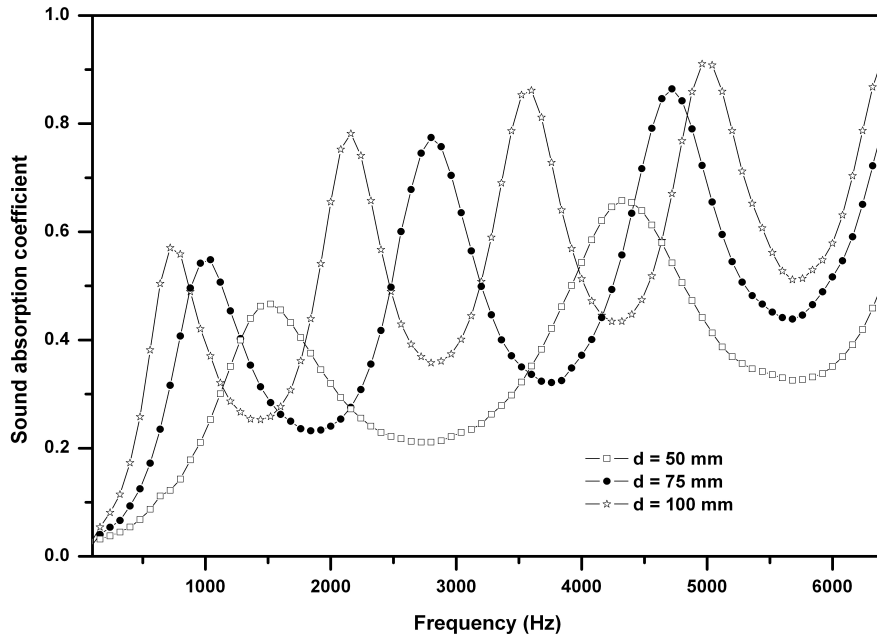


Figura 4.26. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado M-1 de distintos espesores.

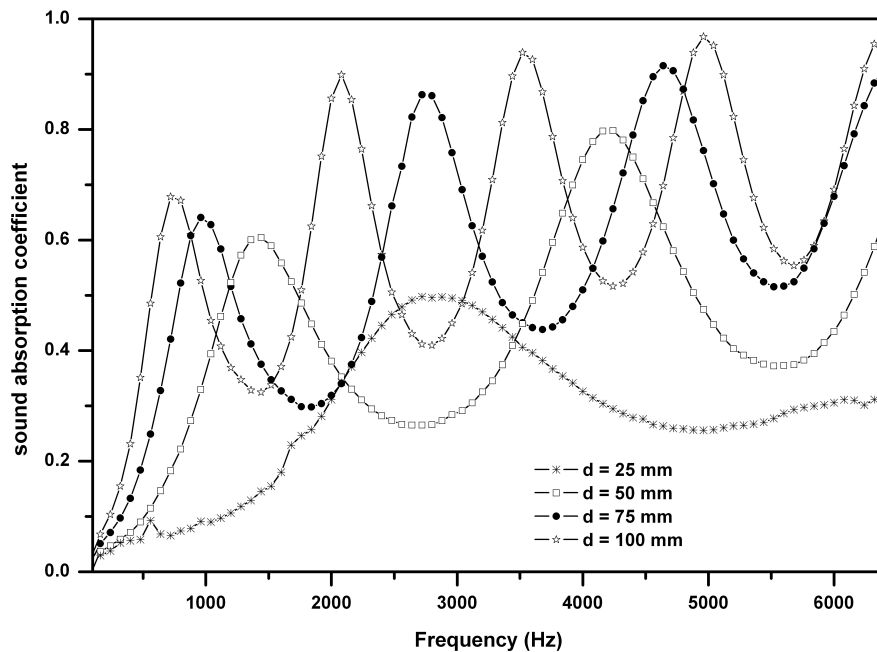


Figura 4.27. Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de muestras de corcho granulado M-4 de distintos espesores.

La relación existente entre el primer máximo de resonancia y su mínimo en el espectro del coeficiente de absorción es un parámetro importante que determina la capacidad del material para disipar la energía de la onda acústica incidente (Vasina *et al.*, 2006). La tabla 4.8 muestra estas relaciones para todos los tamaños de grano estudiados. Los valores obtenidos pueden aportar una estimación del comportamiento como material absorbente al ruido para el rango de frecuencias 100 a 3000 Hz. Estos valores del coeficiente de absorción, pueden ser considerados como función de la resistencia al flujo, porosidad y tortuosidad.

Muestra	d = 50 mm	d = 75 mm	d = 100 mm
M-1	2.3	2.3	2.3
M-2	2.3	2.2	2.1
M-3	2.4	2.1	2.1
M-4	2.3	2.1	2.1
M-5	2.2	2.3	2.2
M-6	2.3	2.2	2.1
M-7	1.7	1.6	1.6
M-8	1.4	1.3	1.2
M-9	2.7	2.5	2.4
M-10	2.1	1.8	2.0
M-11	2.1	2.0	1.7

Tabla 4.8. Relación entre el primer máximo de resonancia y su mínimo correspondiente de todas las muestras.

4.3.5. Comparación entre resultados experimentales y teóricos

En muchas aplicaciones industriales es necesario utilizar materiales absorbentes porosos que sean capaces de absorber de forma selectiva en un determinado rango de frecuencias, pero no por encima o por debajo de ellas. Esto es debido a la necesidad de absorber de forma efectiva el ruido producido por determinadas fuentes de ruido que presentan una distribución frecuencial determinada. Por este motivo, y para el caso de bajas frecuencias, se utiliza el primer máximo del coeficiente de absorción para una frecuencia determinada.

En este trabajo se ha utilizado el modelo de Voronina y Horoshenk (2003, 2004) para materiales granulares sin aglutinar y cuyas ecuaciones hemos descrito con anterioridad (ecuaciones (2.80) a (2.85)).

Las propiedades físicas de los materiales estudiados en este trabajo son diferentes de las de los materiales empleados en el trabajo de Voronina y Horoshenk. Mientras que en este trabajo las dimensiones características de la partícula varían entre 1.2 y 8 mm, en el trabajo de estos autores, esta varía entre 0.4 y 3.5 mm. Estos autores concluyen que su modelo muestra muy buen ajuste con los datos experimentales en el intervalo de frecuencias 250-4000 Hz con materiales con unas densidades entre 200 y 1200 kg m⁻³. Es de resaltar que nuestro trabajo ha comprobado el modelo en otro tipo de materiales nunca anteriormente analizado, con unas densidades específicas dentro del rango estudiado por Voronina y Horoshenk, ampliando el rango de frecuencias estudiado previamente y con tamaños característicos de partícula superiores.

La tabla 4.9 muestra los valores de la frecuencia correspondiente al primer máximo de absorción teórico, obtenido mediante el modelo de Voronina y Horoshenk (2003, 2004), y los valores experimentales, obtenidos mediante medidas del coeficiente de absorción acústica en el tubo de impedancia conforme a la Norma UNE EN ISO 10534-2 (UNE EN ISO 10534-2, 2002).

Para las muestras con un tamaño característico de partícula inferiores a 2.1 mm, se obtuvo muy buena concordancia de datos entre los valores teóricos y los experimentales (Figura 4.28). Las diferencias en porcentaje entre ambos valores están en el rango 1.2-6.0%, valores que se pueden considerar relativamente buenos. Para muestras con tamaño característico de partícula superiores a 2.1 mm, los valores obtenidos experimentales son ligeramente superiores a los que estima el modelo, algo que está en concordancia con lo que predecía el modelo desarrollado por Voronina y Horoshenk.

4. Caracterización de nuevos materiales acústicos para su uso en la construcción

Muestra	Tamaño característico de partícula, D (mm)	Frecuencia de resonancia, fr (Hz)						Diferencia (%)		
		Experimental			Teórico			10.0	7.5	5.0
		Espesor (cm)								
		10.0	7.5	5.0	10.0	7.5	5.0			
M-1	8.8	750	1032	1464	669	898	1359	10,8	13,0	7,2
M-2	7.3	750	994	1472	661	889	1348	11,9	10,6	8,4
M-3	6.3	750	964	1458	653	880	1337	12,9	8,7	8,3
M-4	5.5	750	964	1432	645	871	1326	14,0	9,6	7,4
M-5	5.1	750	972	1392	641	866	1320	14,5	10,9	5,2
M-6	3.8	656	960	1389	620	842	1289	5,5	12,3	7,2
M-7	2.1	566	758	1166	573	785	1218	-1,2	-3,6	-4,5
M-8	1.2	513	656	1028	490	686	1090	4,5	-4,6	-6,0

Tabla 4.9. Valores de la frecuencia correspondiente al primer máximo de absorción par alas muestras de granos de corcho sin aglutinar.

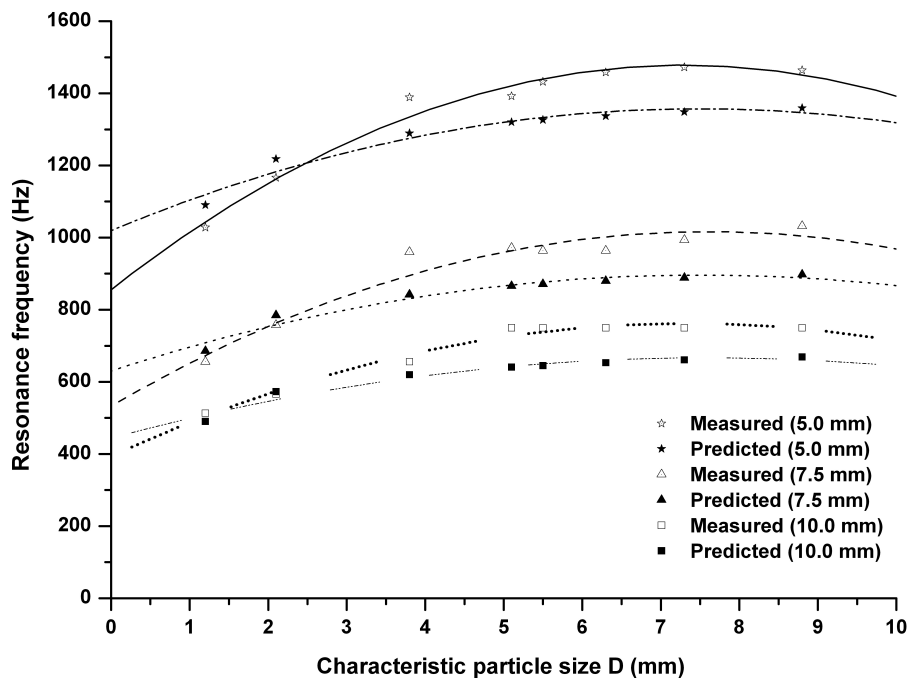


Figura 4.28. Frecuencia de resonancia en función del tamaño característico de partícula experimental y teórico.

Aunque exista cierta similitud entre los resultados experimentales y los teóricos se puede afirmar la necesidad de reformular el modelo, modificando los coeficientes adimensionales para minimizar las desviaciones encontradas para tamaños característicos de partícula superiores a 2.1 mm. La tabla 4.10 muestra la ecuación de la curva de segundo grado que proporciona un mejor ajuste a los valores obtenidos. Resulta interesante comprobar la relación existente entre los valores teóricos y los experimentales para los tres espesores estudiados, de la forma 2:2:1/2.

Esesor (mm)		Modelo de regresión polinomial	R ²
50	Experimental	$-11.6800 X^2 + 170.47 X + 856.21$	0.9767
	Teórico	$-6.0356 X^2 + 90.26 X + 1019.80$	0.9526
75	Experimental	$-8.3627 X^2 + 127.22 X + 532.98$	0.9385
	Teórico	$-4.6964 X^2 + 70.64 X + 630.54$	0.9549
100	Experimental	$-6.8424 X^2 + 100.40 X + 393.60$	0.9794
	Teórico	$-3.8793 X^2 + 58.83 X + 443.87$	0.9556

Tabla 4.10. Modelo de regresión polinomial, teórico y experimental, para las muestras estudiadas en este trabajo donde X es el tamaño característico de partícula (D).

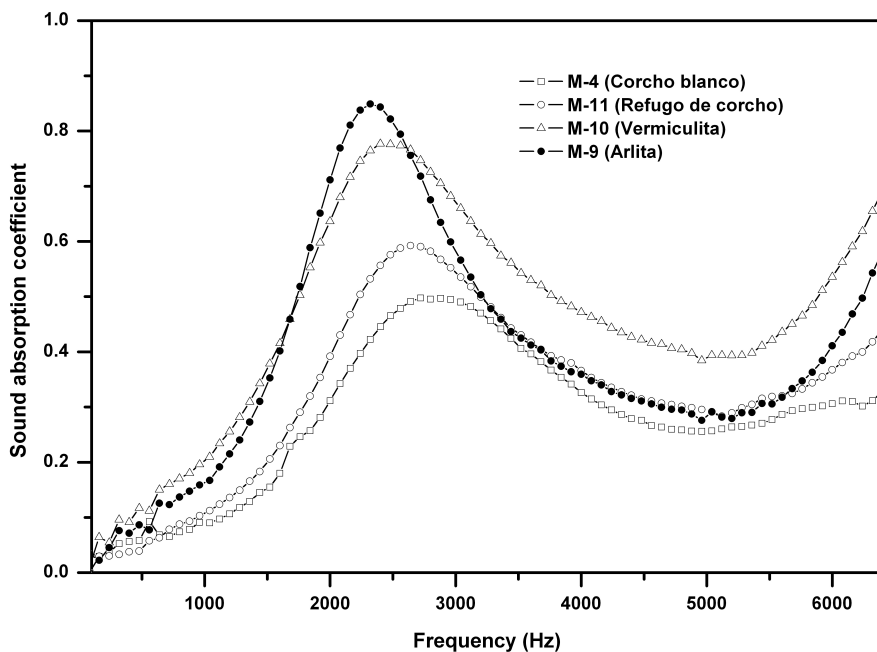


Figura 4.29. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y d=2.5 cm.

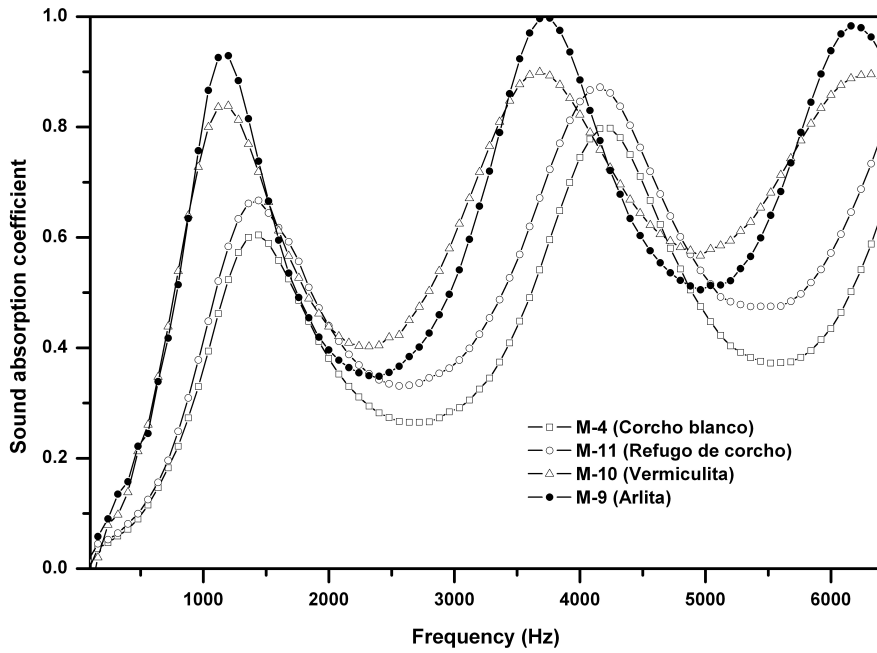


Figura 4.30. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=5.0$ cm.

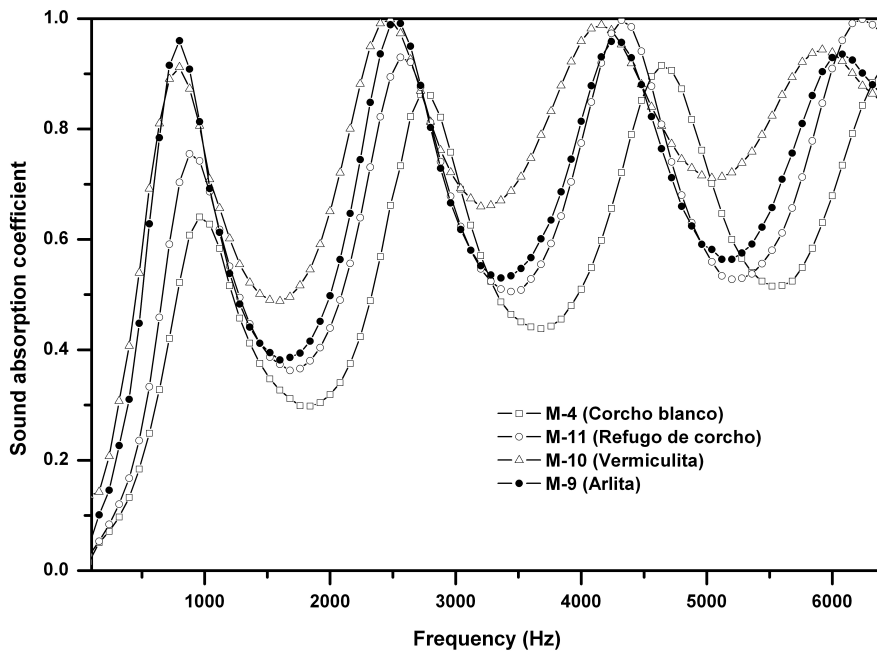


Figura 4.31. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=7.5$ cm.

Comparativa con otros materiales granulares

Con el objeto de comparar los resultados obtenidos anteriormente para las muestras de corcho granulado con tamaño de partícula entre 4 y 5 mm, se han estudiado muestras de

vermiculita, arlita y refugo de corcho, con el mismo tamaño de partícula y con espesores de 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0 cm. En las figuras 4.29 a 4.32 podemos ver los coeficientes de absorción de estas muestras.

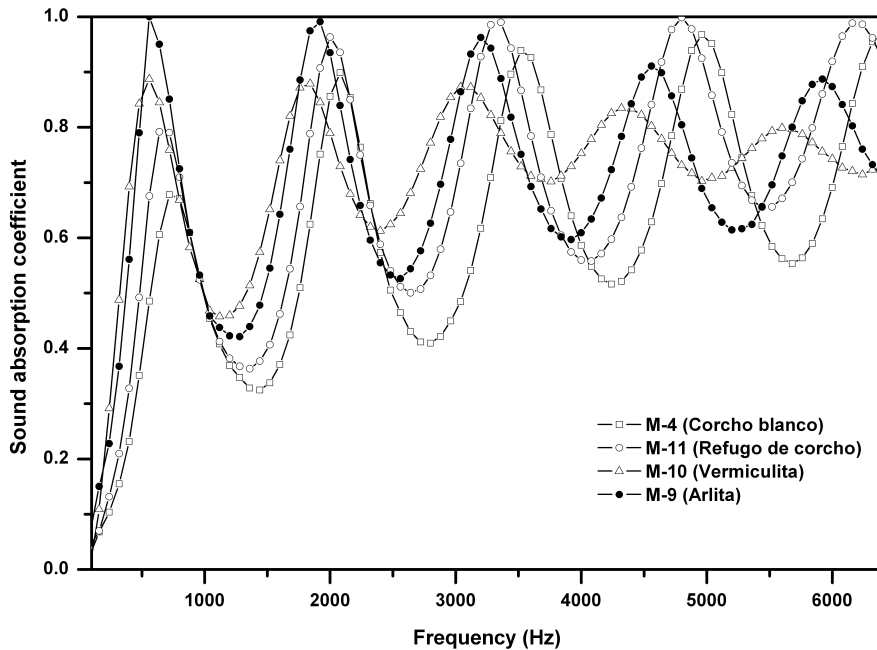


Figura 4.32. Coeficiente de absorción acústica de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11 y $d=10.0$ cm.

Si comparamos los resultados obtenidos para las dos muestras de corcho, el refugo y el corcho blanco, podemos ver que existen pequeñas diferencias entre ambos, siendo el refugo (muestra M-11) la que presenta un mejor comportamiento acústico, teniendo valores máximos del coeficiente de absorción ligeramente superiores a los del corcho blanco y las frecuencias de resonancia ligeramente desplazadas a frecuencias más bajas. Esto se puede deber a las diferencias existentes entre las propiedades físicas de ambos materiales (Tabla 4.7). Mientras que la porosidad de ambas muestras es prácticamente la misma, como cabía esperar, ya que los tamaños de partículas están dentro del mismo rango, 4-5 mm, existen pequeñas diferencias entre la tortuosidad y la resistencia al flujo, que son las causantes de las diferencias existentes en el espectro del coeficiente de absorción. La arlita, con unos valores de tortuosidad superiores a los de otras muestras, y la vermiculita, con valores elevados de porosidad y tortuosidad, presentan un mejor comportamiento que las muestras de corcho.

Las figuras 4.33 y 4.34 muestran los valores de la parte real e imaginaria de la impedancia superficial de estas 4 muestras con espesores de 5.0 cm. Los valores correspondientes a las muestras M-4 y M-11 presentan ligeras diferencias que explican la desviación en el coeficiente de absorción entre ambas. La parte real e imaginaria de la impedancia superficial de la muestra M-4 tiene unos valores superiores a los de la muestra M-11, lo que se traduce en una menor absorción. En el caso de las muestras M-9 y M-10, el primer máximo de la parte real de la impedancia tiende a desplazarse hacia las frecuencias más bajas al mismo tiempo que tiende a disminuir su amplitud. Esto se debe a los valores de tortuosidad de estas muestras. El valor del máximo de la parte real de la impedancia superficial de las muestras M-9 y M-10, disminuye en comparación con las muestras M-4 y M-11 lo que se traduce en un aumento del valor del coeficiente de absorción acústica para las muestras M-9 y M-10 en torno a 1200 Hz.

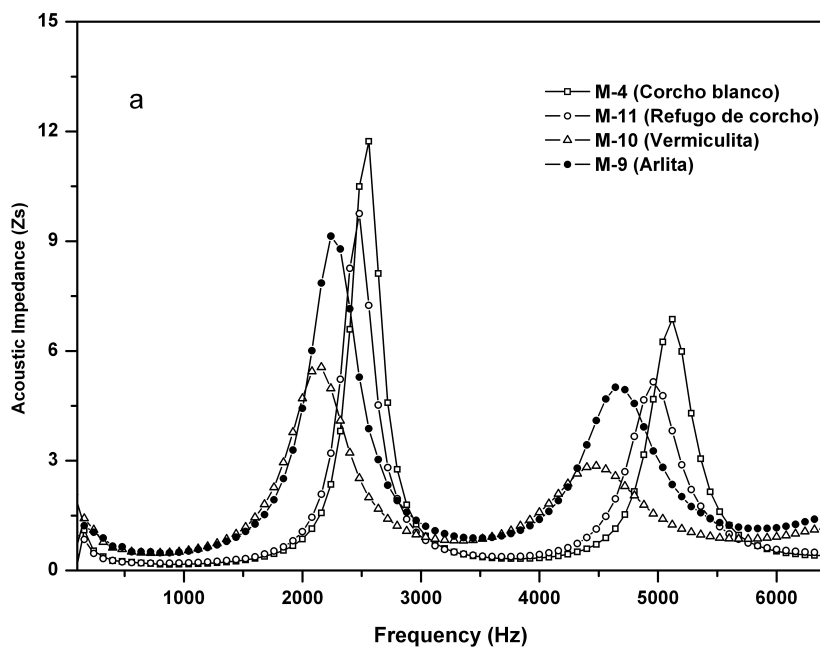


Figura 4.33. Parte real de la impedancia superficial de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11.

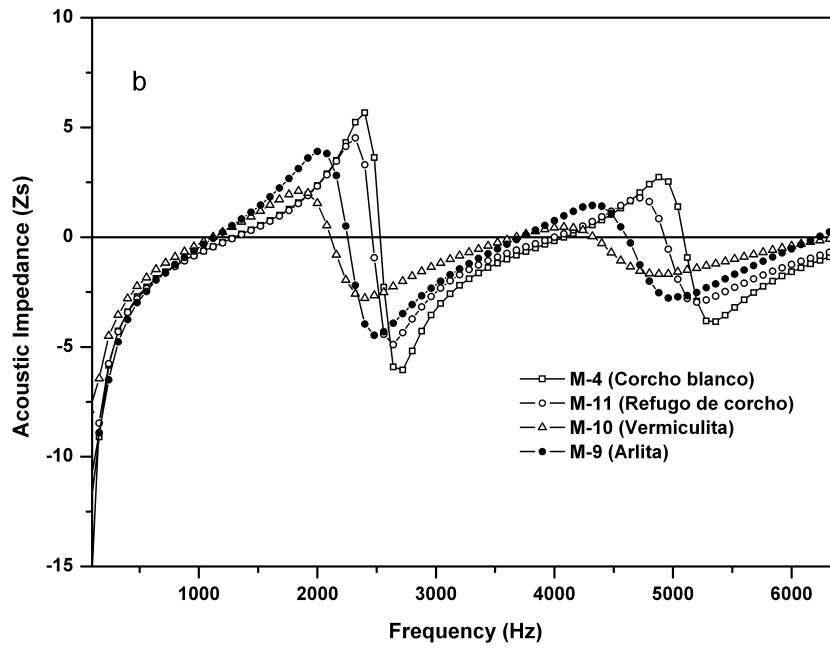


Figura 4.34. Parte imaginaria de la impedancia superficial de las muestras M-4, M-9, M-10 y M-11.

4.4. Propiedades acústicas de materiales absorbentes fabricados con arlita, perlita y vermiculita

Artículo actualmente en fase de revisión en la revista Applied Acoustics de Elsevier.

4.4.1. Objetivos

En este trabajo se investigó, de forma experimental, las propiedades acústicas de estas tres arcillas diferentes, inicialmente sin aglutinar y, posteriormente, aglutinadas con una resina de poliuretano en diferentes concentraciones y con espesores reducidos.

4.4.2. Materiales empleados

Los materiales principalmente empleados en este trabajo fueron la arlita, la perlita y la vermiculita, con diferentes tamaños de partículas. Para aglutinar las partículas, los materiales fueron mezclados con una resina de poliuretano, Kefren 572, de la marca KEFREN, en diferentes proporciones en peso. Este tipo de resina se utilizó debido a su baja viscosidad ya que no es recomendable el uso de resinas de alta viscosidad debido a que, su empleo, hace que se reduzca la porosidad y provoca que la mezcla sea poco eficiente. En la tabla 4.11 podemos ver los componentes y las propiedades físicas de las diferentes muestras fabricadas.

Muestra	Tamaño (mm)	Porosidad	Tortuosidad	Resistividad (Pa s m ⁻²)	Espesor (mm)	Resina (%)
A100	3.0 - 4.0	0.697	1.738	1409	22.1	100
A050	3.0 - 4.0	0.706	1.687	1371	22.1	50
A030	3.0 - 4.0	0.714	1.545	1338	21.8	30
A020	3.0 - 4.0	0.751	1.475	1189	21.4	20
A015	3.0 - 4.0	0.783	1.404	1062	22.4	15
A010	3.0 - 4.0	0.786	1.364	1050	21.4	10
P200	2.0 - 3.0	0.785	1.834	1647	21.0	200
P150	2.0 - 3.0	0.777	1.665	1697	21.4	150
P100	2.0 - 3.0	0.765	1.542	1770	21.2	100
V110	0.5 - 3.0	0.862	1.774	1168	20.8	110
V200	0.5 - 3.0	0.837	1.864	1326	20.1	200

Tabla 4.11. Propiedades físicas de las muestras.

El proceso de fabricación de estos materiales porosos se puede resumir de la siguiente forma: los componentes se mezclaron con la resina en sus respectivas proporciones tal y como muestra la tabla 4.11, en un rango de temperatura de 20 – 30 °C. El material resultante, una vez mezclado, se introdujo en un molde silicona hasta que fraguó. Posteriormente, se fabricaron cuatro muestras, dos de 100 mm y 29 mm de diámetro, con espesores de dos cm, aproximadamente cada una (Figura 4.35). La silicona permitió el desmoldeo de las piezas fácilmente evitando desmoronamientos.

4.4.3. Propiedades no acústicas

Debido a las diferentes microestructuras que presentan este tipo de materiales se han obtenido diferencias en las propiedades no acústicas. Esta diversidad de resultados es relativamente interesante ya que puede proporcionarnos diferentes comportamientos acústicos. La porosidad interparticular está comprendida entre 0.5 mm para la vermiculita y 4 mm para el caso de la perlita. En el caso de la arlita y vermiculita, la porosidad disminuye con el aumento de la cantidad de resina presente en la muestra. En el caso de la perlita llama la atención que ocurre todo lo contrario que en el caso anterior, la porosidad aumenta ligeramente con el aumento de resina.

La vermiculita presenta unos valores altos de porosidad debida, principalmente, a la densidad de esta y a la porosidad interparticular (causada por los poros que tiene y que contribuye a la porosidad total de la muestra). En el caso del resto de materiales, la porosidad es menor debido a que la resina rellena los poros creados entre los granos. Las porosidades obtenidas en este trabajo están comprendidas entre 0.697 para la muestra A100 y 0.862 para la muestra V200.

La resistencia al flujo viene definida por la porosidad (tamaño y forma de los poros) y la cantidad de resina empleada. Los valores obtenidos mediante el modelo de Umnova están en el rango de 1050 a 1770 Pa s m⁻². La resistencia al flujo, aumenta de forma progresiva con el aumento en la concentración de resina para los materiales elaborados con vermiculita y arlita, y con tamaños de partícula comprendidos entre 0.5 y 4 mm (Swift *et al.*, 1999). Sin embargo en el caso de la perlita se da una ligera disminución de esta con el aumento de la resina. La tabla 4.11 muestra que, la reducción en la porosidad implica el aumento en la resistencia al flujo. Los valores de tortuosidad están comprendidos entre 1.364 y 1.864.

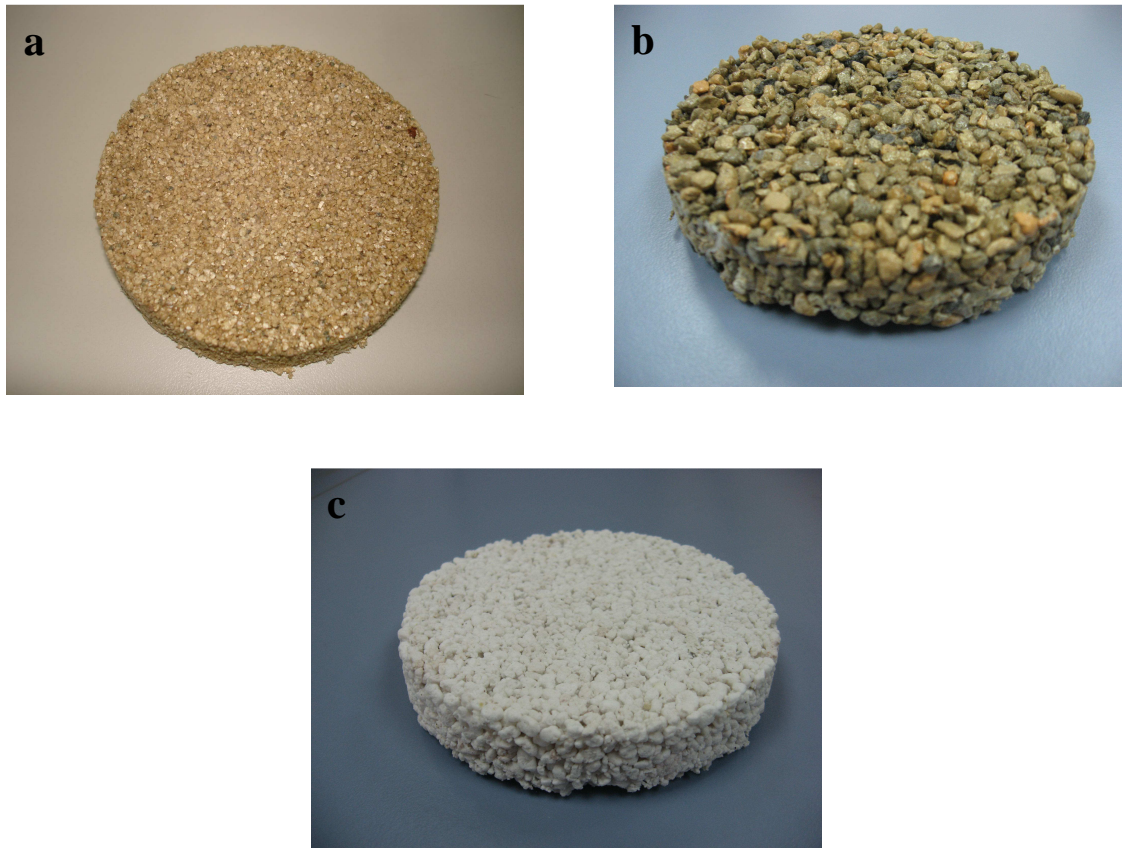


Figura 4.35. Detalle de las muestras V110 de vermiculita (a), A100 de arlita (b) y P200 de perlita (c).

4.4.4. Propiedades acústicas

El comportamiento acústico de un material absorbente poroso depende, fundamentalmente, de la porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo y del espesor del material. Cuando la onda sonora se propaga a través de los poros interconectados de un material poroso, se producen pérdidas de energía. Estas pérdidas de energía son debidas a la compleja microestructura del material y a los efectos viscosos, pérdidas térmicas y viscosas en la interfase de separación de dos materiales con propiedades distintas. El aire es un fluido y la energía acústica se disipa por rozamiento con los poros. Las pérdidas térmicas se deben al paso de calor del aire al esqueleto del material y son más importantes a bajas frecuencias. Un aumento del espesor del material hace que aumente la absorción a bajas frecuencias.

La figura 4.36 muestra el espectro del coeficiente de absorción acústica a incidencia normal de las muestras realizadas con arlita. Se puede apreciar como, a medida que aumenta la proporción de resina en la muestra, la curva del coeficiente de absorción se

desplaza hacia frecuencias menores, aumentando, al mismo tiempo, el valor del coeficiente de absorción. El ancho de la curva, correspondiente al primer máximo que aparece, tiende de igual forma a reducirse conforme aumenta el porcentaje de resina de las muestras. Para la muestra A100 este máximo, con un valor de 0.99, se obtiene a la frecuencia de 1650 Hz. La disminución de resina en la fabricación de la muestra da lugar a una ligera disminución de α y un desplazamiento hacia frecuencias más altas. Las muestras A010 y A015 presentan un comportamiento similar. Este comportamiento se debe a los valores de porosidad, resistencia al flujo y tortuosidad de estas muestras ya que presentan valores similares.

En las figuras 4.37 y 4.38 podemos ver la parte real e imaginaria de la impedancia superficial, respectivamente, de las muestras hechas con arlita. La impedancia superficial se puede dar en los dos términos que la componen, resistencia (parte real) y reactancia (parte imaginaria).

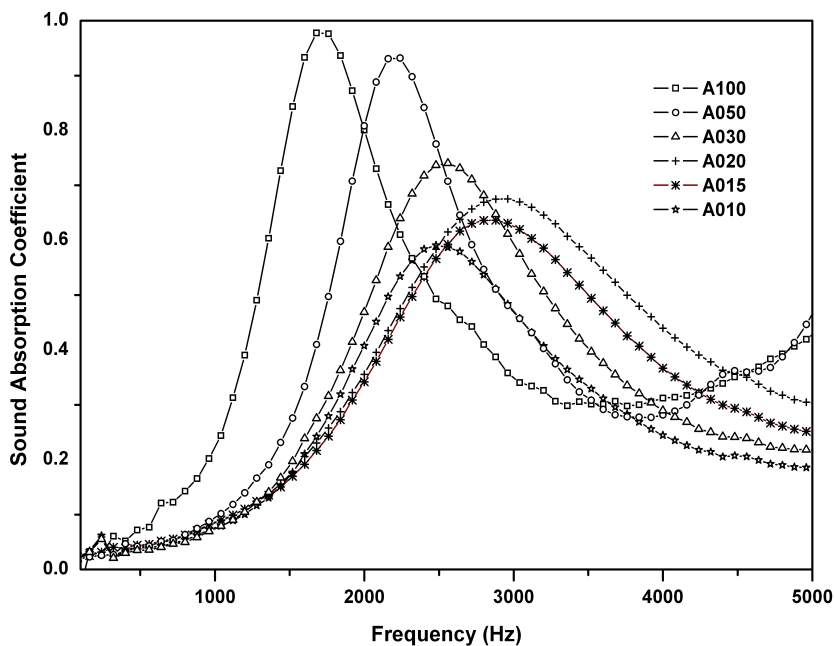


Figura 4.36. Coeficiente de absorción para muestras hechas con arlita.

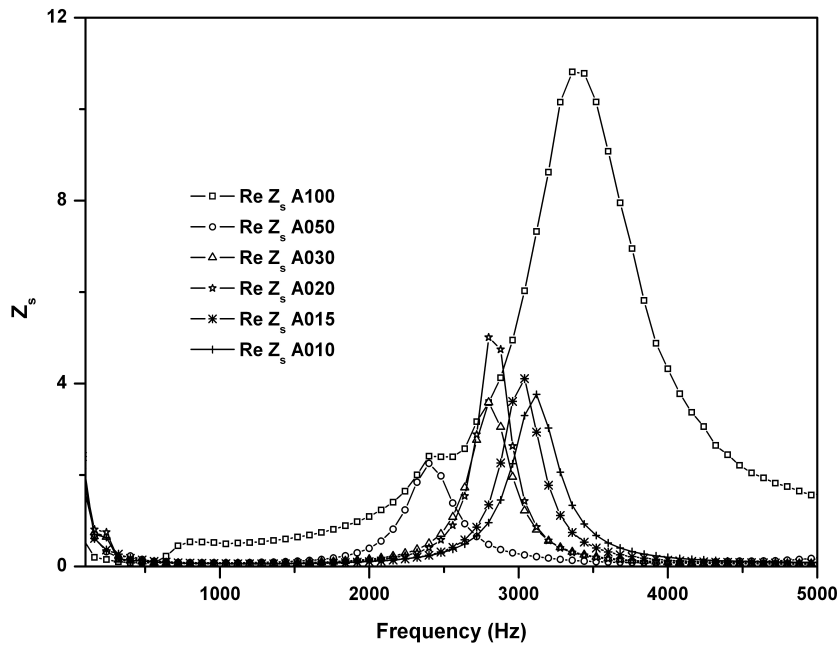


Figura 4.37. Parte real de la impedancia superficial de muestras hechas con arlita.

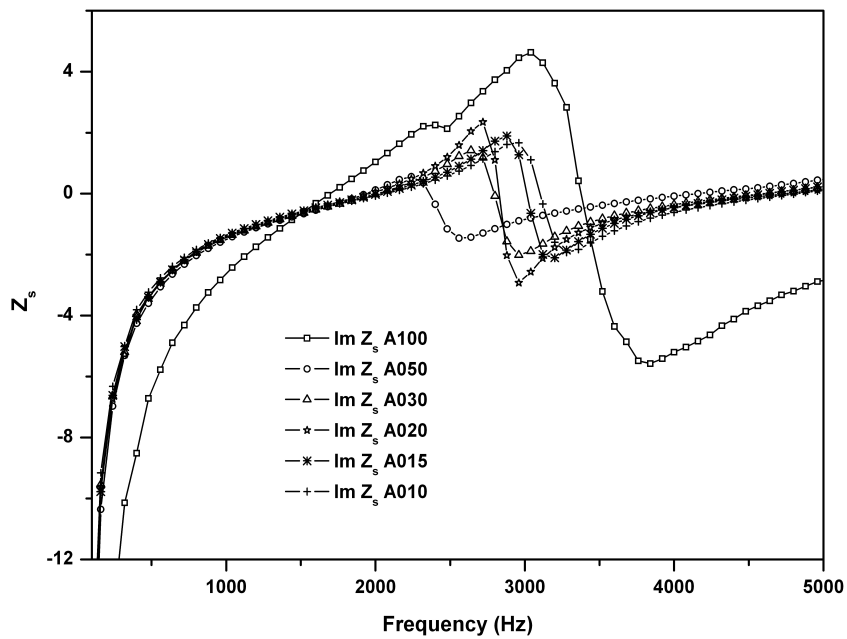


Figura 4.38. Parte imaginaria de la impedancia superficial de muestras hechas con arlita.

Para la muestra A050, el máximo correspondiente a la parte real de la impedancia es relativamente pequeño. Esto da lugar a un aumento en el coeficiente de absorción en las cercanías del máximo del coeficiente de absorción, como se puede apreciar en la figura 4.36. La parte real e imaginaria tienden a desplazarse hacia las bajas frecuencias como resultado del valor de la tortuosidad. Para la muestra A100, el máximo de la parte real de la impedancia, desplazado hacia frecuencias mayores, hace que la absorción acústica en ese rango de frecuencias sea reducida.

La figura 4.39 muestra el espectro del coeficiente de absorción a incidencia normal de las muestras realizadas con perlita. Se puede apreciar como, a medida que disminuye la cantidad de resina en las muestras, el máximo de absorción se desplaza hacia frecuencias menores, aumentando ligeramente el valor del máximo de absorción y estrechándose la curva. Para la muestra P100, el máximo de absorción, con un valor de 1.00, se obtiene a la frecuencia de 1600 Hz. En el caso de las muestras P150 y P200, los valores del primer máximo de absorción son 0.99 y 0.98, a las frecuencias de 2060 y 2329 Hz. En estas muestras el máximo de la parte real de la impedancia ocurre a la misma frecuencia, si bien, el valor de este máximo es mayor para la muestra P200 (Figuras 4.40 y 4.41).

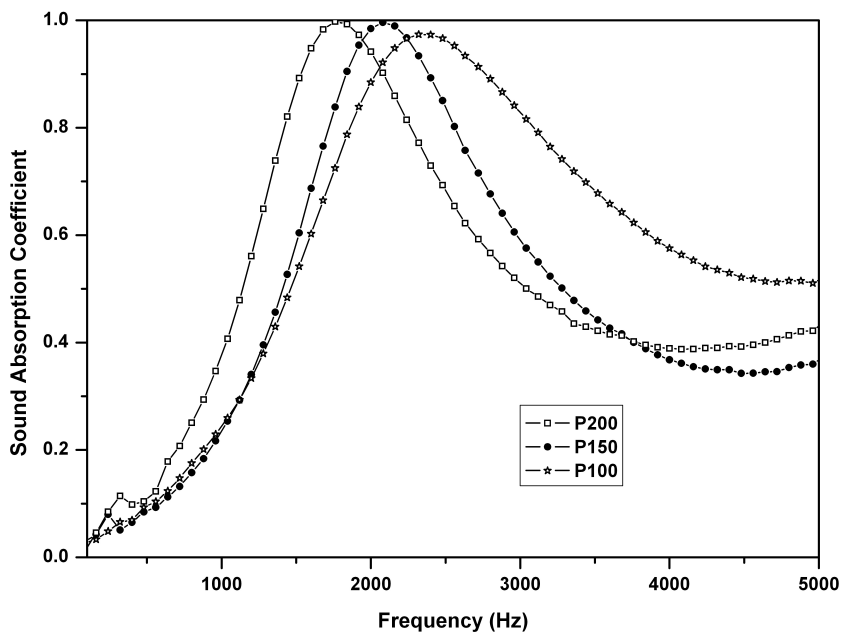


Figura 4.39. Coeficiente de absorción para muestras hechas con perlita.

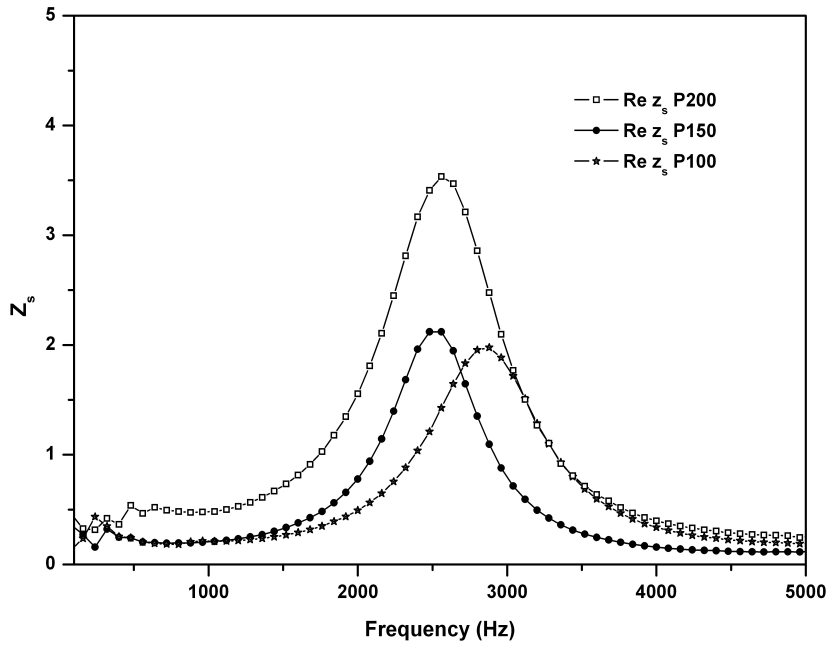


Figura 4.40. Parte real de la impedancia superficial de muestras hechas con perlita.

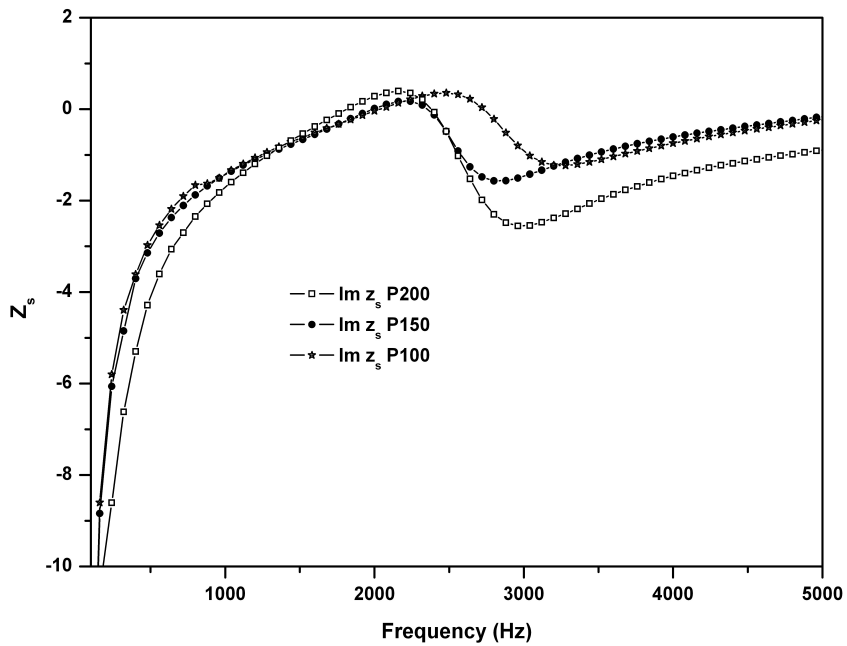


Figura 4.41. Parte imaginaria de la impedancia superficial de muestras hechas con perlita.

Los valores de la parte imaginaria de la impedancia superficial son relativamente menores que para las muestras de arlita (Figuras 4.37 y 4.38), por lo que estos valores sugieren un mejor comportamiento acústico de la muestra A100 en el rango de frecuencias a estudiar.

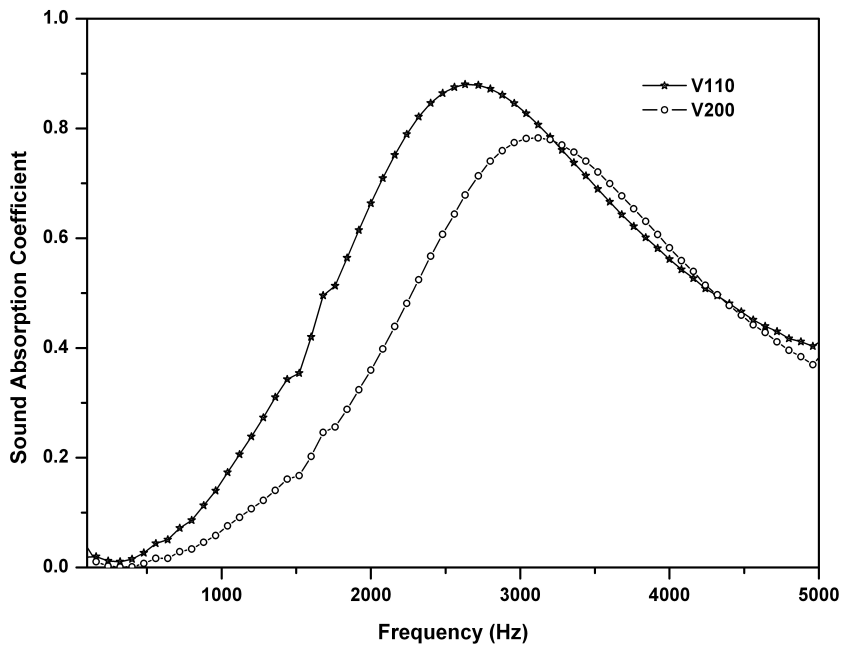


Figura 4.42. Coeficiente de absorción para muestras hechas con vermiculita.

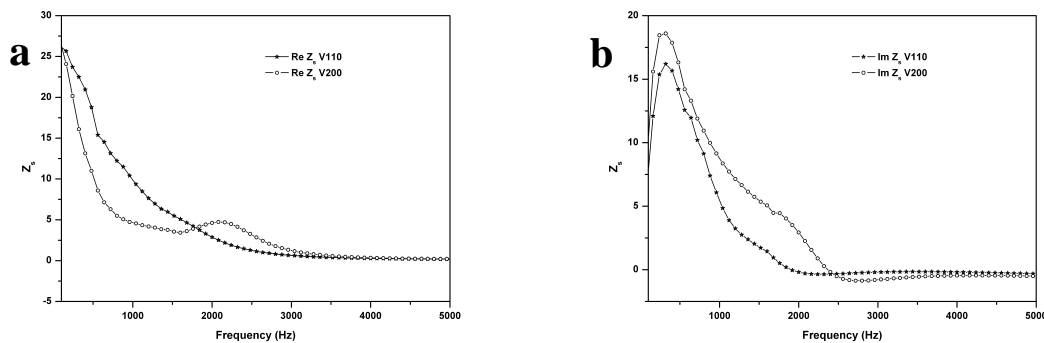


Figura 4.43. Parte real (a) y parte imaginaria (b) de la impedancia superficial de las muestras de vermiculita.

La figura 4.42 muestra el espectro del coeficiente de absorción a incidencia normal de las muestras realizadas con vermiculita. Se aprecia como, a medida que disminuye la

cantidad de resina en las muestras, el máximo de absorción se desplaza hacia frecuencias menores, aumentando ligeramente el valor del máximo de absorción. Para la muestra V110, el máximo de absorción, con un valor de 0.00, se obtiene a la frecuencia de 2580 Hz. En el caso de la muestra V200, el valor máximo de absorción es 0.79 a la frecuencia de 3120 Hz. La figura 4.43 muestra la parte real (a) y la parte imaginaria (b) de la impedancia superficial de ambas muestras. Por debajo de la frecuencia de 1000 Hz, los valores de la parte real de la impedancia superficial presenta valores muy superiores a los de las muestras estudiadas, por lo que su absorción será inferior para esas frecuencias.

En la figura 4.44 se muestra una comparativa entre las muestras A100, P200 y V110 frente a una lana mineral comercial con un espesor de 2.10 cm. La densidad de esta lana mineral es de 120 kg m^{-3} , con un diámetro de fibra comprendido entre $8 \mu\text{m}$ y $12 \mu\text{m}$. El valor del coeficiente de absorción para frecuencias comprendidas entre 1400 Hz y 3400 Hz, es superior para las muestras de arcillas que para la lana mineral, mientras que esta última parece tener un coeficiente de absorción constante en el rango de frecuencias entre 2000 Hz y 5000 Hz, con un valor medio de 0.75.

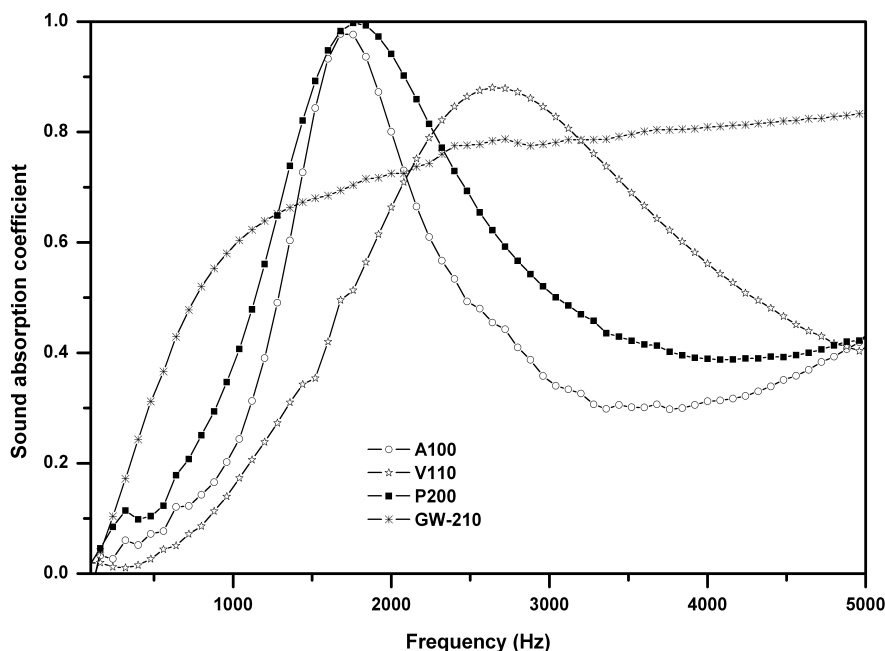


Figura 4.44. Coeficiente de absorción para las muestras de arlita, perlita y vermiculita que presentan un mejor comportamiento frente a una lana de roca.

4.5. Comportamiento de láminas elásticas elaboradas con reciclado de neumático para la reducción del ruido de impacto

Maderuelo-Sanz, R.; Martín-Castizo, M.; Vilchez-Gómez, R. (2011). The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. Appl. Acoust. 72:823-828.

4.5.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue el de investigar las propiedades acústicas de láminas elásticas elaboradas, como principal componente, con granos de caucho, con diferente granulometría, procedentes de los neumáticos fuera de uso de vehículos pesados. En primer lugar se llevó a cabo la caracterización de estas láminas en laboratorio, obteniendo algunas de las propiedades que sirven para caracterizar estas láminas elásticas para la mejora a ruido de impacto (rigidez dinámica y compresibilidad). Seguidamente se realizaron ensayos en cámara normalizada para obtener la mejora a ruido aéreo y a ruido de impacto y se compararon los resultados experimentales obtenidos con los valores teóricos predichos por el modelo de Cremer y colaboradores (1988).

4.5.2. Materiales empleados

El material principalmente empleado en este trabajo fue el grano de caucho, con diferentes tamaños de partículas, procedente del triturado de los neumáticos fuera de uso de vehículos pesados. Este producto estaba compuesto por un residuo de elastómero denominado Ground Tyre Rubber (GTR). Además de este material, se emplearon otro tipo de materiales como la vermiculita, el poliestireno expandido (EPS) y un mortero de cemento. Para conseguir unir estos materiales, se mezclaron con una resina en base poliuretano de baja viscosidad (SikaBond T53, fabricada por Sika) en unas proporciones comprendidas entre 7-15% en peso, según muestra. Este tipo de resina se utilizó debido a su baja viscosidad ya que no es recomendable utilizar resinas de alta viscosidad debido a que reducen la porosidad y hacen que la mezcla sea poco eficiente.

La tabla 4.12 muestra los componentes de los diferentes tipos de lámina fabricados y de algunas láminas comerciales, además de ciertas propiedades como la densidad aparente

o la porosidad. El proceso de fabricación de las nuevas láminas se puede resumir de la siguiente manera: los componentes se mezclaron, en sus respectivas proporciones, como muestra la tabla 4.12, en un rango de temperatura de 20-30 °C. Una vez hecha la mezcla, y siempre teniendo en cuenta la temperatura y tiempo de secado de la resina, se aplicó con una pistola de aire comprimido que presentaba una boquilla rectificada con un diámetro especial para evitar la obturación de la misma. Las muestras de ensayo eran cuadradas con unas dimensiones de 200 x 200 mm² y presentando un espesor diferente para cada lámina (Figura 4.45).

Muestra	Tamaño de grano (mm)	Componentes y proporciones	Densidad (kg m ⁻³)	Espesor (mm)	Porosidad
M1	<2.0	GTR (50%) / Vermiculita (20%) / EPS (20%)	429.5	10.9	0.62
M2	<3.5	GTR (90%)	430.9	12.0	0.60
M3	0.5-1.0	GTR (85%)	570.0	10.1	0.36
M4	1.0-3.0	GTR (85%)	558.5	9.9	0.54
M5	1.0-3.0	GTR (93%)	544.7	9.8	0.59
M6	0.5-1.0	GTR (90%)	594.6	9.9	0.27
M7	<0.5	GTR (90%)	398.0	10.2	0.31
M8	<2.0	GTR (40%) / mortero de cemento (60%)	284.7	10.0	0.23
Impactodan 10	-	Polietileno reticulado	21.8	10.0	-
Texsilen Plus	-	Polietileno expandido de celda cerrada	29.0	5.0	-
Trosilen AL-3	-	Polietileno expandido con film de aluminio	48.3	3.0	-
Inasonic 120/20	-	Espuma de poliuretano expandido	152.6	20.0	-

Tabla 4.12. Componentes de las láminas elásticas comerciales y las empleadas en este trabajo y sus propiedades físicas.

4.5.3. Propiedades no acústicas

La muestra M1 presenta valores más altos de porosidad debido a la composición de la misma. La vermiculita y la espuma de poliestireno expandido (EPS), contribuyen a la porosidad con numerosos microporos y su presencia resulta en un aumento de la porosidad accesible global de la mezcla. El tamaño de partícula del residuo de neumático (GTR), y el aglutinante en la muestra M2 son los principales factores que determinan el valor de su porosidad. Las muestras M4 y M5 presentan valores de porosidad similares que se pueden atribuir a una proporción relativamente alta de

partículas con tamaños más grandes en la mezcla. El resto de las muestras presentan unos valores de porosidad relativamente bajos, debido principalmente a que los huecos entre las partículas individuales se colmatan con la resina.

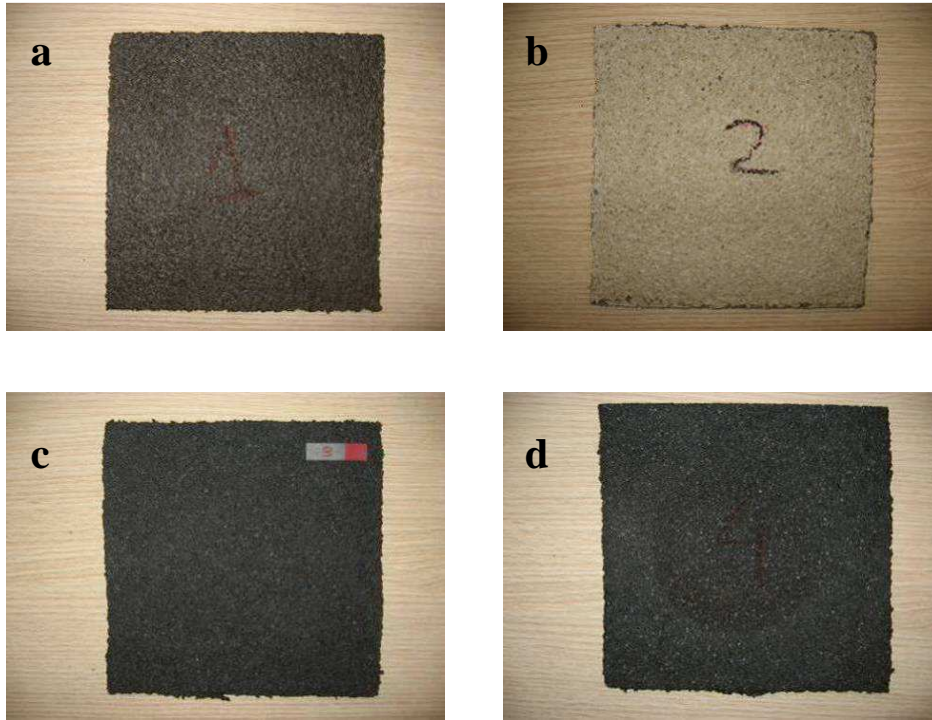


Figura 4.45. Detalle de algunas de las láminas empleadas en este trabajo, M1 (a), M2 (b), M3(c) y M4 (d).

La figura 4.46 muestra las funciones de respuesta en frecuencia obtenidas a partir del ensayo según la norma UNE EN 29052-1 para las láminas elásticas estudiadas. Las frecuencia de resonancia de la vibración vertical fundamental obtenidas mediante este método, están comprendidas entre 42.5 y 100.2 Hz. Estos valores son comparables a los valores obtenidos para láminas anti-impacto, que se están comercializando en la actualidad, en las mismas condiciones. Las frecuencias de resonancia y, por lo tanto, la rigidez dinámica son comparables para las láminas elásticas obtenidas a partir del residuo de neumático y para las láminas elásticas comerciales tal como podemos apreciar en la figura 4.47 y en la tabla 4.12. Cabe señalar que uno de los productos comercial, Inasonic 120/20, presenta un espesor superior que el de las láminas estudiadas. Las muestras M2 y M7 presentan una mejora a ruido de impacto normalizado superior a la de la lámina Inasonic. No obstante, si comparamos láminas

con espesores similares, M2, M7 e Impactodan 10, presentan mejoras a ruido de impacto similares.

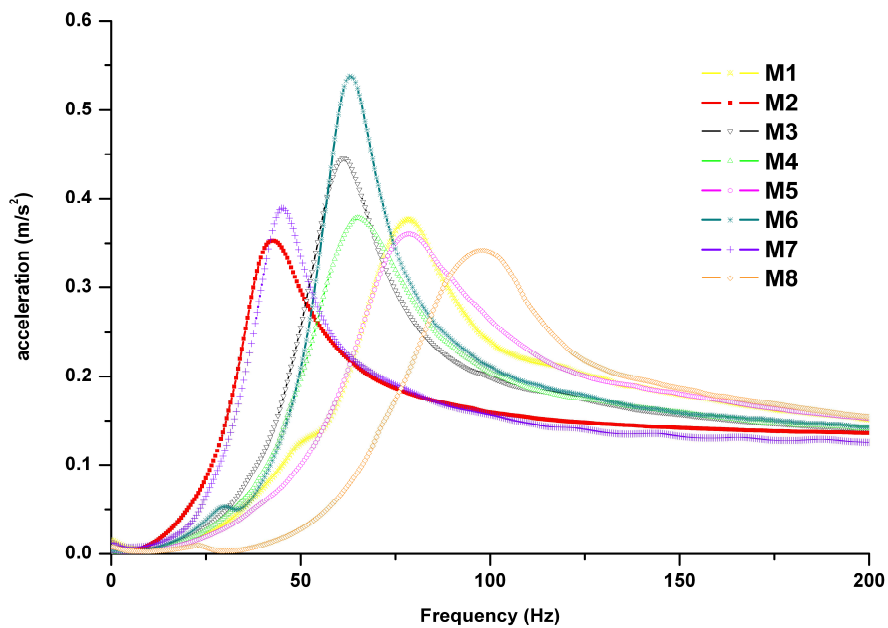


Figura 4.46. Función de respuesta en frecuencia (FRF) de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo según UNE EN 29052-1:1994 en la zona de bajas frecuencias para las láminas estudiadas.

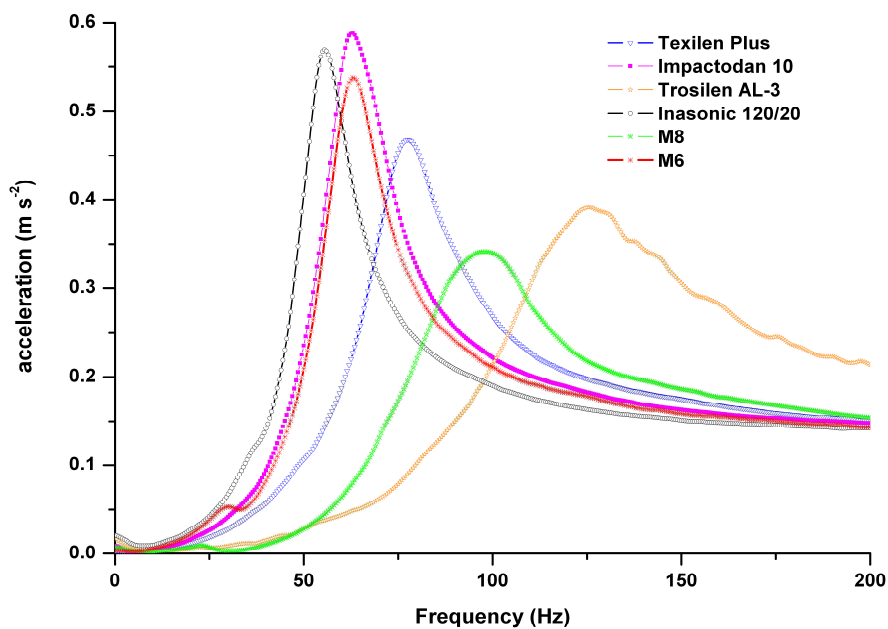


Figura 4.47. Función de respuesta en frecuencia (FRF) de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo según UNE EN 29052-1:1994 en la zona de bajas frecuencias para las láminas comerciales y las muestras M6 y M8.

Si comparamos la rigidez dinámica y la mejora a ruido de impacto normalizado de las láminas estudiadas y de los productos empleados habitualmente en la construcción, no ensayadas en este trabajo, las primeras presentan unos valores relativamente aceptables y nos permiten hacer pensar que es posible emplear estas nuevas láminas para introducir una mejora en el aislamiento por ruido de impacto (Tabla 4.13). Los valores de la rigidez dinámica de las nuevas láminas están comprendidas entre 14.3 y 49.2 MN m⁻³ mientras que los valores para las láminas comerciales están entre 7.9 y 124.4 MN m⁻³.

Muestra	σ' (MN m ⁻³)	ΔL (dB)	Componentes	Espesor (mm)
M1	48.5	23	GTR (50%) / Vermiculita (20%) / EPS (20%)	10.9
M2	14.3	31	GTR (90%)	12.0
M3	29.9	26	GTR (85%)	10.1
M4	33.4	25	GTR (85%)	9.9
M5	48.5	23	GTR (93%)	9.8
M6	31.3	25	GTR (90%)	9.9
M7	16.0	30	GTR (90%)	10.2
M8	49.2	22	GTR (40%) / mortero de cemento (60%)	10.0
Texsilen Plus 5 (TEXSA)*	47.4	23	Polietileno expandido de celda cerrada	5.0
Trosilen AL-3*	124.4	16	Polietileno expandido con film de aluminio	3.0
Inasonic 120/20 (INASEL)*	24.3	27	Espuma de poliuretano expandido	20.0
ImpactoDAN (DANOSA)*	31.3	25	Polietileno reticulado	10.0
ConforDAN (DANOSA)	100.0	18	Polietileno reticulado de celda cerrada	3.0
ChovAIMPACT Plus (ChovA)	24.0	24	Polietileno de celda cerrada	9.0
ChovAIMPACT AR 10 (ChovA)	7.9	20	Polietileno no reticulado de celda cerrada	10.0
ChovAIMPACT AR 5 (ChovA)	32.0	20	Polietileno no reticulado de celda cerrada	5.0
Panel PST (ISOVER)	17.0	22	Lana de roca	22.0
Ultracoustic Floor TP (Knauf)	27.0	-	Lana mineral aglomerada con resina	20.0
Ultracoustic Floor TPT 01 (Knauf)	10.0	-	Lana mineral	20.0

Tabla 4.13. Rigidez dinámica, mejora a ruido de impacto y componentes y espesor de las láminas elásticas de las láminas comerciales y las fabricadas a partir de los residuos de neumáticos. (*)

Muestras de láminas comerciales ensayadas en laboratorio.

La tabla 4.14 muestra los valores de compresibilidad y el espesor relativo (valores obtenidos a partir de la ecuación (2.42)), que indican la cantidad, en porcentaje, de la

deformación no recuperada al final de los ciclos de carga a los que se someten las láminas conforme a la norma UNE EN 12431 (UNE EN 12431, 2013) para cada muestra. Los valores de compresibilidad muestran la notable capacidad de soportar cargas elevadas para las muestras M1 y M7 mientras que la variación de espesor indica una excelente resistencia frente a los ciclos de carga. Estos materiales poliméricos presentan unas interesantes propiedades mecánicas por lo que también se evaluaron el módulo de Young y el factor de pérdida.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
c (mm)	0.7	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.5	2.5
h(c) (%)	6.5	2.5	3.0	2.1	1.0	2.0	5.0	25.5

Tabla 4.14. Compresibilidad y reducción del espesor (%) de las láminas (Schiavi et al., 2007b).

Los valores obtenidos para el factor de pérdidas y la parte real del módulo de Young se muestran en la tabla 4.15. Los valores del factor de pérdidas obtenidos se encuentran en el rango comprendido entre 0.17 y 0.49. Sería de esperar que una combinación de un módulo de Young, relativamente bajo (se corresponde con un valor de rigidez dinámica bajo) y un elevado factor de pérdidas sería necesario para obtener un buen aislamiento al ruido de impacto. Esta combinación óptima de estos parámetros se ha obtenido en las muestras M2 y M7. La muestra M8 presenta el valor más bajo del factor de pérdidas a la vez que uno de los valores más altos del módulo de Young, lo que se corrobora con la hipótesis de que una lámina elástica que presente un factor de pérdidas alto y un módulo de Young reducido proporcionará un buen rendimiento en cuanto al aislamiento al ruido de impacto (Rushforth et al., 2005).

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
η	0.34	0.49	0.33	0.43	0.46	0.26	0.36	0.17
$E(\text{Pa}) \times 10^5$	5.3	1.7	3.0	3.3	4.8	3.1	1.6	4.9

Tabla 4.15. Factor de pérdidas (obtenido a partir de la eq. 2.43) y la parte real del módulo de Young (obtenido a partir de la eq. 2.44) de las nuevas láminas elásticas.

Estos resultados sugieren que con el uso de estas láminas elásticas se puede reemplazar el uso de las actuales láminas comerciales empleadas en edificación y, en algunos casos, mejorar el comportamiento al aislamiento acústico a ruido de impacto en forjados con un bajo espesor, presentando un mayor aislamiento al ruido aéreo.

4.5.4. Comparativa entre el modelo de Cremer y las pruebas de laboratorio en cámara normalizada

Para el estudio del comportamiento acústico de estas láminas elásticas en la construcción y, con posterioridad a las pruebas inicialmente realizadas a escala de laboratorio, se llevaron a cabo ensayos en cámaras normalizadas, empleando dos de las muestras iniciales, M6 y M8. Los motivos por el que se optó por estas dos muestras fueron; el bajo coste para su fabricación y, en el caso de la muestra M-6, sus buenos resultados teóricos. Los ensayos se realizaron conforme a la norma UNE EN ISO 140-8, presentando en ambos casos la lámina un espesor de aproximadamente 10 mm.

En la figura 4.48 se muestran los resultados de estos ensayos. En el caso de la muestra M6, se realizaron 2 ensayos diferentes, con soleras de 5 y 7 mm de espesor, para comprobar su comportamiento con masas diferentes. Se compararon la mejora del aislamiento a ruido de impacto obtenidas según el modelo de Cremer y en base a los ensayos realizados en cámara normalizada. Se puede observar que el valor teórico es ligeramente superior que los resultados experimentales, como era de esperar. Se puede apreciar que los valores para la solera con 7 mm de espesor son inferiores a los obtenidos para la solera con 5 mm. El motivo de este comportamiento es el aumento de la rigidez del sistema conforme aumenta la masa del mismo. En la figura 4.48 se observa que existe una dependencia de aproximadamente 9 dB por octava entre las frecuencias 100 Hz y 1600 Hz. La curva presenta una pendiente de 30 dB como estimaba el modelo en la ecuación (2.123). A partir de la frecuencia de 1600 Hz, cambia la tendencia de 9 dB por octava a 18 dB por octava. A frecuencias más altas, por encima de 2 kHz, los valores superiores a los establecidos inicialmente por el modelo se pueden explicar por la aparición de una frecuencia de resonancia a 2500 Hz. La mejora a ruido de impactos normalizado obtenida fue de 21 y 23 dB, respectivamente.

En el caso de la muestra M8, se realizó un único ensayo para una solera de 5 mm. Existe una gran diferencia entre el valor establecido por el modelo y los resultados

experimentales (Figura 4.49). El motivo fue la colocación de la lámina elástica en la sala receptora posiblemente debido a un mal curado de la misma. La mejora a ruido de impactos normalizado fue de 10 dB, valor muy distinto del predicho por el modelo por lo que los resultados experimentales no se tuvieron en cuenta.

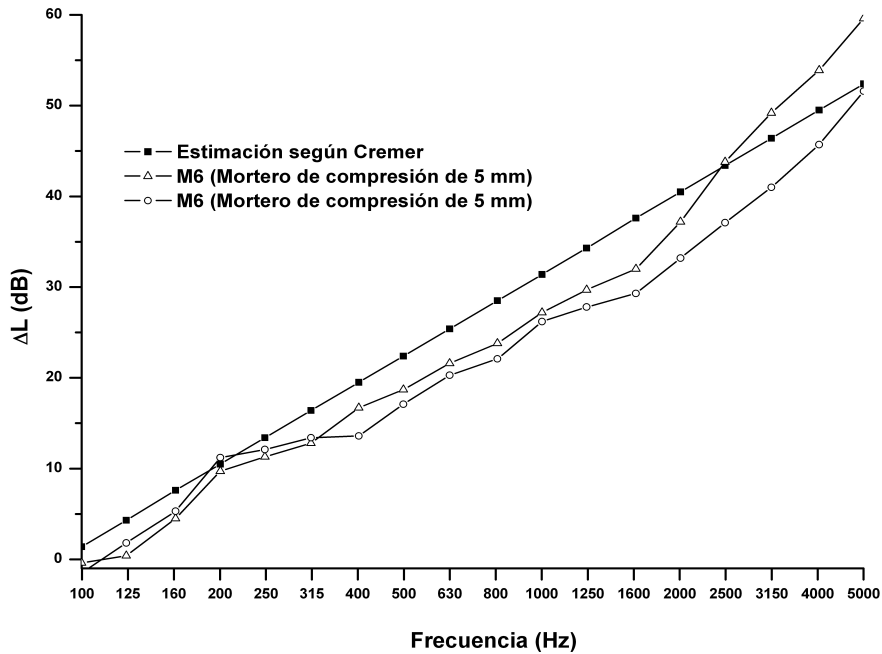


Figura 4.48. Mejora del aislamiento a ruido de impacto de las muestras M6 teórico y experimental.

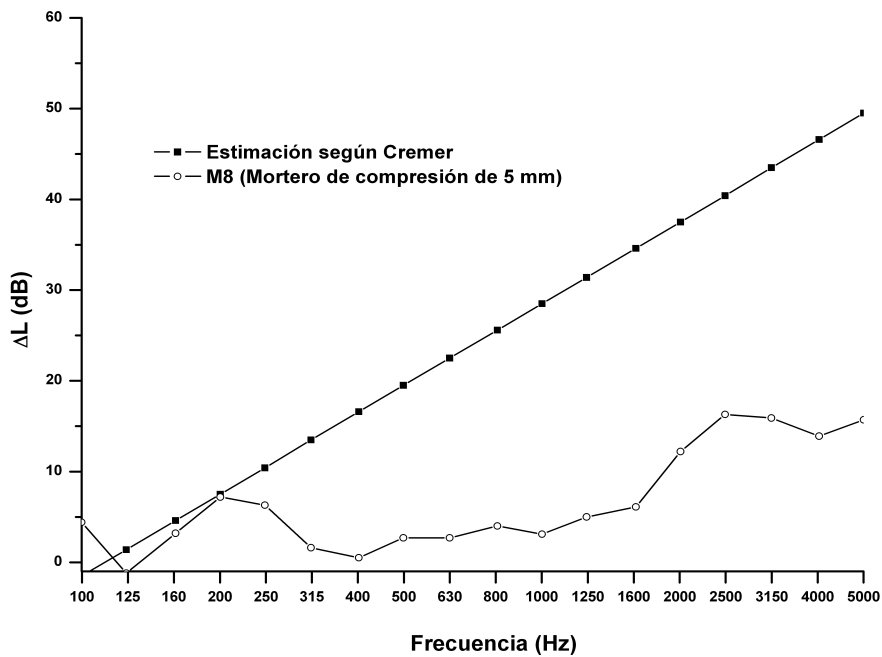


Figura 4.49. Mejora del aislamiento a ruido de impacto de las muestras M8 teórico y experimental.

Al igual que en la evaluación a la mejora del ruido de impacto, para evaluar la mejora a ruido aéreo se emplearon las muestras M6 y M8. Como se aprecia en la figura 4.50, el índice de reducción sonora obtenido para la lámina M6 con diferentes espesores, 5 y 7 cm, de solera de mortero apenas muestra diferencias. El valor global del índice de reducción acústica del revestimiento del suelo obtenido fue de 11.4 y 12.3 dB, respectivamente. En el caso de la lámina M8 (Figura 4.51), se puede apreciar que a medias y bajas frecuencias, el índice de reducción sonora llega a ser coincidente, esto nos lleva a pensar en que la colocación de la propia lámina pudo haber sido defectuosa. El valor global del índice de reducción acústica del revestimiento del suelo obtenido fue de 0.8 dB. La figura 4.52 muestra el índice de reducción acústica del revestimiento del suelo de las muestras M6 y M8.

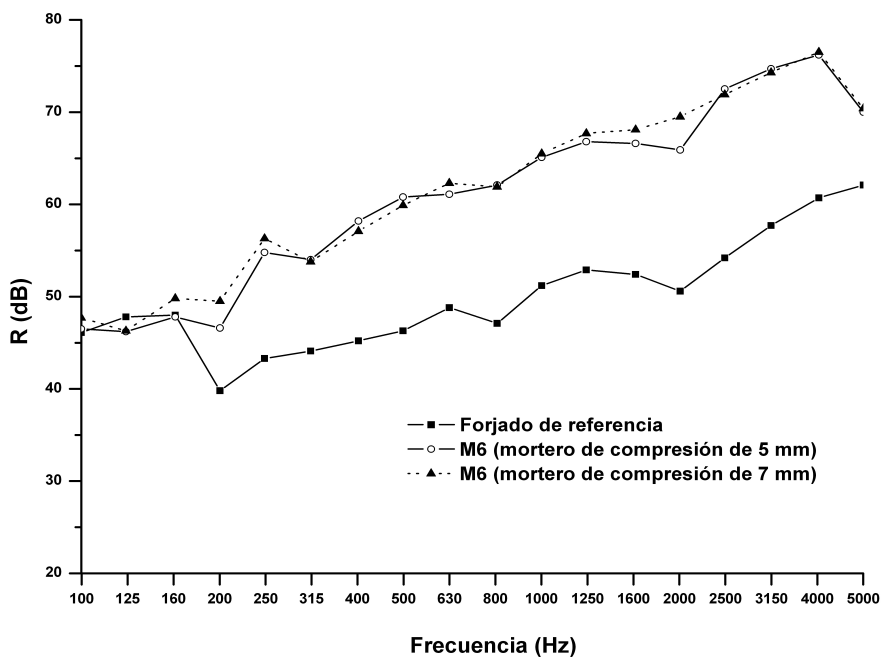


Figura 4.50. Índice de reducción sonora de la muestra M6 con solera de mortero de 5 y 7 cm y del forjado de referencia.

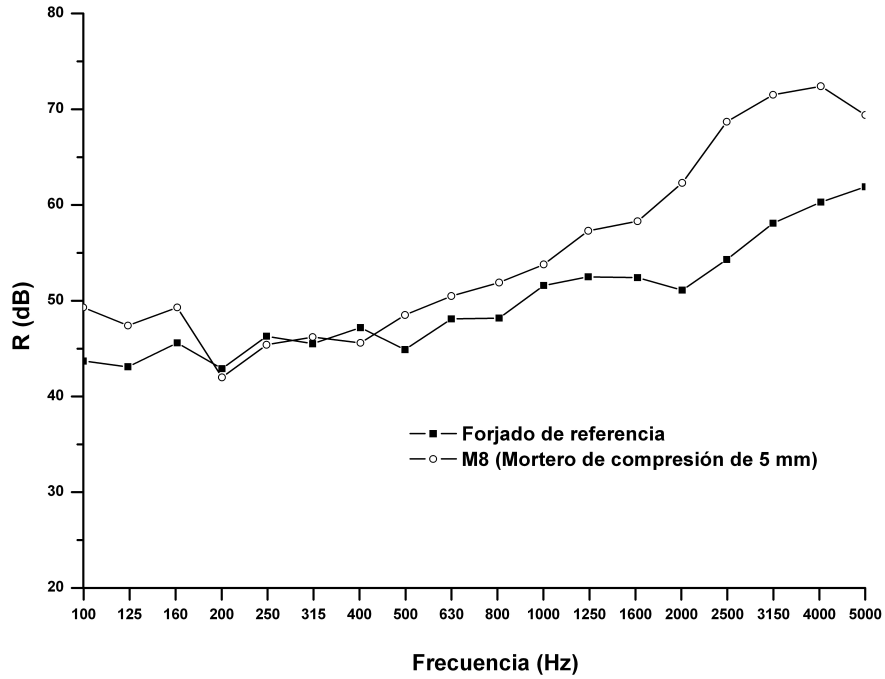


Figura 4.51. Índice de reducción sonora de la muestra M8 con solera de mortero de 5 cm y del forjado de referencia.

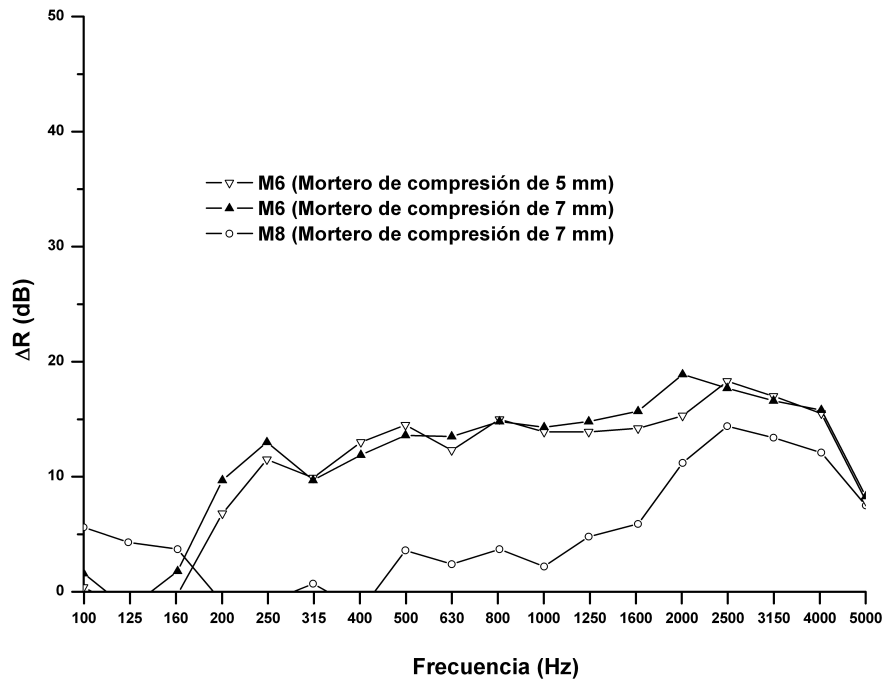


Figura 4.52. Mejora del aislamiento a ruido aéreo empleando como revestimiento del suelo las muestras M6 y M8.

4.6. Comportamiento de láminas elásticas elaboradas con granulado de corcho y resinas para la reducción del ruido de impacto

*Artículo actualmente en fase de corrección en la revista *European Journal of Wood and Wood Products* de Springer.*

4.6.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue la fabricación y estudio de láminas elásticas compuestas por granos de corcho, de diferentes granulometrías, sin aglutinar y aglutinados con resinas epoxi y poliuretano. Para ello se realizaron ensayos en laboratorio, conforme a la Norma UNE EN 29052-1, para determinar, a partir de la rigidez dinámica, el índice de mejora a ruido de impacto. Posteriormente se compararon estos resultados experimentales con los de láminas comerciales empleadas en la actualidad.

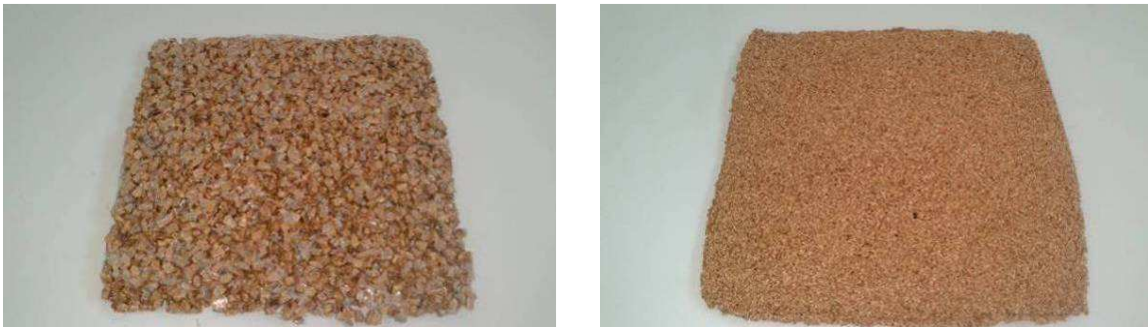


Figura 4.53. Detalle de algunas de las diferentes láminas empleadas en este trabajo. A la izquierda lámina de corcho aglutinada con resina epoxi y $4.0 < D < 5.0$ mm. A la derecha lámina de corcho aglutinada con resina poliuretano y $1.0 < D < 2.0$ mm.

4.6.2. Materiales empleados

El material utilizado en este trabajo fue el grano de corcho procedente del sobrante empleado en la fabricación de tapones de corcho. Se emplearon 8 diferentes tipos de granos de corcho, con tamaños comprendidos entre 0.5 y 8 mm, seleccionados mediante tamices normalizados, a partir de los residuos de la fabricación de tapones de corcho. Para la fabricación de las probetas, el grano de corcho se mezcló con resinas de poliuretano y epoxi de alta viscosidad, con objeto de facilitar su mezcla, en una

proporción de 80% en peso (Figura 4.53). Los espesores estaban comprendidos entre 9.2 y 10.4 mm.

4.6.3. Resultados en laboratorio

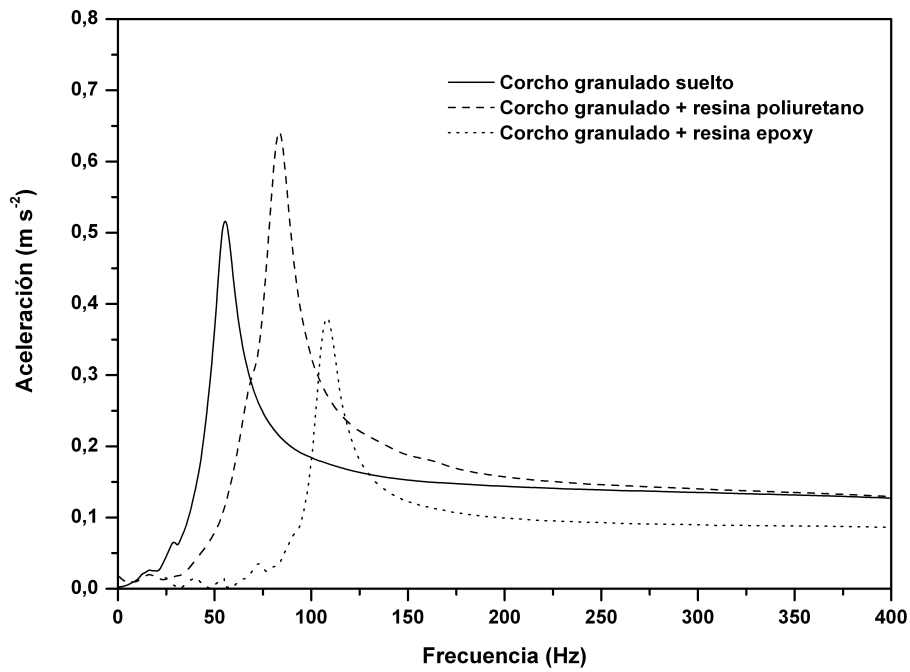
Antes de evaluar el comportamiento de las muestras de corcho aglutinadas con la resina, se obtuvieron los valores de rigidez dinámica de las diferentes muestras de corcho sin aglutinar, para comprobar las diferencias existentes. Posteriormente, esta misma muestra se mezcló con la resina en las proporciones definidas inicialmente y tras 24 horas de secado, se realizó el ensayo.

La tabla 4.16 muestra las frecuencias de resonancia procedentes de las funciones de respuesta en frecuencia, obtenidas conforme a la Norma UNE EN 29052-1 (UNE EN 29052-1, 1994), para las láminas hechas a partir de granos de corcho sueltos y granos de corcho ligados con resinas de poliuretano y epoxi (Figura 4.54). Las frecuencias de resonancia varían entre 57.5 y 136.0 Hz.

Tamaño de grano	Corcho suelto			Corcho + Resina Poliuretano			Corcho + Resina epoxi		
	fr (Hz)	s' (MN/m ³)	ΔL_w (dB)	fr (Hz)	s' (MN/m ³)	ΔL_w (dB)	fr (Hz)	s' (MN/m ³)	ΔL_w (dB)
D>6.3	57.5	26.1	23.7	81.0	51.8	19.2	108.0	92.1	15.5
5.60<D<6.30	60.5	28.9	23.0	81.0	51.8	19.2	113.0	100.8	14.9
5.00<D<5.60	60.0	28.4	23.1	85.0	57.0	18.6	120.5	114.6	14.0
4.00<D<5.00	63.0	31.3	22.5	86.0	58.4	18.4	123.0	119.5	13.8
3.15<D<4.00	65.0	33.4	22.1	85.5	57.7	18.5	120.5	114.6	14.0
2.0<D<3.15	71.5	40.4	20.8	94.0	69.8	17.3	124.0	121.4	13.7
1.00<D<2.00	75.5	45.0	20.1	102.0	82.1	16.2	133.0	139.7	12.7
0.50<D<1.00	73.5	42.7	20.5	107.0	90.4	15.6	136.0	146.0	12.4

Tabla 4.16. Frecuencia de resonancia, rigidez dinámica y mejora del aislamiento a ruido de impacto de las láminas de corcho elaboradas con granos de corcho suelto y con resinas poliuretano y epoxi.

a



b

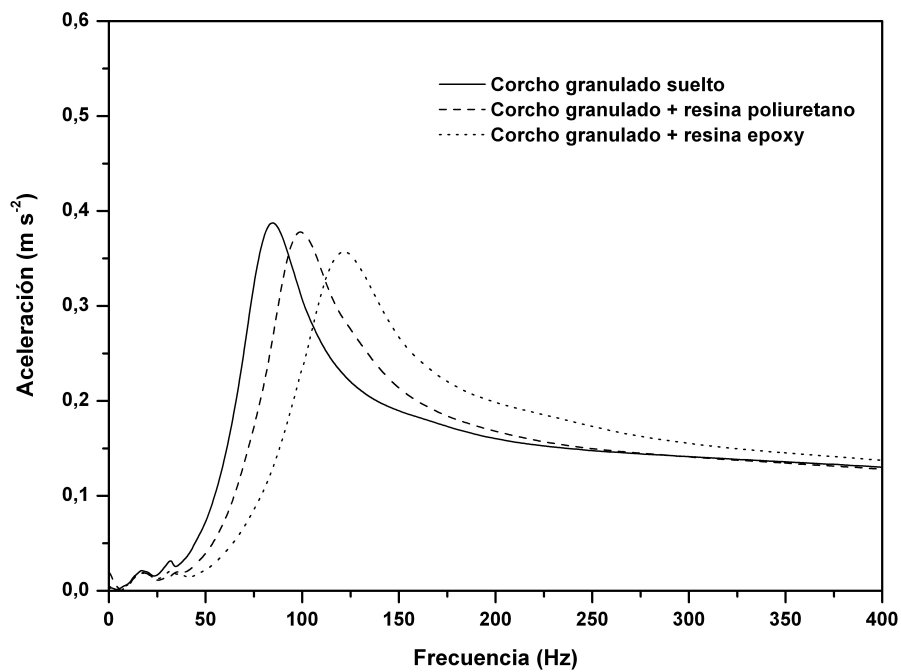


Figura 4.54. Función de respuesta en frecuencia (FRF) de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo según UNE EN 29052-1:1994 en la zona de bajas frecuencias para las láminas de corcho con tamaños de grano mayores de 6.3mm (a) y 0.5 mm (b).

Estos valores de frecuencia de resonancia son comparables, en algunos casos, a los valores obtenidos para láminas elásticas comerciales ensayadas bajo las mismas condiciones. Se puede decir que, las frecuencias de resonancia y, por tanto, la rigidez dinámica, son comparables entre las láminas elásticas comerciales ensayadas en laboratorio para este trabajo y las elaboradas a partir de corcho, como se muestra en la tabla 4.17. Cabe señalar que una de las láminas comerciales, al igual que ocurría con las elaboradas a partir de GTR, Inasonic 120/20, presenta espesores superiores que las de las láminas de corcho. Las muestras M1 a M8, realizadas con corcho en granos sin aglutinar, presentan un índice de mejora a ruido de impacto ponderado comparable con las láminas comerciales. Sin embargo, las láminas de corcho con similar espesor e Impactodan, presentan un índice de mejora de ruido de impacto ponderado comparable.

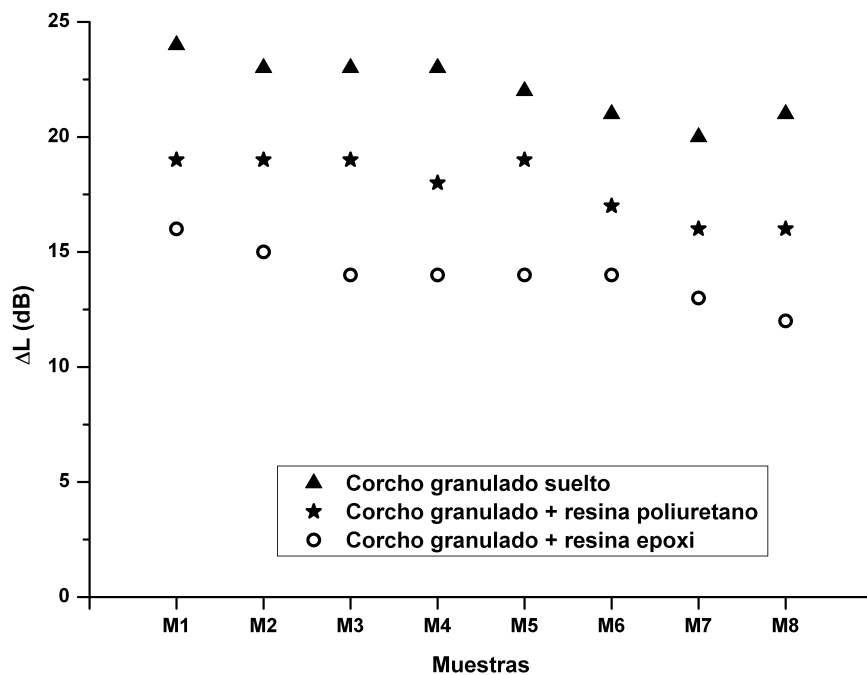


Figura 4.55. Relación entre ΔL , resinas y tamaño de grano de las láminas elásticas.

Comparando los valores de la mejora de ruido de impacto teórico y la rigidez dinámica de las láminas de corcho frente a las que muestran láminas elásticas comerciales no ensayadas, podemos observar que los valores teóricos de las láminas de corcho presentan resultados bastante satisfactorios y demuestran que es posible utilizar estas láminas como sustitutas de las ya existentes. Los valores de la rigidez dinámica de las

nuevas láminas elásticas están entre 26.1 y 136.0 mientras que los valores de algunas de las láminas elásticas comerciales entre 24.3 y 124.4.

La figura 4.55 muestra la relación entre el tamaño de grano y la mejora a ruido de impacto teórico para las láminas elaboradas en este trabajo. Podemos comprobar cómo, cuanto mayor es el tamaño de partícula, aumenta la mejora a ruido de impacto, por lo que se puede afirmar que existe una dependencia entre el tamaño de grano y la mejora a ruido de impacto. El uso de una resina para aglutinar estos granos de corcho produce un aumento de la rigidez de la lámina por lo que disminuye la mejora de ruido de impacto. De igual forma, los resultados obtenidos para la resina de poliuretano son más altos que para las resinas epoxi, es decir, la resina epoxi rigidiza más la lámina, aumentando la rigidez dinámica lo que se reduce en una disminución de la mejora de ruido de impacto.

5. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo presentado en esta memoria, se ha realizado una revisión de algunos de los materiales acústicos más usualmente empleados en la actualidad en el Aislamiento y Acondicionamiento Acústico así como de sus características y propiedades. Además, se ha realizado una revisión de los trabajos más relevantes, en el campo de la Acústica, relacionados con la caracterización de materiales procedentes del reciclado y valorización de residuos y de materiales sostenibles procedentes de la biomasa.

De la revisión bibliográfica realizada y de los trabajos aquí desarrollados se ha podido comprobar como, mediante nuevos materiales acústicos elaborados a partir de la valorización de diferentes tipos de residuos y materiales naturales, se pueden obtener materiales con los que pueda llegar a alcanzarse un comportamiento acústico al menos equiparable a los actualmente empleados en la construcción; pudiendo llegar, incluso, a sustituir a los ya existentes.

Los materiales de partida empleados en nuestra investigación han sido los residuos procedentes de los neumáticos (caucho, fibras textiles y metálicas), el corcho (procedente de los subproductos del proceso de preparación y transformación de los tapones) y materiales naturales (arcillas de baja densidad, sin aglutinar y aglutinadas con resinas de tipo poliuretano, epoxi y acrílica).

De estos materiales bajo estudio, se han examinado las propiedades no acústicas; físicas y mecánicas (porosidad, tortuosidad, resistencia al flujo, rigidez dinámica y compresibilidad) y acústicas (impedancia superficial y coeficiente de absorción acústica) que permiten caracterizar el comportamiento acústico de los materiales porosos. De igual forma, se ha hecho un repaso de los métodos de medida experimentales utilizados para obtener estas propiedades.

También se ha realizado un repaso de los principales modelos (teóricos y empíricos) que intentan predecir el comportamiento de los materiales porosos desde el punto de vista acústico, a partir de determinadas propiedades físicas.

En cuanto a la caracterización de materiales, en esta Memoria de Tesis Doctoral, se presentan seis trabajos de investigación, de los que cuatro ya han sido publicados en revistas internacionales indexadas, uno está pendiente de publicar y otro está aún en la revisión inicial. En ellos se investiga el comportamiento acústico de diferentes tipos de materiales sostenibles. En todos estos trabajos se realizan estudios, en detalle, sobre su diseño, su dosificación, cómo se mezclan, cómo se logra que sus propiedades iguallen o mejoren a las de los existentes y cómo su diseño implica que puedan ser utilizados en construcción. Las posibles aplicaciones de estos materiales van encaminadas a productos para su uso como absorbentes acústicos (acondicionamiento) o como láminas elásticas en suelo flotante (aislamiento).

En los cuatro primeros trabajos, se estudia el comportamiento de materiales destinados a funcionar como materiales porosos absorbentes del sonido.

En el primer trabajo, se investiga el comportamiento acústico, de materiales absorbentes diseñados y elaborados en base a la fibra textil y el caucho procedentes de los residuos de neumáticos de vehículos pesados, mezclados con una resina acrílica, y conformados mediante un proceso de termocompresión. También se comprueba la influencia de ciertas variables del diseño en las propiedades acústicas obtenidas. Se concluye que:

- Este tipo de material poroso presenta un coeficiente de absorción acústica relativamente alto para frecuencias medias y altas, llegando, incluso, a ser superior, para este rango de frecuencias, que el de materiales de espesores similares elaborados con fibra de vidrio.
- Con el uso de la placa perforada se consigue un aumento en el coeficiente de absorción acústica, desplazándose los máximos del coeficiente de absorción hacia frecuencias más bajas.
- La compresión en el proceso de conformado del material, supone una disminución de la porosidad y un aumento en la tortuosidad y resistencia al flujo, lo que supone una disminución de los valores del coeficiente de absorción en el ancho de banda estudiado.
- El empleo de una resina acrílica, supone un aumento de la rigidez del material, la tortuosidad y la resistencia al flujo, dando lugar a una disminución de los valores del coeficiente de absorción en el ancho de banda estudiado.

En el segundo trabajo se investiga el diseño de un nuevo material fabricado con granos de caucho, con diferente granulometría, mezclados con resina de poliuretano empleando el modelo de Champoux y Stinson (1992) y el tubo de impedancia. Se concluye que:

- El comportamiento acústico de este tipo de material, basado en granos de caucho ligados con resina poliuretano, muestra valores del coeficiente de absorción acústica elevados para frecuencias medias con espesores relativamente pequeños, aumentando conforme aumenta el espesor.
- Se ha empleado el modelo de Champoux – Stinson para evaluar teóricamente el comportamiento acústico de material. El ajuste de los factores de forma del modelo nos ha permitido comprobar que este modelo es adecuado para su empleo en este tipo de materiales.

En el tercer trabajo se analiza la posibilidad de diseñar materiales absorbentes mediante el uso de granos de corcho de diferente granulometría sin aglutinar. Se analiza la relación entre el tamaño del grano implicado y el comportamiento acústico obtenido. Además, se analiza la validez del modelo de Voronina y Horoshenkov (2003, 2004) en este tipo de materiales para los rangos de las variables físicas consideradas. Se concluye que:

- Existe una relación entre los diferentes tamaños de corcho y los valores del coeficiente de absorción obtenidos. Conforme aumenta el tamaño de la partícula de corcho, los valores de los máximos de absorción tienden a reducirse y a desplazarse hacia frecuencias más altas. Esto sugiere que la angularidad de las partículas tiene un efecto considerable en la porosidad de las muestras y, por tanto, en su comportamiento acústico.
- Existe una buena correspondencia entre los valores obtenidos teórica y experimentalmente para muestras con tamaño de partícula inferiores a 2.1 mm. Conforme aumenta el espesor de la muestra, aumentan las diferencias entre los valores teóricos y experimentales del primer máximo del coeficiente absorción. Esto sugiere que los coeficientes del modelo deben ser redefinidos.

En el cuarto trabajo se investiga el diseño, como material acústico absorbente, de materiales naturales, como la perlita, arlita y vermiculita, y la influencia de ciertas variables del diseño en las propiedades acústicas obtenidas. Se concluye que:

- Con el uso de arlita aglutinada con resina de poliuretano, se obtienen materiales porosos que presentan un coeficiente de absorción acústica que aumenta conforme aumenta la proporción de resina empleada para aglutinarlos y que se desplaza hacia frecuencias más bajas.
- En el caso de la perlita, el desplazamiento ocurre de la misma forma, pero en este caso, ese aumento sucede conforme disminuye la cantidad de resina empleada, al igual que en el caso de la vermiculita.
- Con este tipo de materiales de partida, se pueden desarrollar materiales absorbentes porosos de forma que actúen como absorbentes selectivos para un determinado rango de frecuencias, en función de las proporciones de resina que empleemos para su fabricación.

Los trabajos quinto y sexto, están relacionados con el comportamiento acústico de láminas elásticas empleadas en suelos flotantes.

En el quinto trabajo se investiga el diseño de nuevas láminas elásticas fabricadas con granos de caucho y resina poliuretano en diferentes proporciones y la influencia de ciertas variables del diseño en las propiedades acústicas obtenidas. Esta investigación se realiza mediante el estudio teórico y experimental de las propiedades mecánicas que intervienen en el comportamiento acústico de las láminas. Posteriormente se comparan los resultados teóricos y experimentales obtenidos en laboratorio, con los resultados obtenidos en cámaras normalizadas. Se concluye que:

- Este tipo de material presenta un buen comportamiento acústico como lámina elástica para su uso en suelos flotantes, mostrando unos valores de mejora a ruido de impacto relativamente elevados y comparables, en algunos casos, con las láminas que se emplean en la actualidad en la construcción.
- El uso del modelo de Cremer para evaluar el comportamiento acústico de estas láminas elásticas, es adecuado para comprobar la mejora a ruido de impacto que introducen en un suelo flotante.

En el sexto trabajo, el grano de corcho es el componente principal de las láminas elásticas desarrolladas. En este trabajo se investiga el diseño de las láminas, fabricadas con resinas poliuretano y epoxi, y la influencia de ciertas variables del diseño, como la granulometría empleada, la resina y el porcentaje de resina utilizada en su fabricación, en su comportamiento acústico. La investigación se lleva a cabo mediante ensayos teóricos y experimentales. Se concluye que:

- Existe una dependencia lineal entre el tamaño de partícula y la mejora a ruido de impacto de las láminas, aumentando conforme aumenta el tamaño de partícula.
- El uso de resinas poliuretano y epoxi disminuyen la mejora a ruido de impacto respecto a los granos de corcho sin aglutinar. Esa disminución es mayor en el caso de la resinas epoxi debido a que estas, al secar, presentan mayor rigidez.

REFERENCIAS

Aiello, M.A.; Liuzzi, F.; Centonze, G.; Maffezzoli, A. (2009). Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Manage.* 29:1960-1970.

Allard, J.F. (1993). *Propagation of sound in porous media, modelling sound absorbing materials*. Elsevier Applied Science. New York.

Allard, J.F.; Castagnede, B.; Henry, M.; Lauriks, W. (1994). Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air. *Rev. Sci. Instrum.* 65:754-755.

Asdrubali, F.; Horoshenkov, K.V. (2002). The acoustical properties of expanded clay granulates. *J. Build Acoust.* 9:85-98.

Asdrubali, F. (2007). Green and sustainable materials for noise control in buildings. En Resúmenes del *19º Congreso Internacional de Acústica. ICA 2007*. Madrid. España.

Attenborough, K. (1983). Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 73:785-799.

Attenborough, K. (1987). On the acoustic slow wave in air-filled granular media. *J. Acoust. Soc. Am.* 81:93-102.

Attenborough, K. (1992). Acoustical characteristics of porous material. *Phys. Rep.* 82:179-227.

Attenborough, K.; Li, K.M.; Horoshenkov, K.V. (2007). *Predicting Outdoor Sound*. Taylor and Francis. London.

Attenborough, K.; Ver, I. (2008). *Noise and Vibration Control Engineering*, 3rd ed. I. L. Ver and L. L. Beranek. New York.

Baron, N.; Bonfiglio, P.; Fausti, P. (2004). Dynamic Stiffness of materials used For Reduction in Impact Noise: Comparison Between Different Measurement Techniques. En Resúmenes del *Congreso Nacional de Acústica. Tecniacústica 2004*, Guimaraes. Portugal.

Bartolini, R.; Filippozzi, S.; Princi, E.; Schenone, C.; Vicini, S. (2010). Acoustic and mechanical properties of expanded clay granulates consolidated by epoxy resin. *Appl. Clay Sci.* 48:460-465.

Benkreira, H.; Khan, A.; Horoshenkov, K.V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chem. Eng. Sci.* 66:4517-4171.

Beranek, L. (1942). Acoustic Impedance of Porous Materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 13:248-260.

Bies, D.A. y Hansen, C.H. (1980). Flow resistance information for acoustical design. *Appl. Acoust.* 13:357-391.

Biot, M.A. (1956a). Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I Low -frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28:168-178.

Biot, M.A. (1956b) Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated solid. II, High frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28:179-191.

Boutin, C.; Royer, P.; Auriault, J.L. (1998). Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity. *Int. J. Solids Struct.* 35:4709-4737.

Bravo, J.M.; Sinisterra, J.; Uris, A.; Llinares, J.; Estelles, H. (2002). Influence of air layers and damping layers between gypsum boards on sound transmission. *Appl. Acoust.* 63:1051-1059.

Brown, R.J.S. (1980). Connection between formation factor of electrical resistivity and fluid-solid coupling factor in Biot's equation for acoustic waves in fluid-filled porous media. *Geophysics.* 45:1269-75.

Carman, P.C. (1937). Fluid flow through granular beds. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 15:150-158.

Carman, P.C. (1956). *Flow of Gases through Porous Media.* Butterworth, London.

Castagnede, B.; Aknine, A.; Brouard, B.; Tarnow, V. (2000). Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. *Appl. Acoust.* 61:173-82.

-
- Champoux, Y.; Stinson, M.R. (1990a). Measurement of the tortuosity of porous materials and applications for acoustical modelling. *J. Acoust. Soc. Am.* 87:S139.
- Champoux, Y.; Stinson M.R. (1990b). Experimental investigation of models of soundwave propagation in air saturated porous media. *J. Acoust. Soc. Am.* 88:S121.
- Champoux, Y.; Stinson, M.R.; Daigle, G.A. (1991). Air-based system for the measurement of porosity. *J. Acoust. Soc. Am.* 89:910-916.
- Champoux, Y.; Stinson, M.R. (1992). On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. *J. Acoust. Soc. Am.* 92:1120-31.
- Chui-Te, C. (2008). Use of ground tire rubber in asphalt pavements: Field trial and evaluation in Taiwan. *Res. Con. Rec.*52:522-532.
- Cox, T.; D'Antonio, P. (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design, and Application*. Taylor & Francis. London.
- Craik, R.J.M.; Osipov, A.G. (1995). Structural isolation of walls using elastic interlayers. *Appl. Acoust.* 46:233-49.
- Cremer, L. (1948). *The propagation of structure-borne sound*. Department of Scientific and Industrial Research, Report N° 1.
- Cremer, L.; Heckl, M. Ungar, E.E. (1988). *Structure borne sound: structural vibrations and Sound radiation at audio frequencies*. Springer. London.
- Day, M.; Parker, I.B.; Bell, J.; Fletcher R, Duffie, J.; Sing, K.S.W.; Nicholson, D. (1994). Modelling of Mercury Intrusion and Extrusion. *Characterization of Porous Solids III*. Elsevier. 87:225-259.
- Delany, M.E.; Bazley, E.N. (1970). Acoustical properties of fibrous materials. *Appl. Acoust.* 3:105-16.
- Del Rey, R.; Alba, J.; Ramis, J.; Sanchís, V.J. (2011). New absorbent acoustic materials from plastic bottle remnants. *Mater. Const.* 304:547-558.

Doutres, O.; Atalla, N. (2011). Experimental estimation of the transmission loss contributions of a sound package placed in a double wall structure. *Appl. Acoust.* 72:372-379.

Dunn, I.P.; Davern, W.A. (1986). Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers. *Appl. Acoust.* 19:321-34.

Ersoy, S.; Küçük, H. (2009). Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. *Appl. Acoust.* 72:215-220.

España. (1977). Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 9 de julio de 1977, núm. 163, p. 15443 – 15444.

España. (1981). Real Decreto 1909/1981, de 24 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-81 sobre condiciones acústicas en los edificios. *Boletín Oficial del Estado*, 7 de septiembre de 1981, núm. 214, p. 20556 – 20577.

España. (1982). Real Decreto 2115/1982, de 12 de agosto, por el que se modifica la norma básica de la edificación NBE-CA-81, sobre condiciones acústicas en los edificios. *Boletín Oficial del Estado*, 3 de septiembre de 1982, núm. 211, p. 23820 – 23820.

España. (1984). Ley 26/1984, de 19 de julio, General para la Defensa de los Consumidores y Usuarios. *Boletín Oficial del Estado*, 24 de julio de 1984, núm. 176, p. 21686 – 21691.

España. (1988). Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. *Boletín Oficial del Estado*, 22 de abril de 1998, núm. 96, p. 13372 – 13384.

España. (1999). Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 6 de noviembre de 1999, núm. 266, p. 38925– 38934.

España (2001). Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de

Uso, 2001-2006. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de octubre de 2001, núm. 260, p. 39547 – 39555.

España. (2003). Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. *Boletín Oficial del Estado*, 18 de noviembre de 2003, núm. 276, p. 40494 – 40505.

España (2005a). Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. *Boletín Oficial del Estado*, 17 de diciembre de 2005, núm. 301, p. 41356 – 41363.

España. (2005b). Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. *Boletín Oficial del Estado*, 3 de enero de 2006b, núm. 2, p. 352– 357.

España. (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816– 11831.

España. (2007a). Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de octubre de 2007, núm. 254, p. 42952 – 42973.

España. (2007b). Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de octubre de 2007, núm. 254, p. 42992 – 43045.

España. (2009). Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008- 2015. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de febrero de 2009, núm. 49, p. 19893 – 20016.

ETRA (European Tyre Recycling Association). (2006). Tyre Technology International - Trends in Tyre Recycling. <<http://www.etra-eu.org>>. [último acceso 28/11/11].

Europa. (2002). Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 18 de julio de 2002. L 189/12-189/25.

Fellah, Z.E.A.; Berger, S.; Lauriks, W.; Depollier, C.; Aristegui, C.; Chapelon, J.Y. (2003). Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence. *J. Acoust. Soc. Am.* 113:2424-2432.

Fellah, Z.E.A, Sadouki, M.; Fellah, M.; Mitri, F.G.; Ogam, E.; Depollier, C. (2013). Simultaneous determination of porosity, tortuosity, viscous and thermal characteristic lengths of rigid porous materials. *J. Appl. Phys.* 114:204902.

Feng, W.L.; Isayev, A.I. (2006). Recycling of tire-curing bladder by ultrasonic devulcanization. *Polym. Eng. Sci.* 46:8-18.

Gafo, M.; Nogueira, J. (2010). Industrial Policy and the Cork Sector. European Commission Enterprise and Industry. CEPF Workshop on Cork. 30 November 2010.

Garai, M.; Pompoli, F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Appl. Acoust.* 66:1383-1398.

Glé, P.; Gourdon, E.; Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Appl. Acoust.* 72:249-259.

González-Corrochano, B. Alonso-Azcárate, J.; Rodas, M. (2009). Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes. *J. Environ. Manage.* 90:2801-2812.

Guillen, I.; Uris, A.; Estelles, H.; Llinares, J.; Llopis, A. (2008). On the sound insulation of masonry wall facades. *Build. Environ.* 43:523-529.

Guo, Y.C.; Zhang, J.H.; Chen, G.; Chen, G.M.; Xie, Z.H. (2014). Fracture behaviours of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Constr. Build. Mater.* 53:32-39.

Han, Z.; Chunsheng, L.; Kombe, T.; Thong-On, N. (2008). Crumb rubber blends in noise absorption study. *Mater Struct.* 41:383-390.

Hamet, J.F.; Bérengier, M. (1993) Acoustical Characteristics of Porous Pavements: A New Phenomenological Model. En *Proceedings of Inter-Noise 93*, Leuven, Belgium. 641-646.

Henderson, L.M.; Ridgeway, C.M.; Ross, W.B. (1940). *Refin. Nat. Gas Mfr.* 19:69-75.

Hernández-Olivares, F.; Bollati, M.R.; Del Rio, M.; Parga-Landa, B. (1999). Development of cork-gypsum composites for building applications. *Constr. Build. Mater.* 13:179-186.

Hopkins, C.; Hall, R. (2006). Impact sound insulation using timber platform floating floors on a concrete floor base. *Build. Acoust.* 12:273-84.

Hong, Z.; Bo, L.; Guangsu, H.; Jia, H. (2007). A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J. Sound Vib.* 304:400-406.

Horoshenkov, K.V.; Attenborough, K.; Chandler-Wilde, S.N. (1998). Pade approximants for the acoustical properties of rigid frame porous media with pore size distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* 104:1198-1209.

Horoshenkov, K.V.; Swift, M.J. (2000). The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. *Appl. Acoust.* 62:665-690.

Horoshenkov, K.V.; Swift, M.J. (2001). The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J. Acoust. Soc. Am.* 110:2371-2378.

Hosseini Fouladi, M.; Jailani Mohd Nor, M.; Ayub, M.; Ali Leman, Z. (2010). Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel. *Appl. Acoust.* 71:241-249.

Hosseini Fouladi, M.; Ayub, M.; Jailani Mohd Nor, M. (2011). Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Appl. Acoust.* 72:35-42.

Hui, C.K.; Ng, K.C.F. (2007). New floating floor design with optimum isolator location. *J. Sound Vib.* 193:175-84.

Ingard, K.U.; Dear, T.A. (1985). Measurement of Acoustic Flow Resistance. *J. Sound Vib.* 103:567-572.

Jana, G.K.; Mahaling, R.N.; Das, C.K. (2006). A novel devulcanization technology for vulcanized natural rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* 99:2831-2840

Jimenez-Espadafor, F.J.; Becerra Villanueva, J.A.; Torres-García, M.; Carvajal-Trujillo, E.; Muñoz-Blanco, A. (2011). Optimal design of acoustic material from tire fluff. *Mater. Des.* 32:3608-3616.

Johnson, D.L.; Plona, T.J.; Scala, C.; Pasierb, F.; Kojima, H. (1982). Tortuosity and acoustic slow waves. *Phys. Rev. Lett.* 49:1840-1844.

Johnson, D.L.; Koplik, J.; Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* 176:379-402.

Kim, H.K.; Lee, H.K. (2010). Acoustic absorption modelling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio. *J. Sound Vib.* 329:866-879.

Kirchoff, G.R. (1876). *Vorlesungen uber mathematische Physik. Mechanik.* B.G. Teubner. Leipzig.

Kojima, M.; Tosaka, M.; Ikeda, Y.; Kohjiya, S. (2005). Devulcanization of carbon black filled natural rubber using supercritical carbon dioxide. *J. Appl. Polym. Sci.* 95:137-143.

Leclaire, P.; Umnova, O.; Horoshenkov, K.V.; Maillet, L. (2003). Porosity measurement by comparison of air volumes. *Rev. Sci. Inst.* 74:1366-1370.

Lee, J.M.; Lee, J.S.; Kim, J.R.; Kim, S.D. (1995). Pyrolysis of waste tires with partial oxidation in a fluidized-bed reactor. *Energy.* 20:969-976.

Lee, Y.; Changwhan, J. (2003). Sound absorption properties of recycled polyester. Fibrous assembly absorbers. *Autex Res. J.* 3:78-84.

-
- Leonard, R.W. (1948). Simplified porosity measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* 20:39-41.
- Li, X.; Xu, H.; Gao, Y.; Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. *Waste Manage.* 30:2235-2246.
- Maderuelo-Sanz, R.; Martín-Castizo, M.; Vilchez-Gómez, R. (2011). The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. *Appl. Acoust.* 72:823-828.
- Maderuelo-Sanz, R.; Nadal-Gisbert, A.V.; Crespo-Amorós, J.E.; Parres-García, F. (2012). A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Appl. Acoust.* 73:402-408.
- Maderuelo-Sanz, R.; Barrigón Morillas, J.M.; Martín-Castizo, M.; Gómez Escobar, V.; Rey, G. (2013). Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. *Lat. Am. J. Solids Struct.* 10:585-600.
- Maderuelo-Sanz, R.; Barrigón Morillas, J.M.; Gómez Escobar, V. (2014). Acoustical performance of loose cork granulates. *Eur. J. Wood Prod.* 72:321-330.
- Marcos, C.; Rodríguez, I. (2010). Expansion behaviour of commercial vermiculites at 1000 °C. *Appl. Clay Sci.* 48:492-498.
- Marsh, G.M.; Buchanich, J.M.; Youk, A.O. (2011). Fiber glass exposure and human respiratory system cancer risk: Lack of evidence persists since 2001. IARC re-evaluation. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 60: 84-92.
- Martínez Morán, O.; Otero, M.; Calvo, L.F.; Díez, C.; Sánchez, M.E.; Gómez, X. (2004). Valoración energética de neumáticos fuera de uso. *Mapfre Seguridad.* 93:43-51.
- Mastral, A.M.; Murillo, R.; Callen, M.S.; Garcia, T.; Snape, C.E. (2000). Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor. *Energy Fuels.* 14:739-744.
- Maxim, L.D.; Eastes, W.; Hadley, J.G.; Carter, C.M.; Reynolds, J.W.; Nieboa, R. (2003). Fiber glass and rock/slag wool exposure of professional and do-it-yourself installers. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 37:28-44.

Mechel, F.P. (1976). Ausweitung der Absorberformel von Delany and Bazley zu Tiefen Frequenzen. *Acustica*. 35:210-13.

Mechel, F.P. (2002). *Formulas of acoustics*. Springer. London.

Miki, Y. (1990a). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Modifications of Delany&Bazley models. *J. Acoust. Soc. Jpn.* 11:19- 24.

Miki, Y. (1990b). Acoustical properties of porous materials-Generalizations of empirical models. *J. Acoust. Soc. Jpn.* 11:25-28.

Miraftab, M.; Horrocks, R.; Woods, C. (1999). Carpet waste, an expensive luxury we must do without. *Autex Res. J.* 1:1-7.

Montero, G.; Cañellas, I. (2003). Selvicultura de los alcornocales en España. *Silva Lusitana*. 11:1-19.

Morse, P.M. (1952). Acoustic Propagation in Granular Media. *J. Acoust. Soc. Am.* 24:696-700.

Morse, P.M.; Ingard, K.U. (1968). *Theoretical acoustics*. McGraw-Hill, Inc. New York.

Neithalath, N.; Weiss, J.; Olek, J. (2004). Acoustic performance and damping behaviour of cellulose-cement composites. *Cem. Concr. Compos.* 26:359-70.

Neves, A.; Antonio, J.; Nossa, A. (2008). Resultados Experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes. En Resúmenes del *Congreso Nacional de Acústica. Tecniacústica 2008*. Coimbra. Portugal.

Oldham, D.J.; Egan, C.A.; Cookson, R.D. (2011). Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Appl. Acoust.* 72:350-363.

OMS (Organización Mundial de la Salud). (2011). Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. Geneva.

Optiroc Áridos Ligeros SA (2000) Expanded clay. In: *Arlita. Expanded clay. General Manual*. Madrid.5-29.

Paje, S.E.; Bueno, M.; Terán, F.; Miró, R.; Pérez-Jiménez, F.; Martínez, A.H. (2010). Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. *Appl. Acoust.* 71:578-582.

Parejo, F.M. (2009). El negocio de exportación corchera en España y Portugal durante el siglo XX: cambios e intervención pública. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura.

Pereira, H. (2007). *Cork: biology, production and uses*. Elsevier, Amsterdam.

Pfretzschner, J.; Rodríguez, R.M. (1999). Acoustic properties of rubber crumbs. *Polym. Test.* 18:81-92.

Pritz, T. (1996) Dynamic Young's Modulus and Loss Factor of Floor Covering Materials. *Appl. Acoust.* 49:179-190.

Ramis, J.; Alba, J.; del Rey, R.; Escuder, E.; Sanchís, V.J. (2010). Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf. *Mater. Const.* 299:133-143.

Rasmussen, B.; Rindel, J.H. (2010). Sound insulation between dwellings - Descriptors applied in building regulations in Europe. *Appl. Acoust.* 71:171-180.

Ray, A.; Sriravindrarajah, R.; Guerbois, J.P.; Thomas, P.; Border, S.; Ray, H.; Haggman, J.; Joyce, P. (2007). Evaluation of waste perlite fines in the production of construction materials. *J. Therm. Anal. Cal.* 88:279-283.

Recuero, M. (2001). *Acondicionamiento acústico*. Ed. Paraninfo. Madrid.

Ren, M.; Jacobsen, F. (1993). A Method of Measuring the Dynamic Flow Resistance and Reactance of Porous Materials. *Appl. Acoust.* 39:265-276.

Rodríguez Montejano, R.M. (2004). Propiedades acústicas de caucho granular. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Rushforth, I.M.; Horoshenkov, K.V.; Miraftab, M.; Swift, M.J. (2005). Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Appl. Acoust.* 66:731-749.

Salissou, Y.; Panneton, R. (2007). Pressure/mass method to measure open porosity of porous solids. *J. Appl. Phys.* 101:124913.

Schiavi, A.; Belli, A.P.; Russo, F. (2005). Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. *Build. Acoust.* 12: 99-113.

Schiavi, A.; Belli, A.P.; Russo, F.; Corallo, M. (2007a). Acoustical and mechanical characterization of an innovative expanded sintered elasticized polystyrene (EPS-E) used as underlayer in floating floors. En Proceedings of 19th International Congress on Acoustics, 2007. Madrid. España.

Schiavi, A.; Belli, A.P.; Corallo, M.; Russo, F. (2007b). Acoustical performance characterization of resilient materials used under floating floors in dwellings. *Acta Acust. United Acust.* 93:477-85.

Sebaa, N.; Fellah, Z.E.A, Fellah, M.; Lauriks, W.; Depollier, C. (2005). Measuring flow resistivity of porous material via acoustic reflected waves. *J. Appl. Phys.* 98:084901-084911.

Sgard, F.C.; Olny, X.; Atalla, N.; Castel, F. (2005). On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Appl. Acoust.* 66:625-651.

Shebl, S.S.; Seddeq, H.S.; Aglan, H.A. (2011). Effect of micro-silica loading on the mechanical and acoustic properties of cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 25:3903-3908.

Simón, F.; Anthony, K.; Fernández, M.J. (2006). Estudio de cinco métodos para determinar las propiedades dinámicas de capas elásticas para la mejora del aislamiento a ruido de impactos. En Resúmenes del Congreso Nacional de Acústica. *Tecniacústica 2006*, Gandia. España.

Smith, P.G.; Greenkorn, R.A. (1972). Theory of acoustical wave propagation in porous media. *J. Acoust. Soc. Am.* 52:247-250.

Stewart, M.; Craik, R. (2000). Impact sound transmission through a floating floor on a concrete slab. *Appl. Acoust.* 59:353-72.

Stinson, R. y Daigle, A. (1988). Electronic system for the measurement of flow resistance. *J. Acoust. Soc. Am.* 83:2422-2428.

Strutt, Lord Rayleigh, J.W. (1877). *The Theory of Sound* (2 vol). Dover Publications. 2ª edición 1945. New York.

Sun-II, C.; Ho-Hwan, C. (2008). Insertion loss prediction of floating floors used in ship cabins. *Appl. Acoust.* 69:913-920.

Swift, M.J.; Bris, P.; Horoshenkov, K.V. (1999). Acoustic absorption in recycled rubber granulates. *Appl. Acoust.* 57:203-212.

Taraldsen, G. (2005). The Delany-Bazley impedance model and Darcy's Law. *Acust. United Acta Acust.* 91:41-50.

Taraldsen, G.; Jonasson, H. (2011). Aspects of ground effect modelling, *J. Acoust. Soc. Am.* 129:47-53.

Taylor, A. (2004). *Novel underlays from carpet waste*. Tesis doctoral. Universidad de Bolton.

Thomasson, S.I. (1977). Sound propagation above a layer with a large refractive index. *J. Acoust. Soc. Am.* 61:659-674.

Torres, M.L.; García-Ruiz, P.A. (2009). Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cem. Concr. Compos.* 31:114-119.

Umnova, O.; Attenborough, K.; Li, K.M. (2000). Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres. *J. Acoust. Soc. Am.* 107:3113-3119.

Umnova, O.; Attenborough, K.; Shin, H-C.; Cummings, A. (2005). Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Appl. Acoust.* 66:607-624.

UNE EN ISO 140-3. (1995). Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del

aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción. AENOR. Madrid, 32 pp.

UNE EN ISO 140-8. (1998). Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 8: Medición en laboratorio de la reducción del ruido de impactos transmitido a través de revestimientos de suelos sobre forjado normalizado pesado. (ISO 140-8:1997). AENOR. Madrid, 22 pp.

UNE EN ISO 354. (2004). Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003). AENOR. Madrid, 28 pp.

UNE EN ISO 717-2. (2007). Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos. Modificación 1 (ISO 717-2:1996/AM 1:2006). AENOR. Madrid, 12 pp.

UNE EN ISO 10534-2. (2002). Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998). AENOR. Madrid, 36 pp.

UNE EN 12354-2. (2001). Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos. AENOR. Madrid, 36 pp.

UNE EN 12431. (2013). Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del espesor de los productos de aislamiento de suelos flotantes. AENOR. Madrid, 12 pp.

UNE EN 29052-1. (1994). Acústica. Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1: materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas. (ISO 9052-1:1989). (Versión oficial EN 29052-1:1992). AENOR. Madrid, 14 pp.

UNE EN 29053. (1994). Acústica. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire. (ISO 9053:1991). AENOR. Madrid, 16 pp.

Vasina, M.; Hughes, D.C.; Horoshenkov, K.V.; Lapčík Jr, L. (2006). The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl. Acoust.* 67:787-96.

Vigran, T.E. (2008). *Building acoustics*. Taylor & Francis. London.

Voronina, N. (1994). Acoustic properties of fibrous materials. *Appl. Acoust.* 42:165-174.

Voronina, N. (1996). Improved empirical model of sound propagation through fibrous materials. *Appl. Acoust.* 48:121-132.

Voronina, N. (1997). An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity. *Appl. Acoust.* 51:181-198

Voronina, N. (1999). An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity. *Appl. Acoust.* 58:295-304.

Voronina, N.; Horoshenkov, K.V. (2003). A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media. *Appl. Acoust.* 64:415-432.

Voronina, N.; Horoshenkov, K.V. (2004). Acoustical properties of unconsolidated granular mixes. *Appl. Acoust.* 65:673-691.

Washburn, E.W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 7:115-116.

Webb, P.; Orr, C. (1997). *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. Micromeritics, London.

Wu, Q. (1988). Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open cell foam. *Appl. Acoust.* 25:141-149.

Wu, Y.F. (2009). The structural behaviour and design methodology for a new building system consisting of glass fiber reinforced gypsum panels. *Constr. Build. Mater.* 23:2905-2913.

Xiang, S.; Baoshan, H. (2013). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Constr. Build. Mater.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>.

Yamamoto, T.; Turgut, A. (1988). Acoustic wave propagation through porous media with arbitrary pore size distributions. *J. Acoust. Soc. Am.* 83:1744-1751.

Zhou, H.; Li, B.; Huang, G.; He, J. (2007). A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J. Sound Vib.* 304:400-406.

Zwikker, C.; Kosten, C.W. (1949). *Sound Absorbing Materials*. Elsevier Pub. Co. New York.

ANEXOS



A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs)

Rubén Maderuelo-Sanz^{a,*}, Antonio V. Nadal-Gisbert^b, José E. Crespo-Amorós^b, Francisco Parres-García^b

^a Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción, INTROMAC, Campus Universidad de Extremadura, 10071 Cáceres, Spain

^b Universidad Politécnica de Valencia, E.P.S.A., Campus d'Alcoi, 03801 Alcoi, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 July 2010

Received in revised form 26 November 2011

Accepted 1 December 2011

Available online 22 December 2011

Keywords:

Recycled

Fibers

Tires

Fluff

Sound absorber

Acoustic properties

Perforated panel

ABSTRACT

The use of material waste, coming from the fibers of fluff (a textile residue from grounded end of life tires, ELTs), in the manufacture of sound absorber products, can help to combat two different kind of problems, the disposal of this kind of waste and the noise control. This paper presents the results of a new absorber material obtained through thermal compression, using a residue that is currently used for its high calorific value. Through this process, a product with a higher added value and a lower cost has been obtained. Through testing of samples made with fluff, results for absorption coefficients and acoustic impedance have been obtained. In addition, composite samples have been tested. One of these samples is a composite made with a layer of ground tire rubber (GTR), obtained by sintering and adding another layer of fluff.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Waste management and noise pollution are two problems that need to be solved in developing and developed societies. Solutions that involve the use of new materials to absorb noise or vibration, not only minimize this problem. Besides, the recycling of certain waste and by-product materials into these new materials has become a viable option to be considered in building construction [1,2]. One of the major problems for the environment as well as for public health is the amount of waste tires around the world. These are due to the improvement in the quality of life and the continuous growth in population in a lot of countries that have aggravated the environmental and financial problems around the world [3,4]. The rise of waste tires is due to the increasing demand for tires and because of their short lifetime. Developed countries are starting to generate legislation in order to control noise, both inside and outside residential areas, and waste management.

Moreover, recycling can eliminate a substantial portion of the purchase and disposal costs for new materials. Focusing on efforts to obtain more environmentally respectful new products should be the starting point for environmental sustainability. Therefore, recycling of products from the end of life tires (ELTs), is a pending issue particularly in developed countries [5–9]. Thus, the use of this type

of waste, to obtain a new sound absorbent, could solve two environmental problems, noise and environmental pollution.

The acoustic characterization of fibrous materials has been studied extensively [10–14]. It should be noted the works of Delany and Bazley [10], studying the values of characteristic impedance and propagation coefficient of various kind of fibrous absorbent materials, and Allard et al. [11], studying different predictive models for surface impedance in high frequency range of fibrous materials. On the other hand, Biot [12,13] provides theories about the elastic wave propagation, at low and high frequencies, in porous media containing a compressible fluid, where the fluid and the medium have comparable densities. Bies and Hansen [14] show that the information obtained from the measurement of the flow resistance allows us to characterize the acoustic behavior of the material for common applications.

In the case of acoustic sound absorbent from recycled fibers, it should note the work of Lee and Changwhan [15], where the acoustic absorption coefficients for different mixtures of recycled polyester fibers are obtained with the aim of replacing the conventional materials used for sound insulation. The work of Lou et al. [16] looks at functional sound absorption composites made from blends of polyester and polypropylene Nonwoven Selvage and analyzing the influence of the thickness and density in the sound absorption coefficient.

Some studies have shown that recycled polymeric granulates and fibers, as found in industrial and post-consumer material waste handling processes, may be formed into materials that have desirable acoustic and physical properties [17–20]. These studies

* Corresponding author. Tel.: +34 927181042; fax: +34 927181041.

E-mail addresses: rmaderuelo@intromac.com (R. Maderuelo-Sanz), anadal@mc.upv.es (A.V. Nadal-Gisbert).

Nomenclature

d	pore diameter	t	thickness of panel
I (%)	Impregnation Index	Mp	reactance of perforated panel
k	constant of perforated panel	M_1	reactance of fiber layer
P_h	wet weight	η	dynamic viscosity of air
P_s	dry weight	$\rho_0 c_0$	characteristic impedance of air
Rp	resistance of perforated panel	σ	porosity of perforated panel
R_1	resistance of fiber layer	ω	angular frequency

show that through a better understanding of the materials micro-structure and physical strength parameters and also the influence of the manufacturing process, high performance acoustic materials can be obtained.

In the analysis of models of acoustic behavior, Lee and Chen [21,22] developed a simple, but accurate analytical acoustic transmission analysis (ATA), to evaluate the acoustic absorption of a multilayer acoustic sound absorber. Sugie et al. [23] proposed a method for predicting the sound absorption characteristics of fibrous materials like glass wool, covered with a perforated panel and an impermeable film using the method based on Ingard and Bolt's model [24]. Hong et al. [25] study an acoustic analytical model for a novel composite absorber made with layers of PU and recycled rubber particles.

The purpose of this paper is to show the acoustic properties of materials made from fluff, both with and without resin. We have analyzed the behavior of these composite materials, composed of two layers, one made from recycled rubber particles (GTR), and another made from fluff. The use of perforated panels has been used traditionally as a reflective surface. The addition of a second layer of fibrous material increases sound absorption coefficient.

2. Experimental

2.1. Materials and sample preparation

The main raw material used was the fluff, with different particle sizes, coming from the shredding of tires from heavy vehicles. The fluff has fiber diameters in the range of 20–30 μm . The fiber diameters, in the range of 20–30 μm , were measured by a Mitutoyo digital micrometer (Fig. 1). A minimum of 30 fibers were tested for each sample. This product is composed of an elastomeric nature waste named ground tire rubber (GTR), loose and consolidated, and textile and metal fibers (as steel). The fluff was not previously

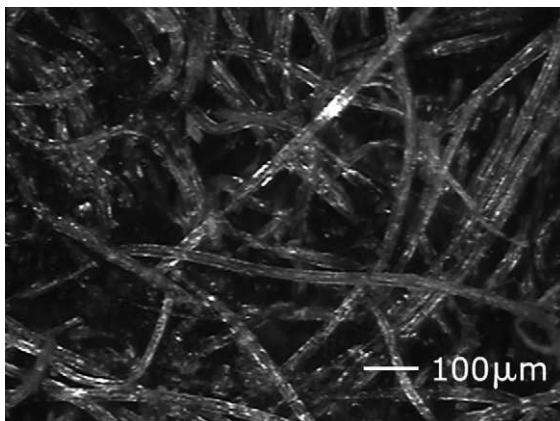


Fig. 1. Fluff from tires with remnants of rubber.

cleaned and it was mixed, in some cases joined, to pieces of rubber and steel that cannot be removed during the separation process. The composition of fluff is showed in Table 1.

The samples have been developed for the analysis of acoustical behavior, both with and without resin. The percentage of resin used in the samples is estimated based on the Impregnation Index by the addition of resin, evaluated by the following equation:

$$I (\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (1)$$

where $I(\%)$ is the Impregnation Index, P_h the wet mass and P_s the wet mass of the sample. The resin used was RESITEX CPS, acrylic resin manufactured by Francotex, used in aqueous solution of 53 g/l.

First of all, for manufacturing the samples, the fluff residue has been sieved for an initial separation of GTR, and subsequently a manual separation of the metal component of higher length. A typical fluff sample is shown in Fig. 1. The samples were obtained through thermal-compression, using a 10 ton press and two male–female casts. $184 \times 169 \times 20 \text{ mm}^3$ and $255 \times 175 \times 70 \text{ mm}^3$ dimension specimens were used. After obtaining the samples with and without resin, the samples have been obtained with a circular drill hole.

The test specimens were circular, 100 mm and 29 mm in diameter, for testing in the impedance tube; the larger is employed for measurements over the range of frequencies from 50 Hz to 1.6 kHz and the latter over the range of frequencies from 500 Hz to 6.4 kHz. Table 2 shows the thermal compression parameters of each sample, resin addition and physical properties.

2.2. Flow resistivity

It is defined by the ratio of the pressure differential across a sample of the material to the normal flow velocity through the material. The flow resistivity is determined by the porosity and pore size, and the latter is dependent on the size and shape of the fibers.

There are several empirical and semi-empirical equations in the literature that can be used to estimate the flow resistivity of fibrous absorbers based upon fiber radius and material porosity or the bulk density of the materials [26,14,27]. Eq. (2) for predicting the flow resistivity of the samples for this work is given by Mechel [26]. This equation relates to fiber diameters from 20 to 30 μm .

Table 1
Composition of fluff (mean values in weight).

Material	Percentage
Ground tire rubber (GTR)	72.4
Fibers	27.2
Steel (strands)	0.1
Others (carbon black, extender oil, aromatic hydrocarbons)	0.3

Table 2
Properties and manufacturing process of the different samples.

Sample	Thickness (cm)	Density (kg m ⁻³)	Pressure (MPa)	Temperature (°C)	Index impregnation (%)
M-A	0.54	693	0.315	130	80
M-B	0.63	511	0.032	130	80
M-C	0.63	546	0.032	130	0
M-D	0.52	637	0.158	130	80
M-E	2.28	441	0.003	220	80
M-F	1.65	591	0.011	130	0
M-G	1.00	739	0.126	130	80

$$\sigma = \frac{6.8\eta(1-\varepsilon)^{1.296}}{a^2\varepsilon^3} \quad (2)$$

where η is the viscosity of air (equal to 1.84×10^{-5} Pa s), a is the radius of the fibers and ε is the porosity.

2.3. Porosity

The connected porosity was measured non-acoustically using the method of water saturation as is indicated by Vasina et al. [28]. All the samples were dried at 70 °C for 10 days. Subsequently, they were weighed before being wrapped in a thin water-tight film and left under water (the density of water is $\rho_w = 1000$ kg/m³) in a vacuum vessel to saturate. After 24 h they were carefully removed and weighed again. The porosity was computed by $\Omega = V_w/V_s$, where V_w is the volume in the sample occupied by the water and V_s is the total volume of the sample. The volume of water can be found as $V_w = (m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}})/\rho_w$, where m_{wet} and m_{dry} are the wet and the dry mass of the sample, respectively.

2.4. Tortuosity

The tortuosity was measured non-acoustically using the method indicated by Brown [29] based in an electroacoustical analogy. The sample is saturated with a conducting fluid (10% dissolution of CuSO₄, using circular plates of copper as electrodes), and the electrical resistivity (equivalent to the flow resistivity) is then calculated through current and voltage measurements. Let ρ_c and ρ_f be the measured resistivities of the saturated material and the fluid respectively, the tortuosity is then given by the following equation:

$$T = \varepsilon \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (3)$$

2.5. Sound absorption measurement

Acoustic properties have been measured using a two-microphone impedance tube (Brüel & Kjær, type 4206) and two 1/4" Condenser Microphones Type 4187, according to the standard procedure detailed in ISO 10534-2 [30], in the frequency range of 100–6400 Hz. The signals were analysed with a portable Brüel & Kjær PULSE System with four input data channels (type 3560-C). This setup is regularly calibrated. The normalized surface impedance and the absorption coefficient have been achieved.

3. Results and discussion

3.1. Non acoustic properties

Due to the different microstructures of the samples, large differences were observed in their non acoustic properties. This diversity is very interesting because it can provide very different porous microstructures and consequently different acoustical properties.

Table 3
Non acoustic properties of different samples.

Sample	Porosity	Tortuosity	Flow resistivity (Pa s m ⁻²)
M-A	0418	1138	34,549
M-B	0569	1550	11,067
M-C	0544	1480	7780
M-D	0466	1268	23,832
M-E	0630	1716	14,543
M-F	0501	1365	16,538
M-G	0390	1063	14,460

Porosity, tortuosity and flow resistivity have been obtained and these values are shown in Table 3.

During the compression of a fibrous sample, it is well known that the absorption properties are decreasing. Given a porous layer, such compression is followed by a decrease in terms of porosity, and in the same time by an increase of tortuosity and resistivity. The lower value of porosity and higher value of flow resistivity of sample M-A are due to its higher value of compaction pressure. The sample M-E presents the higher value of porosity having the lower value of compaction pressure as we could expect. The variations of the non acoustic properties in the samples M-D and M-G (decrease of the porosity, increase of the resistivity), and in the sample M-B and M-C (increase of the porosity, decrease of the resistivity), not present an increase and decrease of tortuosity respectively. It is due to the fluff. This material was not clean and it was mixed, in some cases joined, to pieces of rubber and steel that cannot be removed during the separation process.

All the samples present an open pore structure in which the pores are interconnected. This is one of the most important factors to noise absorption as such structure increases air flow resistivity and consequently the dissipation of the wave energy in the pores. In these samples, the pore shape and the pore size can differ in many orders of magnitude (Figs. 2 and 3).

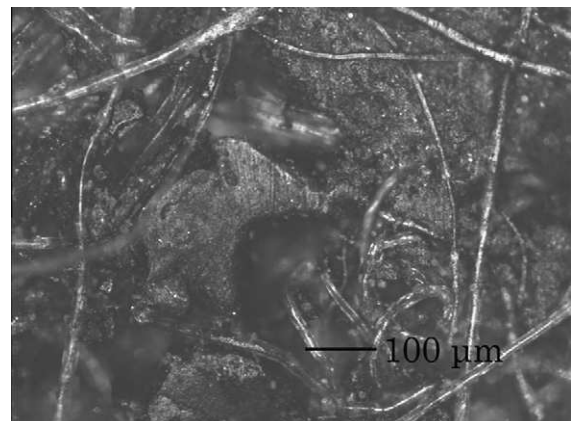


Fig. 2. Microphoto of sample M-G and pore shape, GTR and fiber.

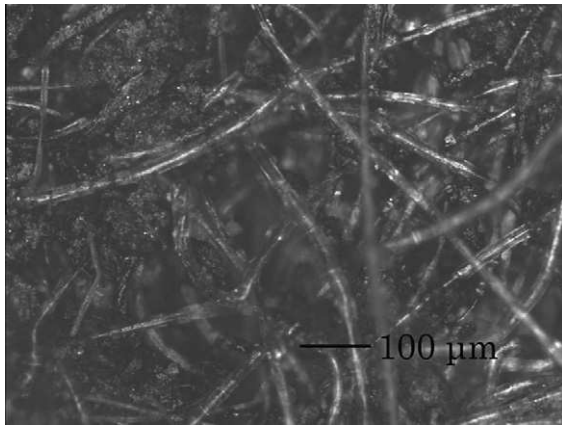


Fig. 3. Microphoto of sample M-E and pore shape, GTR and fiber.

3.2. Acoustical properties of single layer

When a sound wave strikes a porous sound absorber, the sound wave causes the fibers of the absorbing material to vibrate. This vibration causes tiny amounts of heat due to the friction and thus the sound absorption is accomplished by way of energy to heat conversion. The use of a resin results in a reduced porosity, increasing flow resistivity, and a reduced vibration, decreasing the sound absorption coefficient.

Fig. 4 shows the normal sound absorption coefficient spectra for all samples. These results show that the best acoustic performance over the frequency range of interest is obtained for sample M-E. For this material the maximum value of the sound absorption coefficient is 0.99, achieved at 2000 Hz. Samples M-B and M-C present similar performance. Both samples have a different index impregnation (Table 1).

The addition of the resin supposes an increase of the stiffness of the sample M-B. These resins are used in textiles for binding synthetic fibers and its addition reduces the friction between the fibers, reducing heat losses and subsequently, its sound absorption coefficient.

Samples M-A and M-D, present similar physical properties except compaction pressure. Castagnede et al. [31] showed that, compression of fibrous materials decreases the sound absorption properties. Under compression, the various fibers are brought closer from each others (without any change in fiber size). This compression results in a decrease of the thickness. Other physical variation occurs during the compression as increasing the density. Increasing the compression results in a slightly increase in

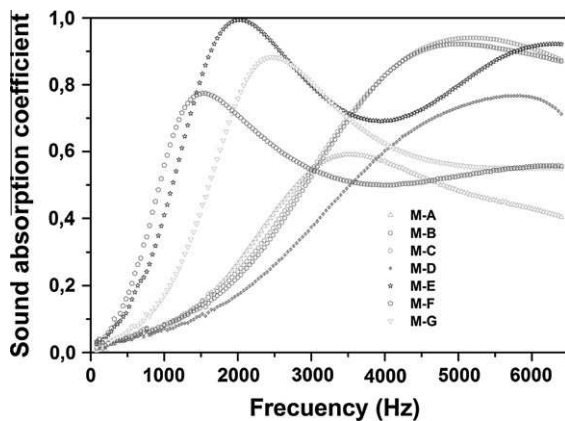


Fig. 4. Absorption coefficient for all samples used in this work.

tortuosity and airflow resistivity, and a decrease of porosity and thermal and viscous characteristic length.

Materials M-F and M-G, present similar acoustic performance. In the case of material M-F, an increased thickness and the absence of resin implies a shift of the maximum absorption coefficient at frequency 1200 Hz. Sample M-G, with reduced thickness and an 80% rate of impregnation, presents a maximum absorption coefficient at frequency of 2500 Hz with a value greater than latter.

Figs. 5 and 6 show, respectively, the real and the imaginary part of acoustic impedance obtained from the different samples. The real part is the resistance associated with energy losses and the imaginary part, the reactance, associated with phase changes. In this case, we can see a better performance of materials M-B, M-C and M-D than other materials studied.

In order to compare with some commercial sound absorbers, four different thickness of glass wool with values, 0.75, 1.05, 1.35 and 2.10 mm, has been tested. The density of the glass wool used was around 120 kg/m^3 , having a fiber diameter ranging from 8 to $12 \mu\text{m}$.

Fig. 7 shows the normal sound absorption coefficient for the samples with similar thickness of glass wool and the samples M-C, M-E, M-F and M-G, used in this work. These results show that the best acoustic performance for the glass wool is for the sample GW-210. This sample has a thickness of 2.10 cm. The sample M-E has a similar thickness than this last sample and its acoustic performance is better than the sample GW-210. Samples GW-75 and M-C, have similar acoustic performance, and their absorption maximum are over the frequency range of interest.

3.3. Acoustical properties of double layer structures

To evaluate the effect of structures composed of materials made of two layers, we proceeded to study three types of samples composed of materials M-F-B (M-F + M-B), M-B-D (M-B + M-D) and M-E-D (M-E + M-D) and compared with the absorption coefficients of the samples individually.

The sound absorption coefficient of the sample M-B-D was increased at frequencies ranging between 0 and 4000 Hz. In the samples M-D-E and M-B-F, the absorption maximum appears at 1000 Hz. In general, the absorption maximum shifts to lower frequencies (Figs. 8–10).

We must emphasize that in these double layer structures, the layer that is in the front of the structure is the predominant layer in the acoustic performance of the double layer structure. This displacement of the absorption maximum to lower frequencies is only due to the increasing in the thickness of the sample.

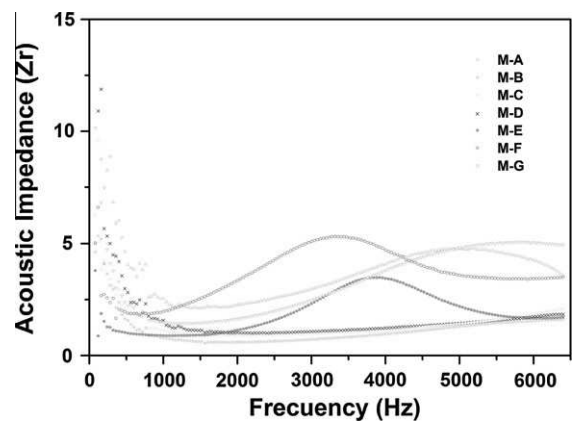


Fig. 5. Real part of acoustic impedance for all samples used in this work.

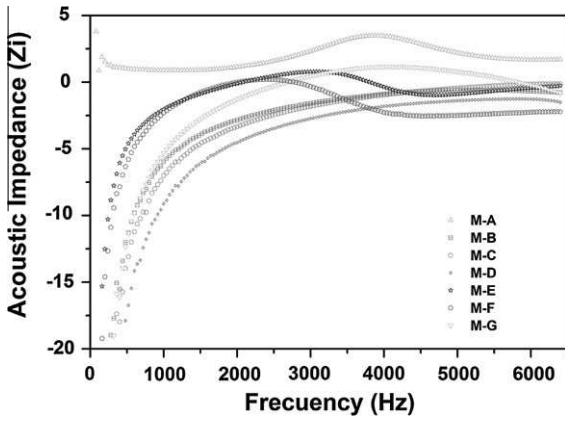


Fig. 6. Imaginary part of acoustic impedance for all samples used in this work.

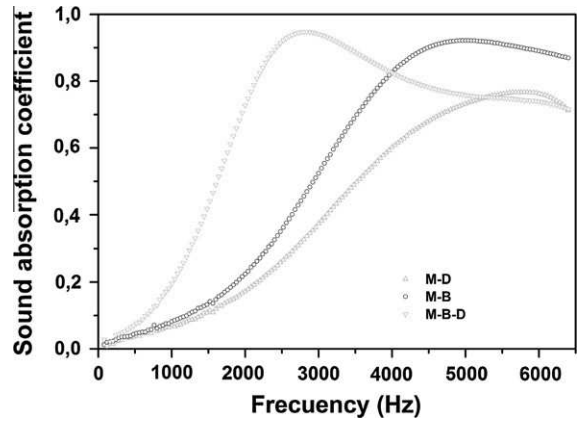


Fig. 9. Acoustic absorption of double layer structures of material M-E-D.

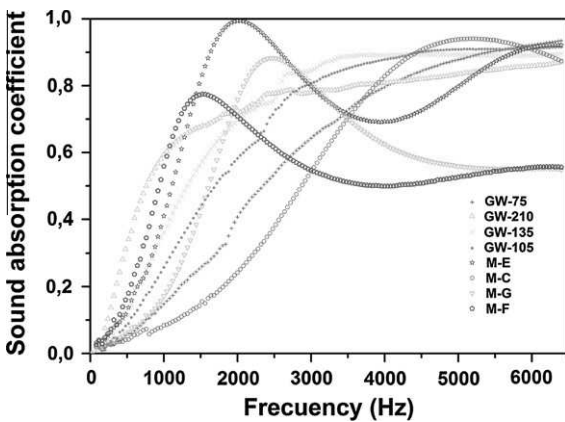


Fig. 7. Absorption coefficient for the novel sound absorber and fiberglass.

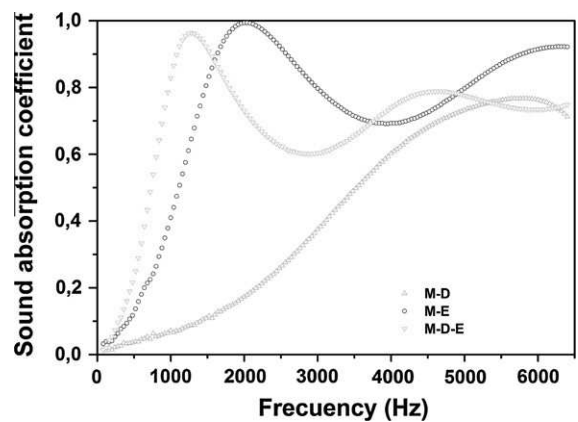


Fig. 10. Acoustic absorption of double layer structures of material M-B-D.

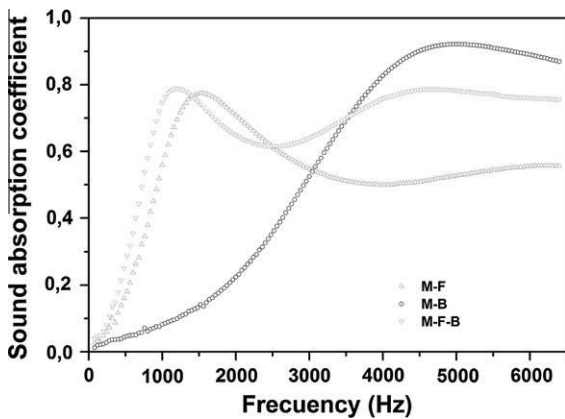


Fig. 8. Acoustic absorption of double layer structures of material M-F-B.

3.4. Acoustical properties of composite sound absorber

To further improve the acoustic characteristics further of the sound absorber, a perforated plate design can be used in the construction of the panels. The porosity, pore size and thickness of the perforated panel and the density of the fibrous material would considerably change the surface acoustic impedance and the sound absorption coefficient of the acoustic absorber. A composite structure with a combination of the perforated panel and the fibrous absorber shows good sound attenuation.

In this work, one perforated panel was modeled with two fibrous layer; M-E and M-G. The perforated plate was providing

using GTR, sintering at 220 °C. The porosity of the perforated panel was 17.12%, the thickness of panel was 3 mm, the pore diameter was 4 mm and the thickness of the fibrous layer was 22.8 mm for M-E and 4.0 mm for M-G.

The effect of the perforated plate on the sound acoustic absorption is shown in Fig. 11, compared with the fibrous layer without perforated panel. The perforated panel will shift the absorption coefficient peak a lower frequency range and the sound absorption coefficient will decrease in high frequency. For M-E, maximum

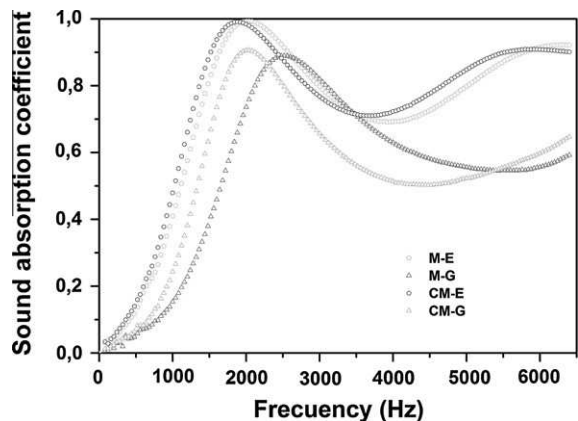


Fig. 11. Acoustic absorption of samples M-E and M-G, compared with fibrous layer without perforated panel.

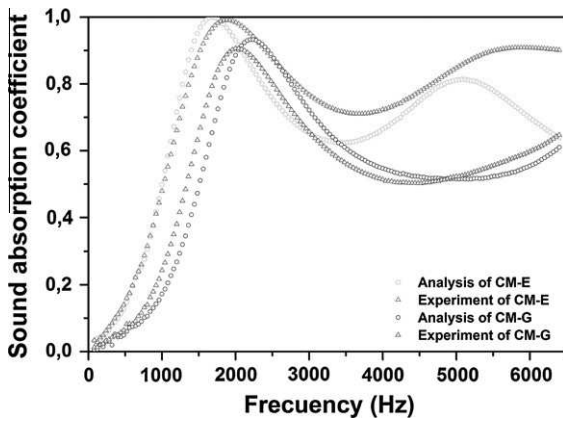


Fig. 12. Comparison of the acoustic absorption coefficient, analysis and experimental, for the composite absorber CM-E and CM-G.

displacement of the absorption is very small, around 200 Hz while for M-G, this displacement is 500 Hz.

Fibrous material would distinctly promote the acoustic absorption and shift the acoustic resonance frequencies to lower frequency bands. The experiment using a perforated panel gives a better result than the experiment without the plate.

The acoustic absorption coefficient for this type of composite absorbers can be obtained from the resultant acoustic impedance of the fibrous absorber [25] as we can see in the following relationships:

$$\alpha_n = \frac{4\rho_0 c_0 (R_p + R_1)}{(\rho_0 c_0 + R_p + R_1)^2 + (\omega M_p + M_1)^2} = \frac{4(r_p + r_1)}{(1 + r_p + r_1)^2 + (\omega m_p + m_1)^2} \quad (4)$$

$$r_p = \frac{32\eta t}{\varepsilon \rho_0 c_0 d^2} \sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} \quad (5)$$

$$\omega m_p = \frac{\omega t}{\sigma c_0} \left(1 + \left(3^2 + \frac{k^2}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right) \quad (6)$$

$$k = d \sqrt{\omega \rho_0 / 4\eta} \quad (7)$$

where $\rho_0 c_0$ is characteristic impedance of air; k is the constant of perforated panel, $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $c_0 = 340 \text{ m/s}$, $\eta = 1.85 \times 10^{-5} \text{ kg/s/m}$, R_p , R_1 , M_p and M_1 are, respectively, resistance and reactance of perforated panel and the fibrous. As the porosity of perforated panel ε (%), the thickness of panel t (mm), pore size d (mm) and sound frequency f are known. The surface impedance of the fibrous layer can be obtained by impedance tube.

Fig. 12 shows that the result obtained by this model well expresses the trend in measured frequency characteristic for CM-G. A good agreement between the experimental result and the prediction is observed in the absorption coefficient. The maximum value of the sound absorption coefficient of 0.90 is achieved at 2040 Hz for experimental results and 0.93 for 2200 Hz in the case of theory. For M-E there is a good agreement between the experimental result and the prediction until 2000 Hz. For higher frequencies the results are not good. The sound absorption coefficient, at lower frequency, is shown clearly though at higher frequency the difference increases due to the perforated panel.

4. Conclusions

The results from the experimental values show that this type of waste has good acoustic properties at low and high frequencies and can be used as an alternative replacement for a synthetic based commercial product. This innovative sound absorption panel has a positive future as it is cheaper and environmentally compared to the glass wool and other mineral based synthetic materials.

Usually, the compression is followed by a decrease in terms of porosity, and in the same time by an increase of tortuosity and resistivity and when the fibrous sample experiences a compression, the absorption coefficient has a strong decrease, which is somewhat due to a thickness effect but for this type of waste is not always due to the presence of rubber in its composition.

In general we can see a decrease of the absorption coefficient with increasing pressure and increases with the thickness. The resin increases the rigidity of the product and decreases the absorption coefficient. The thickness increases the absorption at low frequencies. The resin increases stiffness and decreases the absorption coefficient and the degree of compression increasing the tortuosity and the flow resistance as well. The best results for the absorption at low frequencies were obtained with samples M-F and M-E, while the best results for absorption coefficients at high frequencies were obtained with the samples M-C and M-B.

These results show a novel kind of sound absorption materials with high performance and smaller thickness and that with the recycling of this type of waste materials sound absorbers can be obtained and solve two environmental problems, noise and environmental pollution. These new materials have become a viable option to be considered in building construction.

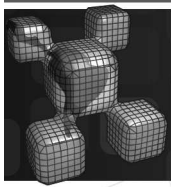
Acknowledgements

This work has been supported by the Polytechnic University of Valencia, Spain, in the program of Research Support and Development (PAID UPV-05-2009) to draft new Multidisciplinary Research Interests (Registration No. 4284).

References

- [1] Rushforth IM, Horoshenkov KV, Mirafab M, Swift MJ. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Appl Acoust* 2005;66:731–49.
- [2] Maderuelo-Sanz R et al. The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. *Appl Acoust* 2011;72:823–8.
- [3] Barrigón-Morillas JM, Gómez-Escobar V, Rey-Gozalo G, Vilchez-Gómez R. Possible relation of noise levels in streets to the population of the municipalities in which they are located. *J Acoust Soc Am* 2010;128:86–92.
- [4] Santini A, Morselli L, Passarini F, Vassura I, Di Carlo S, Bonino F. End-of-life vehicles management: Italian material and energy recovery efficiency. *Waste Manage* 2011;31:489–94.
- [5] Ferrer G. The economics of tire remanufacturing. *Resour Conserv Recycl* 1997;19(4):221–5.
- [6] Adhikari B, De D, Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber. *Prog Polym Sci* 2000;25(7):909–48.
- [7] Fang Y, Maosensheng Z, Wang Y. The status of recycling of waste rubber. *Mater Des* 2001;22(2):123–8.
- [8] Sunthonpagasit N, Duffey MR. Scrap tires to crumb rubber: feasibility analysis for processing facilities. *Resour Conserv Recycl* 2004;40(4):281–99.
- [9] Hyun J, Sung C, Yong S, Woo K. Status of recycling end-of-life vehicles and efforts to reduce automobile shredder residues in Korea. *J Mater Cycles Waste Manage* 2007;9(2):159–66.
- [10] Delany ME, Bazley EN. Acoustic properties of fibrous absorbent material. *Appl Acoust* 1970;3:105–16.
- [11] Allard JF, Herzog P, Lafarge D, Tamura M. Recent topics concerning the acoustics of fibrous and porous materials. *Appl Acoust* 1993;39:3–21.
- [12] Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *J Acoust Soc Am* 1956;28:168–78.
- [13] Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *J Acoust Soc Am* 1956;28:179–91.
- [14] Bies DA, Hansen CH. Flow resistance information for acoustical design. *Appl Acoust* 1980;13:357–91.
- [15] Lee Y, Changwhan J. Sound absorption properties of recycled polyester. Fibrous assembly absorbers. *Autex Res J* 2003;3:78–84.

- [16] Lou CW, Lin JH, Su KH. Recycling polyester and polypropylene nonwoven selvages to produce functional sound absorption composites. *Text Res J* 2005;75(5):390–4.
- [17] Vitamvasova E, Vasult S, Gerza D, Bris P. A noise and vibration protection by mixed polymer waste. *Proc Internoise 1996*;96:1835–9.
- [18] Swift MJ, Bris P, Horoshenkov KV. Acoustic absorption in recycled rubber granulates. *Appl Acoust* 1999;57:203–12.
- [19] Swift MJ, Horoshenkov KV. Acoustic and physical properties of recycled granular foams. In: CDROM proceedings of the eurnoise 2001 conference, Patras, Greece; 2001.
- [20] Swift MJ. The physical properties of porous recycled materials. PhD thesis, University of Bradford; December, 2000.
- [21] Lee FC, Chen WH. Acoustic transmission analysis of multi-layer absorbers. *J Sound Vib* 2001;248:621–34.
- [22] Lee FC, Chen WH. On the acoustic absorption of multi-layer absorbers with different inner structures. *J Sound Vib* 2003;259:761–77.
- [23] Sugie S, Yoshimura J, Ogawa H. Absorption characteristics of fibrous material covered with perforated facing and film. *Acoust Sci Technol* 2006;27(2):87–96.
- [24] Ingard U, Bolt RH. Absorption characteristics of acoustic material with perforated facings. *J Acoust Soc Am* 1951;23:533–40.
- [25] Hong Z, Bo L, Guangsu H, Jia H. A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J Sound Vib* 2007;304:400–6.
- [26] Mechel FP. *Formulas of acoustics*. Springer; 2002.
- [27] Garai M, Pompoli F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Appl Acoust* 2005;66(12):1383–98.
- [28] Vasina M, Hughes DC, Horoshenkov KV, Lapcik Jr L. The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl Acoust* 2006;67:787–96.
- [29] Brown JS. Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling factors in Biot's equations for acoustic waves in fluid-filled porous media. *Geophysics* 1980;45(8):1269–75.
- [30] ISO 10534-2. Acoustics: determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: transfer-function method; 1998.
- [31] Castagnede B, Aknine A, Brouard B, Tarnow V. Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. *Appl Acoust* 2000;61:173–82.



Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin

Abstract

This paper reports an investigation of a new kind of material and its acoustical performance. The main component of this porous absorber is the ground tyre rubber (GTR) with different particle sizes, from the shredding of tyres of heavy vehicles, mixed with different proportion of polyurethane resin. Acoustical properties were assessed according to ISO 10534-2: 1998. The data obtained show porous absorbers having a high sound absorption performance with low thicknesses and compared to some of the current models for the prediction of their absorptive properties. The use of this model constitutes a good tool in order to design a new sound absorber to solve two environmental problems, noise and environmental pollution.

Keywords

Sound absorber; Recycler rubber; Acoustical properties; Impedance tube; Impedance measurement.

**Rubén Maderuelo-Sanz ^{*a},
Juan Miguel Barrigón Mori-
llas^b, Manuel Martín-Castizo^a,
Valentín Gómez Escobar^b and
Guillermo Rey Gozalo^b**

^a Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción, INTROMAC, Campus Universidad de Extremadura, 10071, Cáceres, Spain,

^b Dpto. de Física Aplicada. Escuela Politécnica. Universidad Extremadura, 10003, Cáceres, Spain

Received 19 Apr 2012

In revised form 30 Nov 2012

* Author email: rmaderuelo@intromac.com

1 INTRODUCTION

The improvement on the human quality of life and the continuous growth in population in developing and developed societies, have exacerbated the environmental and financial problems. Some of these problems are noise and the different types of human and industrial wastes.

There have been numerous studies concerning noise, its sources, pollution levels, effects, human health, etc., over the last years, and the topic is still of medical and scientific interest as shown by the different studies published in recent years like in Zannin et al. (2002), Murphy and King (2011), Barrigón-Morillas et al. (2010) and Jakovljevic et al. (2009). In the case of industrial wastes, in the last years disposal of scrap tyres has become one of the major environmental problems. The European Tyre Recycling Association, ETRA, showed in Tyre Technology International – Trends in Tyre Recycling (2006) that over 3 million tons of waste tyres are generated in the United States and Li et al. (2010) that 5.2 million tons are generated in China each year.

The amount of waste tyres is increasing due to the highest demand for tyres and their short lifetime. It is therefore necessary to improve or to develop certain process or applications for recy-

cling waste tyres. Li et al. (2010) show that nowadays there are many methods to treat and to re-use end of life tyres (ELTs): retreading; ambient grinding; dynamic devulcanization; pyrolysis and tyre oil extraction. Other option is the material recovery; at this aim, a waste tyres shredding process, generally followed by an electromagnetic separation allows to recycle both rubber particles and steel fibres. For example, Aiello et al. (2009) show that the use of steel fibres from waste tyres as reinforcement in concrete has shown interesting potentiality, because of their ability to improve the mechanical performances of the concrete similarly to industrial steel fibres.

Other types of uses are associated to acoustical researches as show the work of Oldham et al. (2011). There are currently a lot of researches interested in developing sustainable absorbers from recycled materials such as crumb rubber. The use of this type of waste to produce sound absorbers or resilient underlays could solve two environmental problems, noise and environmental pollution.

Some studies have proposed to use recycled tyres to provide alternatives to existing products in a great number of environmental noise control applications. Recent studies from different authors have shown that recycled polymeric granulates from the recycling of products from end of life tyres may be formed into materials that have desirable acoustical properties. Pfretzschner and Rodríguez (1999) and Rodríguez Montejano (2004) verified that rubber crumbs can be a good sound absorber with a broadband absorption spectrum, being an excellent alternative to the current absorbent screens used for the protection against traffic noise, contributing at the same time to eliminate scrap tires. Swift et al. (1999) found that these materials can effectively absorb sound if the size of the aggregate and the binder content are carefully selected and its thickness is tuned to the frequency range of interest. Hong et al. (2007) showed that a new sound absorber with recycled rubber particles presents good attenuation properties as sound energy attenuation layer including low-cost, broad-band sound absorption, thin in thickness and relatively simple processing. Another study conducted by Jimenez-Espadafor et al. (2011) suggested that the waste tyre textile (fluff) could be mixed in the same proportion with hot melt adhesive to produce a real acoustic ceiling tile with a very high absorption coefficient. Horoshenkov and Swift (2000) showed that the application of the binder has considerable effect on the acoustical properties of the rubber granular mix. In the case of improvements on the traffic noise, Paje et al. (2010) showed that the acoustical performance of pavement surfaces made from bituminous mixtures, fabricated with recycled tyres (incorporating crumb rubber as aggregate), managed to reduce the noise reduction up to 2 dB(A) and Han et al. (2008) verified that crumb rubber blends present a potentially viable alternative to current concrete highway noise barriers.

In the case of impact sound insulation, the works of Maderuelo et al. (2011) and Rushforth et al. (2005) showed that the underlays, made from recycled rubber fluff or produced using the optimum grain/fibre ratio, respectively, presented excellent sound insulation performance in impact loading comparables with some commercial products.

The purpose of this paper is to experimentally investigate the acoustical properties of new porous absorbers made from granulated rubber from automotive tyres and to use the experimental results obtained in the laboratory, using an impedance tube, to develop a new sound absorber. This granulated rubber from automotive tyres can be mixed in different conditions, binder or adhesive content, to obtain an improvement in the sound absorption coefficient of these sound absorbers.

Subsequently, a comparison with some of the current models for predicting their performance was conducted.

2 MODELLING OF THE MATERIALS

Many models have been developed to describe wave propagation in porous materials and are used to predict the acoustical performance of air saturated sound absorbing porous media. Some of these models, based on the assumption of rigid frame media, describe the physical phenomena that govern the energy dissipation in the porous media. These models have some non acoustical parameters, porosity, tortuosity, flow resistivity, etc. that can be obtained with non-acoustically methods. In these models two complex quantities, the equivalent dynamic bulk modulus and the equivalent dynamic density describe the acoustical properties of the porous absorber. The mechanisms of absorbing sound inside the porous media are the energy dissipated due to the heat exchange and the viscous friction in the effective fluid in the porous structure. The equivalent dynamic density treats the visco-inertial dissipation in the media and the equivalent dynamic bulk modulus takes into account the thermal dissipation effects.

The theoretical model proposed by Champoux and Stinson (1992) shows the best approximations between experimental and theoretical results in this type of material as shows the work of Pfretzschner and Rodríguez (1999). This model involves the flow resistivity, porosity, tortuosity and two shape factors by comparing predicted behaviour to experimentally determined results. Equation (1) is the expression of the dynamic fluid density of rigid frame materials proposed by Biot(1956):

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty - \left(\frac{i \sigma \Omega}{\omega} \right) \cdot F(\lambda_p) \tag{1}$$

where ρ_0 is the density of the air, α_∞ is the tortuosity, Ω the porosity, ω is the angular frequency where:

$$F(\lambda_p) = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda_p \sqrt{-i} \cdot T(\lambda_p \sqrt{-i})}{\left[1 - 2T(\lambda_p \sqrt{-i}) / \lambda_p \sqrt{-i} \right]} \tag{2}$$

with

$$\lambda_p = s_p \left(\frac{8 \alpha_\infty \rho_0 \omega}{\sigma \Omega} \right)^{1/2} \tag{3}$$

where $T(\xi) = J_1(\xi) / J_0(\xi)$ is the ratio between Bessel functions of first and zero order.

Eq. (4) shows the equation of the dynamic bulk modulus of the fluid of rigid frame materials proposed by Zwikker and Kosten (1949) used by Champoux and Stinson (1992) in their model:

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\left(1 + \frac{2(\gamma-1)}{N_{pr}^{1/2} \lambda_k \sqrt{-i}} \cdot T(N_{pr}^{1/2} \lambda_k \sqrt{-i})\right)} \quad (4)$$

with:

$$\lambda_k = s_k \left(\frac{8\alpha_\infty \rho_0 \omega}{\sigma \Omega} \right)^{1/2} \quad (5)$$

In the equations (1) to (5), ρ_0 is the density of the air, σ , the flow resistivity, ω , the angular frequency, $i^2 = -1$, γ , the fluid specific heat ratio, N_{Pr} , the Prandtl number of the air, P_0 , the atmospheric pressure and, s_p and s_k are the cross-sectional shape factors of the pore defined by Champoux and Stinson [19].

The sound absorption properties of porous materials are determined by the characteristic impedance $Z_c(\omega)$, the complex wave number $k_c(\omega)$, the surface acoustic impedance Z_s and the absorption coefficient α (Equations 6-9):

$$Z_c(\omega) = \frac{1}{\Omega} \sqrt{\rho(\omega) \cdot K(\omega)} \quad (6)$$

$$k_c(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega) / K(\omega)} \quad (7)$$

$$Z_s = -iZ_c(\omega) \cdot \cot(k_c(\omega)d) \quad (8)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2 \quad (9)$$

where Z_0 is the impedance of the air and d is the thickness of the sample.

3 MATERIALS

In previous work, the works of Maderuelo et al. (2011) and Rushforth et al. (2005) demonstrated that elastomeric waste, called ground tyre rubber, can be recycled into acoustical underlay products that can adequately compete with commercially available acoustical products and, in some cases, having better performance than conventional layers in terms of their acoustical properties. Those

types of samples have been tested as a new sound absorber, using recycled rubber particles with different proportion of binder.

The main raw material used for this work was the ground tyre rubber, with different particle sizes, coming from the shredding of tyres from vehicles. Other materials used in the samples were vermiculite and expanded polystyrene (EPS) as it can see in Figure 1.

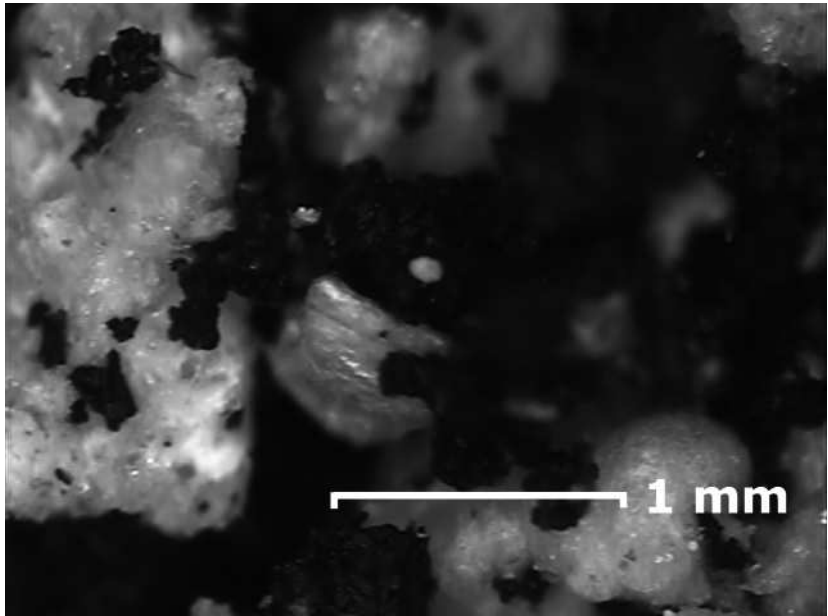


Figure 1 Microphoto of sample M-1 obtained with Mitutoyo Vision Machine. Particle of rubber, EPS and vermiculite can be observed.

A high viscosity polyurethane resin (SikaBond T53 manufactured by Sika), in a range of proportions of 5-25%, was used as a binder to mix these materials. This kind of resin was used because of its high viscosity. The use of binders with low viscosity is not recommended because they reduce the porosity and make it very difficult to mix the rubber fluff with the binder efficiently. Table 1 shows the formulations of the new sound absorbers samples with their physical properties.

Table 1 Properties of recycled porous absorbers.

Sample	GTR Grain Size (mm)	Sample Components	Density (kg/m ³)	Binder Concentration (%)	Thickness A (mm)	Thickness B (mm)
M-1	< 2.0	GTR/Vermiculite/EPS	408.7	5	14.0	26.5
M-2	< 3.5	GTR (75%)	526.6	25	14.0	28.5
M-3	0.5 – 1.0	GTR (80%)	559.8	20	16.0	30.0
M-4	1.0 – 3.0	GTR (88%)	547.6	12	16.5	29.5
M-5	1.0 – 3.0	GTR (84%)	554.7	16	17.0	31.5
M-6	0.5 – 1.0	GTR (84%)	594.6	16	14.0	29.0
M-7	< 0.5	GTR (80%)	520.0	20	17.5	32.5

The manufacturing process is easy, all components were mixed in their respective proportions, as shown in Table 1, in the temperature range of 20-30 °C and this mixture was applied with an airless gun with a special tip, cited by Maderuelo-Sanz et al. (2011). The test specimens were circular, with two different thicknesses for each sample (29 and 100 mm in diameter).

4 EXPERIMENTAL METHODOLOGY

4.1 Physical properties

Porosity

Porous materials with open cells consist of an elastic or rigid frame which is surrounded by air. The porosity, Ω , is the ratio of the air volume, inside the sample, to the total volume, occupied by the porous material.

The connected porosity was measured non-acoustically using the method of water saturation as indicated by Vasina et al. (2006). All samples were dried at 50 °C for 30 days. Then, they were weighed before being wrapped in a thin water-tight film and left under water (the density of water is $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) in a vacuum vessel to saturate. After 24 h, they were carefully removed and weighed again. The porosity was computed by the equation (10), where V_w is the volume in the sample occupied by the water and V_s is the total volume of the sample. The volume of water can be found as $V_w = (m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}})/\rho_w$, where m_{wet} and m_{dry} are the wet and dry masses of the sample, respectively:

$$\Omega = \frac{V_w}{V_s} \quad (10)$$

Flow resistivity

The flow resistivity is one of the most important defining characteristics and is determined by the porosity and the pore size, being the latter dependent on the size and shape of the grains. There are several empirical and semi-empirical models in technical literature, in order to estimate airflow resistivity on the basis of various parameters, binder concentration, compaction ratio, porosity, etc.

In this work, Equation (11) is used for predicting the flow resistivity of the samples. This expression, used for consolidated elastic rubber granulates, showed previously by Horoshenkov and Swift (2000), show an empirical dependence between the binder concentration and the flow resistivity:

$$\log_{10} \sigma = 3.074\beta + 3.794 \quad (11)$$

where β is the mass binder concentration and $0\% \leq \beta \leq 30\%$.

Tortuosity

The tortuosity α_∞ is an adimensional structural parameters and shows the influence of the internal pore structure on the macroscopic velocity of the fluid flow through the material. It has a value which depends only on the pore geometry, as show Johnson et al. (1982), and the minimum possible value is 1.

The tortuosity was measured non-acoustically using the method indicated by Brown (1980). This method is based in an electroacoustical analogy through the electrical conductivity of a saturating fluid. The porous material is saturated with a conducting fluid (a 10% dissolution of CuSO_4), and the electrical resistivity (equivalent to the flow resistivity) is then calculated through current and voltage measurements (using circular plates of copper as electrodes.) like in Pfretzschner and Rodríguez (1999).

Having ρ_c and ρ_f the measured resistivities of the saturated material and the fluid respectively, the tortuosity is given by the next expression:

$$\alpha_\infty = \Omega \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (12)$$

where porosity, Ω , is the connected porosity of the sample.

4.2 Acoustical properties

To evaluate the acoustical properties of different samples (the surface impedance and sound absorption coefficient), measurements of the sound absorption characteristics were carried out using an impedance tube. The impedance tube measurements are based on the two-microphone transfer-function method according to the standard procedure detailed in ISO 10534-2 (1998) in the frequency range of 100–6400 Hz. Using this method it is possible to obtain fast measurements of normal incident parameters using small samples.

The impedance tube method has a great number of advantages as show Oldham et al. (2011). First, the apparatus itself is small and therefore practical. Secondly, only a small sample is required for the tests, and thirdly it allows the surface impedance to be determined in addition to the absorption coefficient. The disadvantages are first, that the properties are only measured for sound at normal incidence to the sample although it is possible to apply a correction, from the surface impedance values, to obtain an approximate value of the random incidence absorption coefficient. Secondly, uncertainties are introduced when measuring heterogeneous materials as the constitution and pore structure of samples taken from different regions of a large sample may vary considerably. Thirdly, two different tubes, and subsequently two different samples, are required for measurements over a large frequency range.

The measurements were made using the Brüel&Kjær Impedance Tube Kit Type 4206 and two $\frac{1}{4}$ " Condenser Microphones Type 4187. The signals were analyzed with a portable Brüel&Kjær PULSE System with four input data channels (type 3560-C). Sample holders of 100 mm and 29 mm

in diameter are provided; the first is employed for measurements over the range of frequencies from 50 Hz to 1.6 kHz and the latter over the range of frequencies from 500 Hz to 6.4 kHz.

5 RESULTS

5.1 Non-acoustic properties

Large differences were observed in the porosity values due to the different microstructures of the samples. This diversity is very interesting because it can provide very different porous microstructures and consequently different acoustical properties. The porosity is distributed between pores of different sizes (ranging from 1 μm to 1 mm) into and between the particles and in the binder. The values obtained are shown in Table 2.

Table 2 Non acoustic properties of different samples.

Sample	Porosity	Tortuosity	Flow Resistivity (Pa s m^{-2})
M-1	0.617	2.749	8865
M-2	0.600	1.580	36517
M-3	0.360	1.880	25633
M-4	0.535	2.402	14551
M-5	0.472	1.303	19313
M-6	0.589	1.635	19313
M-7	0.310	1.291	25633

With the exception of the samples M-2 and M-6, the porosity decreases when the binder concentration increases. Sample M-1 presented higher values of porosity because of the composition of the composite. Vermiculite and EPS (Figure 1) contributed to the porosity with micropores, and their presence resulted in the increased overall porosity of the granular mix. The GTR grain size, a high proportion of large grains, and the proportion of binder in Sample M-2 determined the value of its porosity. Samples M-3 and M-7 presented a similar porosity attributed to a relatively high proportion of binder and the grain size in the mix. This low porosity is due to the voids between individual grains that were filled by the binder. In the other samples the porosity is similar because, although the proportion of binder is different, sample M-6 has more proportion of binder than the sample M-4, in the latter; the size of the particles in the granular mix is different so the voids are not identical in size and proportion.

The flow resistivity is determined by the porosity, the binder concentration and the pore size, and the latter is dependent on the size and shape of the pores. The range of flow resistivities, calculated using the Horoshenkov-Swift model for loose rubber granulates, is from 8.865 to 36.517 Pa s m^{-2} . The values obtained are shown in Table 2. The flow resistivity progressively increases with the increasing of the binder concentration for consolidated mixes with particle size in the range 0-6 mm as show Swift et al. (1999). Figure 2 shows that reducing the porosity results in an increased flow resistivity. This adversely affects the overall acoustic performance of the granular mix.

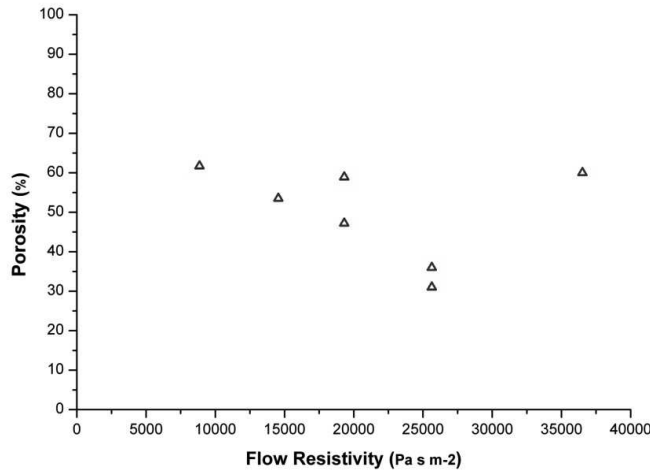


Figure 2 The porosity as a function of the flow resistivity for the samples of GTR.

The values of tortuosity for each sample, corresponding to saturation of the samples by a 10% dissolution of CuSO_4 , are shown in Table 2. These measurements have been made using direct voltage (d.c. power supply). It was found very good linearity of the experimental points in all the samples (Figure 3).

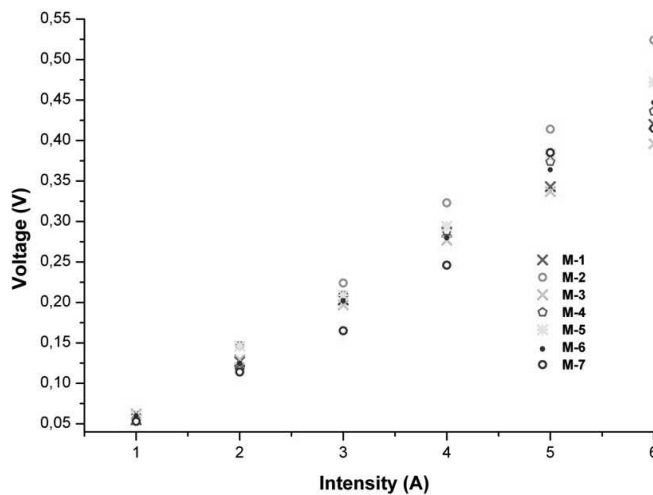


Figure 3 The voltage as a function of the intensity for the samples, obtained non-acoustically using the method indicated by Brown [25].

Table 3 shows the equation of the straight line which provide a best fit for the data points or the line that minimizes the sum of squared residuals of the linear regression model. Table 2 shows large differences in their tortuosity values due to the different microstructures of the samples. The range of the tortuosity is from 1.291 to 2.749. It may be pointed out that this range of tortuosity can be the result of constrictions of the pores as well as changes in their orientation or the binder concen-

tration. The high value of tortuosity for the sample M1, as well as the porosity, is due to the composition of this sample (GTR, Vermiculite and EPS).

Table 3 Equations of the straight line which provide a best fit for the data points for each sample in this work, where X is the intensity (A).

Sample	Linear Regression Model	R^2
M-1	$0.0731X-0.0165$	0.9981
M-2	$0.0929X-0.0440$	0.9977
M-3	$0.0678X-0.0044$	0.9980
M-4	$0.0780X-0.0257$	0.9965
M-5	$0.0816X-0.0249$	0.9974
M-6	$0.0780X-0.0247$	0.9983
M-7	$0.0773X-0.0407$	0.9915

5.2 Acoustical properties

It has been known that the acoustic absorption behaviour of a porous material depends on the porosity, the tortuosity, the flow resistivity and on the thickness of the layer. When the sound propagates in the interconnected pores of a porous material, energy is lost. This lost of energy is due to the complex heterogeneous microstructure and the viscous boundary layer effects (the surface of interactions between the two phases through viscous and thermal losses. The air is a viscous fluid so sound energy is dissipated via friction with the pore walls. As well as viscous effects there are losses due to thermal conduction from the air to the porous material although is more important at low frequencies. As the thickness of the samples increases, the absorption at low frequency usually increases.

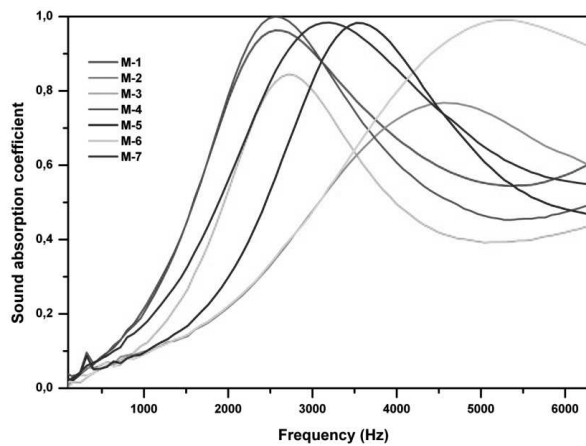


Figure 4 Sound absorption coefficient for the samples with the thickness A.

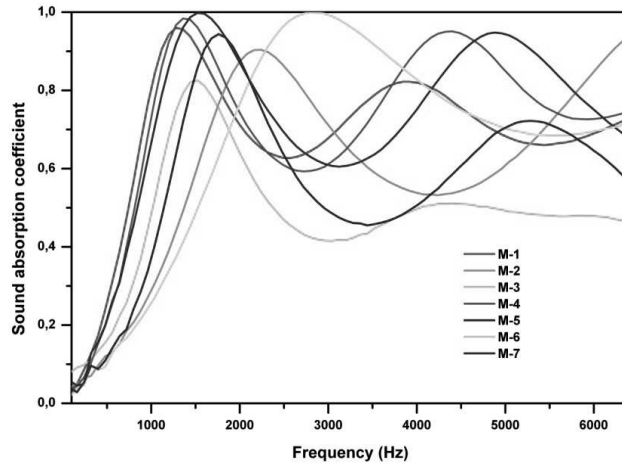


Figure 5 Sound absorption coefficient for the samples with the thickness B.

Two thicknesses for each sample were tested (Figures 4 and 5). Figure 4 shows the normal sound absorption coefficient spectra for the samples with the thickness A. These results show that the best acoustic performance over the frequency range of interest is obtained for the samples M-1 and M4. For these samples the maximum value of the sound absorption coefficient is 1.00 and 0.96, respectively, achieved at the same frequency, 2560 Hz. Both samples show similar performance with the difference in their thickness, 14.0 and 16.5 mm and their porosity, 0.617 and 0.535, respectively.

It is obvious that 14.0 mm of porous absorber of GTR with the grain size < 2.0 mm, vermiculite and EPS and consolidated with 12% binder concentration can yield the highest absorption coefficient values in the broader frequency range for the selected samples of porous absorber. This is attributable to the higher porosity and tortuosity due to the micropores of vermiculite and EPS.

The porosity values for samples M-3 and M-7 are similar. There is a small difference due to the particle size. The binder concentration for these two samples is the same. In the case of material M-3, a higher thickness and a sudden increase in the value of tortuosity implies a shift of the maximum absorption coefficient at frequency 2600 Hz. The value of the sound absorption coefficient achieved at this frequency is 0.86. The sample M-7, with lower thickness and value of tortuosity than sample M-3, presents a maximum absorption coefficient at frequency of 3220 Hz with a value greater than latter, 0.98. The acoustic performance of the sample M-5 is similar to the sample M-7, showing the maximum absorption coefficient at frequency 3560 Hz.

Samples M-2 and M-6 show similar non-acoustic properties. The proportion of binder in sample M-2 is higher than sample M-6. Sample M-6 presents better acoustic performance than sample M-2 and may be due to the higher value of tortuosity and thickness.

Figure 5 shows the normal sound absorption coefficient spectra for the samples with the thickness B. It is obvious that the most evident effect of increasing the thickness of the samples is to shift the normal absorption curve to lower frequency values. This new thickness may not result in better acoustic performance, so we can think that there is a thickness that takes into account the visco-thermal effects with the structure of the material as shown by Swift et al. (1999).

Figures 6 and 7 show, respectively, the real and the imaginary part of the normalized acoustic impedance obtained from the different samples and the thickness A . The real part is the resistance associated with energy losses and the imaginary part, the reactance, associated with phase changes. In this case, we can see a better performance of materials M-1 and M-4 than other materials studied in this work.

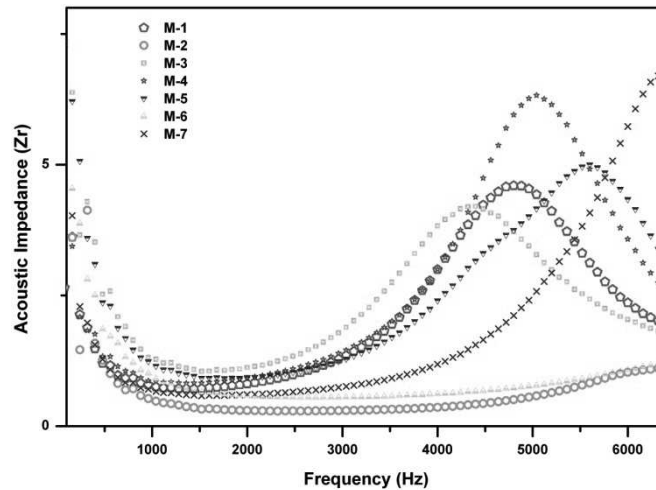


Figure 6 Real part of acoustic impedance from the samples with the thickness A .

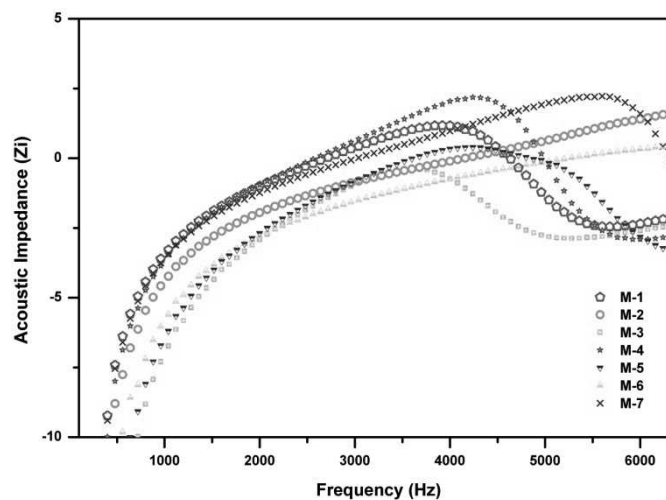


Figure 7 Imaginary part of acoustic impedance from the samples with the thickness A .

The value of the maximum in the real part of the impedance of the samples M-1, M-3 and M-4 is reduced in comparison with the other samples. This results in an increased absorption coefficient values in the vicinity of the maximum of sound absorption coefficient as we can see in Figure 4.

The real and the imaginary part of the normalized acoustic impedance are shifted towards the low frequency and this is results of the increasing tortuosity values of this samples. In case of the samples M-2 and M-6, the value of the maximum in the real part of the impedance is shifted towards the high frequency so this results in low values of acoustic absorption.

5.3 Theoretical modeling

In order to design acoustic material adequate for using as a porous absorber, it is appropriate to predict the acoustical absorption in accordance with the frequency. Nowadays a great number of models are available for predicting the acoustical characteristics of porous absorbers, saving time and a lot of experimental testing.

Models for porous absorbers, with complex pore structures, require more detail to account for the interaction between the sound waves and the pores of the material. Modeling of the acoustic properties of the samples used in this work was carried out using the model described in the equations 1-9. This model requires five parameters; flow resistivity, porosity, tortuosity and two shape factors. Three first parameters are obtained non-acoustically and the shape factors by comparing predicted behavior to experimentally determined results.

The comparison between the theoretical model and the experimental results are show in Figures 8 and 9 for samples M.1 and M-4 respectively. The measured and predicted absorption coefficient for sample M-4 with two thicknesses, 29.5 and 16.5 mm, is shown in Figure 9. The predicted results for this sample follow closely the experimental result practically throughout the considered frequency range. Two different shape factors are required for this porous material. This is the demonstration that the dynamic density and the dynamic bulk modulus are associated with the pore geometry. The best fit values for this sample are $s_p = 2.590$ and $s_k = 0.285$. Agreement between theory and experimental results are essentially perfect for frequencies higher than 1000 Hz.

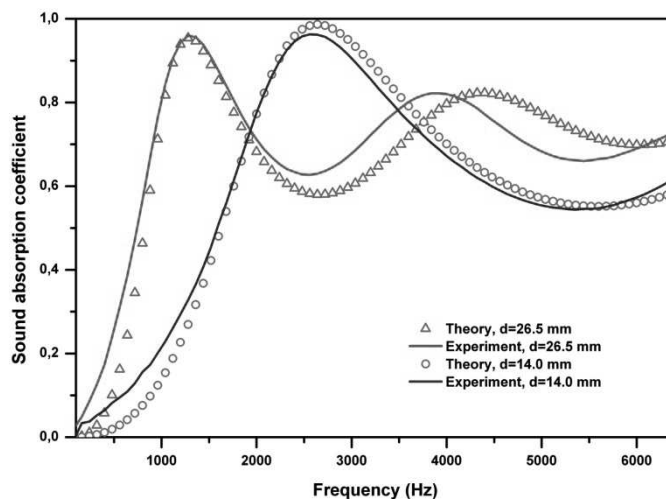


Figure 8 Comparison between the experimental results and prediction using $s_p = 3.100$ and $s_k = 0.350$ for the sample M-1.

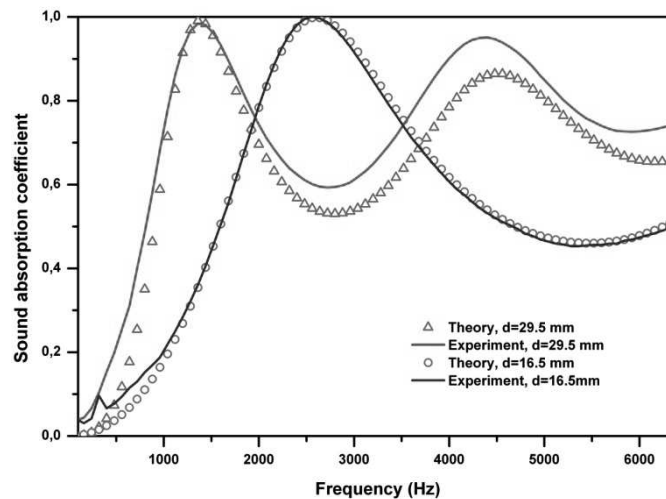


Figure 9 Comparison between the experimental results and prediction using $s_p = 2.590$ and $s_k = 0.285$ for the sample M-4.

The best fit values are s_p and s_k are 3.100 and 0.350, respectively, for the sample M-1. For this material, composed by GTR, Vermiculite and EPS, Figure 8 shows a small discrepancy between the experimental and predicted values of the absorption coefficient.

6 CONCLUSIONS

This work shows an investigation of a new kind of material and its acoustical performance. The results, obtained in this paper, show a novel kind of sound absorption material with high sound absorption performance.

The use of this type of elastomeric waste offers a way of producing very absorbent materials whose acoustical absorption properties are determined by the particle size and the binder concentration.

The Champoux-Allard model has been used to predict the acoustic properties of this new porous absorber. Application of this model requires a detailed knowledge of the pore geometry but this is generally not available. Close fit, between the experimental data and the theoretical predictions, has been observed for the values of the non-acoustic parameters required by the model for samples made with recycled rubber and obtained non-acoustically. This model, constitute a good tool in order to design a new porous absorber.

These innovative sound absorbers have a positive future as it is cheaper and environmentally compared to other available materials and can adequately compete with commercially available acoustical products and, in some cases, show better performance than conventional porous absorbers.

References

- Aiello, M.A., Liuzzi, F., Centonze, G., Maffezzoli, A. (2009). Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-outbehaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management* 29:1960–1970.
- Barrigón Morillas, J.M., Gómez Escobar, V., Rey Gozalo G., Vilchez Gómez, R. (2010). Possible relation of noise levels in streets to the population of the municipalities in which they are located. *J Acoustical Society of America* 128:86–92.
- Biot, M.A. (1956). The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. *J Acoustical Society of America* 28:168–178.
- Biot, M.A. (1956). The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *J Acoustical Society of America* 28:179–191.
- Brown, J.S. (1980). Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling factors in Biot's equations for acoustic waves in fluid-filled porous media. *Geophysics* 45(8):1269–1275.
- Champoux, Y., Stinson, M.R. (1992). On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. *J Acoustical Society of America* 92:1120-1131.
- ETRA. (2006). Tyre Technology International – Trends in Tyre Recycling. <<http://www.etra-eu.org>>. [accessed 28.11 11].
- Han, Z., Chunsheng, L., Kombe, T., Thong-On, N. (2008). Crumb rubber blends in noise absorption study. *Materials and Structures* 41:383–390.
- Hong, Z., Bo, L., Guangsu, H., Jia, H. (2007). A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J Sound and Vibration* 304:400–406.
- Horoshenkov, K.V., Swift, M.J. (2000). The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. *Applied Acoustics* 62:665–690.
- ISO 10534-2. (1998). Acoustics: determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: transfer-function method.
- Jakovljevic, B., Paunovic, K., Belojevic, G. (2009). Road-traffic noise and factors influencing noise annoyance in an urban population. *Environ International* 35:552–558.
- Jimenez-Espadafor, F.J., Becerra Villanueva, J.A., Torres-García, M., Carvajal-Trujillo, E., Muñoz-Blanco, A. (2011). Optimal design of acoustic material from tire fluff. *Materials and Design* 32:3608–3616.
- Johnson, D.L., Plona, T.J., Scala, C., Pasierb, F., Kojima, H. (1982). Tortuosity and acoustic slow waves. *Physical Review Letters* 49:1840–1844.
- Li, X., Xu, H., Gao, Y., Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. *Waste Management* 30:2235–2246.
- Maderuelo-Sanz, R., Martín-Castizo, M., Vilchez-Gómez, R. (2011). The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. *Applied Acoustics* 72:823–828.
- Murphy, E., King, E.A., (2011). Scenario analysis and noise action planning: Modelling the impact of mitigation measures on population exposure. *Applied Acoustics* 72:487–494.
- Oldham, D.J., Egan, C.A., Cookson, R.D. (2011). Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics* 72:350–363.
- Paje, S.E., Bueno, M., Terán, F., Miró, R., Pérez-Jiménez, F., Martínez, A.H. (2010). Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. *Applied Acoustics* 71:578–582.
- Pfretzschner, J., Rodríguez, R.M. (1999). Acoustic properties of rubber crumbs. *Polymertesting* 18:81-92.
- Rodríguez Montejano, R.M. (2004). Propiedades acústicas de caucho granular. Ph.D. Thesis, Polytechnical University of Madrid, Spain.

- Rushforth, I.M., Horoshenkov, K.V., Miraftab, M., Swift, M.J. (2005). Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics* 66:731–749.
- Swift, M.J., Bris, P., Horoshenkov, K.V. (1999). Acoustic absorption in recycled rubber granulates. *Applied Acoustics* 57:203-212.
- Vasina, M., Hughes, D.C., Horoshenkov, K.V., Lapčík, Jr. L. (2006). The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Applied Acoustics* 67:787–796.
- Zannin, P.H., Diniz, F.B., Barbosa, W.A., (2002). Environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil. *Applied Acoustics* 63: 351–359.
- Zwikker, C., Kosten, C.W. (1949). *Sound Absorbing Materials*, Elsevier, New York.

Acoustical performance of loose cork granulates

Rubén Maderuelo-Sanz · Juan Miguel Barrigón Morillas ·
Valentín Gómez Escobar

Received: 13 July 2013 / Published online: 15 February 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract This paper reports on an investigation of the acoustical performance of loose cork granulates. This investigation is based on the physical parameters of loose granular cork obtained through an empirical model of the acoustic properties of loose granular media shown by Voronina and Horoshenkov and the experimental performance of these granulates. The performance is assessed according to ISO 10534-2 (1998). The data obtained show clearly that this porous absorber exhibits high sound absorption performance varying with particle size. The relationship between the experimental and the model results demonstrates the existence of significant differences between particle sizes >3.5 mm. Finally, the performance of this material is compared to other granular materials.

1 Introduction

Nowadays, there is considerable interest in developing sustainable absorbers from biomass (Ersoy and Küçük 2009; Hosseini Fouladi et al. 2011; Fatima and Mohanty 2011; Oldham et al. 2011) and recycled materials

(Maderuelo-Sanz et al. 2013). The term, sustainable absorbers from biomass, refers to living and recently dead biological material (Oldham et al. 2011). Cork, a natural and sustainable raw material that has been used since ancient times, is part of this biological material and is obtained from the cork oak tree (*Quercus suber* L.) growing extensively in Portugal, Spain and other countries that provide the Mediterranean climate that greatly facilitates its growth. The cork sector is divided into the forestry system, cork raw material extraction and forestry management operations, and the industrial system, further divided into two production groups, the natural cork industry and the granulate–agglomerate industry (Rives et al. 2012).

Most of the uses of cork agglomerate, due to its remarkable properties are associated with material researches for different applications. Its inclusion in a great number of composite materials for building applications are also numerous. Castro et al. (2010) studied cork-epoxy agglomerates as an ideal core material for sandwich components of lightweight structures having good thermal insulating properties and high energy absorption capacity with minimum damage occurrence similar to other types of core material. Fernandes et al. (2011) verified that cork-based composites, composed of cork powder mixed with polypropylene or polyethylene, present low water absorption, fire resistance, impact resistance and insulation properties compared to commercially available products namely medium density fibreboard and high density fibreboard. Freitas et al. (2012) showed that mechanical and acoustical properties of materials not conventionally used in road layers but widely used in building construction as expanded clay aggregates and cork granulates to reduce noise, have also indicated better performance when compared to equivalent conventional mixtures. In the case of

R. Maderuelo-Sanz (✉)
Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de
Construcción, INTRMAC, Campus Universidad de
Extremadura, S/N, Apdo. 135, 10071 Cáceres, Spain
e-mail: rmaderuelo@intramac.com

R. Maderuelo-Sanz · J. M. Barrigón Morillas ·
V. Gómez Escobar
Dpto de Física Aplicada. E. Politécnica, Universidad
Extremadura, Campus Universidad de Extremadura, 1003,
Cáceres, Spain
e-mail: barrigon@unex.es

V. Gómez Escobar
e-mail: valentin@unex.es

acoustical performance, Macías-García et al. (2009) studied the effects of particle size and resin dosage on the acoustic absorption in black and composite agglomerate of cork granulates.

In order to evaluate the acoustical properties of loose granular media, Voronina and Horoshenkov (2003, 2004) carried out an experimental investigation into a representative selection of loose granular materials to develop an empirical model, which could reliably predict the acoustic performance of loose granular mixes. This model requires knowledge of the characteristic particle dimension, porosity, tortuosity and the specific density of the grain base. These properties are routinely measurable parameters but can be predicted too.

One of the purposes of this paper is to experimentally investigate the acoustical properties of loose cork granulates. The other purpose is to compare the results of the first resonance frequency obtained from the measurements in an impedance tube with the model by Voronina and Horoshenkov. Subsequently, a comparison with other loose granulates made from different materials is conducted.

The results obtained in this work can be useful to analyze the optimal grain size which is required to maximise the absorption properties of material samples of a particular thickness or in a particular frequency. By using natural recycled materials, these results can also be useful for helping in the design of noise barriers, acoustic partitions and screens being very interesting technical solutions nowadays.

2 Methodology

2.1 Materials and sample preparation

The main material used in this work is white cork granulate. Eight different granular mixes were prepared using eight calibrated sieve sets to extract grains with effective sizes between 0.5 and 8.0 mm. In addition, four different thicknesses were considered. Other materials, used to compare the acoustical performance with white cork, were black cork granulate, vermiculite and arlita having sizes between 4.0 and 5.0 mm. White cork granulate is a by-product that can be defined as a raw material obtained from stoppers for wine, beer, champagne, cider, etc. Black cork granulate is generated from industry forestry waste, and no preparation is necessary for the manufacture, so this product is intended for non food and drink uses such as insulation panels, flooring, decoration, etc. Arlita, a Spanish commercial lightweight aggregate, is typically manufactured from bloating clays which, upon firing natural clays at temperatures of 1,100–1,200 °C, expands or bloats into a material with a high proportion of semi-closed pores.

Each individual clay nodule is composed of hundreds of minute air cells, contained within a hard, porous and strong vitrified outer shell. Vermiculite is a hydrated magnesium aluminium silicate and is one of the safest and most unique minerals in the world with a long history of applications in building construction, agriculture or industrial markets. Vermiculite, used in its exfoliated (expanded) form, is lightweight (low bulk density), absorbent, non-combustible, and an excellent insulator. In order to compare the acoustical properties, four different thicknesses 25, 50, 75 and 100 mm were tested.

2.2 Physical properties

2.2.1 Porosity

Porous materials with open cells consist of an elastic or rigid frame which is surrounded by air. The connected porosity, Ω , is the ratio of the air volume inside the sample to the total volume occupied by the porous material. In this work, the skeletal density is measured using a helium stereo-pycnometer (Quantachrome SPY-3) with a calibrated cell having a volume of 153.59 cm³. The helium stereo-pycnometer allows for performing very accurate measurements of skeletal density to obtain the connected porosity, given by the expression:

$$\Omega = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad (\text{dimensionless}) \quad (1)$$

where ρ_m is the apparent density of the sample (kg/m³) and ρ_s is the skeletal density of the granulate material (kg/m³). The apparent density of the sample is evaluated by the principle of Archimedes. For each measurement, six different samples were used, each measured five times. All the samples were weighed prior to each measurement.

The porosity, thus evaluated, presents higher values than the porosity obtained by the method of water saturation used by Vasina et al. (2006) or Maderuelo-Sanz et al. (2011), because helium, due to its small atomic dimensions, could enter into those pores where the air is not able to penetrate.

2.2.2 Flow resistivity

The flow resistivity is one of the most important properties of a porous sound absorber and is determined by the pore size, dependent on the size and shape of the grains, and the porosity. In technical literature, there are several empirical and semi-empirical models to estimate airflow resistivity on the basis of various parameters such as grain size, compaction ratio, binder concentration, porosity, etc.

In this work, Eq. (2) is used for calculating the flow resistivity of the samples. This expression can also be used

to predict the flow resistivity of loose granular mixes and shows an empirical dependence between the characteristic dimension of the particles, the porosity and the flow resistivity (Voronina and Horoshenkov 2003):

$$\sigma = \frac{400\mu(1 - \Omega)^2(1 + \Omega)^5}{\Omega D^2} \text{ (Pa s/m}^2\text{)} \quad (2)$$

In this equation, μ is the dynamic viscosity of air (kg/m s), Ω is the porosity of the sample and D is the characteristic dimension of the particles (mm), obtained as is indicated in Voronina and Horoshenkov (2003, 2004).

2.2.3 Tortuosity

The influence of the internal pore structure on the macroscopic velocity of the fluid flow through the material can be shown by the tortuosity q , a dimensional structural parameter. It has a value which depends only on the pore geometry (Johnson et al. 1982), and the minimum possible value is 1.

The tortuosity is measured non-acoustically using the method indicated by Brown (1980). This method is based on an electro-acoustical analogy through the electrical conductivity of a saturating fluid. The porous material is saturated with a conducting fluid (10 % dissolution of CuSO_4), and the electrical resistivity (equivalent to the flow resistivity) is calculated by current and voltage measurements (using circular plates of copper as electrodes).

Having ρ_c and ρ_f the measured electrical resistivity (Ωm) of the saturated material and the fluid, respectively, the tortuosity is given by the next expression:

$$q = \Omega \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \text{ (dimensionless)} \quad (3)$$

where porosity, Ω , is the connected porosity of the sample.

2.3 Acoustical properties

To evaluate the acoustical properties of different samples (surface impedance and sound absorption coefficient), measurements of the sound absorption characteristics were carried out using an impedance tube. The impedance tube measurements are based on the two-microphone transfer-function method according to the standard procedure detailed in ISO 10534-2 (1998) in the frequency range of 100–6,400 Hz. Using this method, it is possible to obtain fast measurements of normal incident parameters using small samples.

The impedance tube method has a great number of advantages (Oldham et al. 2011): the apparatus itself is small and therefore practical, only a small sample is required for the tests, and it allows the surface impedance to be determined in addition to the absorption coefficient. The disadvantages are first, that the properties are only

measured for sound at normal incidence to the sample although it is possible to apply a correction, from the surface impedance values, to obtain an approximate value of the random incidence absorption coefficient (Oldham et al. 2011). Secondly, uncertainties are introduced when measuring heterogeneous materials as the constitution and pore structure of samples taken from different regions of a large sample may vary considerably. Thirdly, two different tubes and subsequently two different samples are required for measurements over a large frequency range.

The measurements were made using the Brüel & Kjær Impedance Tube Kit Type 4206, installed in the vertical position to allow the acoustic properties of non-consolidated samples to be easily measured, and two ¼" Condenser Microphones Type 4187. The signals were analysed with a portable Brüel & Kjær PULSE System with four input data channels (type 3560-C). Sample holders of 100 and 29 mm in diameter are provided; the first is employed for measurements over the range of frequencies from 50 Hz to 1.6 kHz and the second over the range of frequencies from 500 Hz to 6.4 kHz.

3 Results and discussion

3.1 Non-acoustic properties

Cork is a granular medium, so it can be characterised by two porosities, the intra-particle porosity and the inter-particle porosity (Glé et al. 2001). Slight differences were observed in the connected porosity values because the connected porosity is distributed between pores of different sizes into and between the particles (Table 1). The intra-particle porosity of cork was caused by lenticular channels, which are hollow and approximately cylindrical (Pereira 2007). These lenticular channels are usually referred to as the pores of the cork, and its number and dimension have a large variation between samples and also in different parts of the same cork plank (Pereira 2007). The average pore area was between 0.4 and 3.2 mm^2 .

Experimental results (Table 1) show that the average value of porosity of loose granular cork was about 0.850. There are small differences between each sample, and it can be seen that the porosity is relatively independent from the grain size; results have been previously confirmed by Horoshenkov and Swift (2001) for loose rubber granulates. There are some indirect relationships between shape grains and porosity; the arrangement of the grains in the sample where the shape of these grains has an important effect on packing density (increasing packing density means decreasing porosity); the angularity of the particles has an important effect on the framework too, the greater the angularity of the particles the greater the connected

Table 1 Components and non-acoustic properties of different samples

Samples	Sample component size (mm)	Porosity	Tortuosity	Flow resistivity (Pa s/m ²)	Characteristic particle size, D (mm)
M-1	White cork (6.3 < d < 8.0)	0.842	1.274	60	8.8
M-2	White cork (5.6 < d < 6.3)	0.840	1.288	89	7.3
M-3	White cork (5.0 < d < 5.6)	0.837	1.265	123	6.3
M-4	White cork (4.0 < d < 5.0)	0.837	1.302	163	5.5
M-5	White cork (3.15 < d < 4.0)	0.838	1.357	187	5.1
M-6	White cork (2.0 < d < 3.15)	0.840	1.304	325	3.8
M-7	White Cork (1.0 < d < 2.0)	0.863	1.607	795	2.1
M-8	White cork (0.5 < d < 1.0)	0.862	1.645	2580	1.2
M-9	Arlita (4.0 < d < 5.0)	0.797	1.559	376	4.4
M-10	Vermiculite (4.0 < d < 5.0)	0.943	1.754	87	2.9
M-11	Black cork (4.0 < d < 5.0)	0.832	1.434	185	5.3

porosity, and the better sorted the grains the greater the porosity. Overall porosity decreases with poorer sorting. Having poor sorting, small grains can fill the pore space between large grains and reduce porosity. Values of porosity of cork samples range between 0.837 and 0.863, whereby sample M-7 presents higher values of porosity. Figure 1 shows the shape of the grains of the sample M-1 and M-8, where it can be seen that small grains present greater angularity.

The flow resistivity was determined by the porosity and the characteristic particle size, and the latter is dependent on the size and shape of the pores (Hong et al. 2007). The range of flow resistivity, calculated using the Voronina and Horoshenkov (2003) model for loose granular media, is from 60 to 2,580 Pa s/m². The values obtained are shown in Table 1.

The values of tortuosity for each sample, corresponding to saturation of the samples by 10 % dissolution of CuSO₄, are shown in Table 1. The measurements were made using direct voltage (dc power supply), and very good linearity of the experimental points in all the samples was found. The tortuosity ranged from 1.265 to 1.754. These values are responsible for the positions of the maxima and minima in the absorption coefficient spectrum. The results suggest that tortuosity is dependent on the characteristic particle size.

3.2 Acoustical properties of loose cork granulates

When a granular porous sound absorber is stricken by a sound wave, the grains of the absorbing material start to vibrate. This vibration causes tiny amounts of heat due to the friction between the grains and thus the sound absorption is accomplished by way of energy to heat conversion (Maderuelo-Sanz et al. 2012). Figure 2a–c show the absorption coefficient spectra for different sizes of loose cork granulates having three different thicknesses,

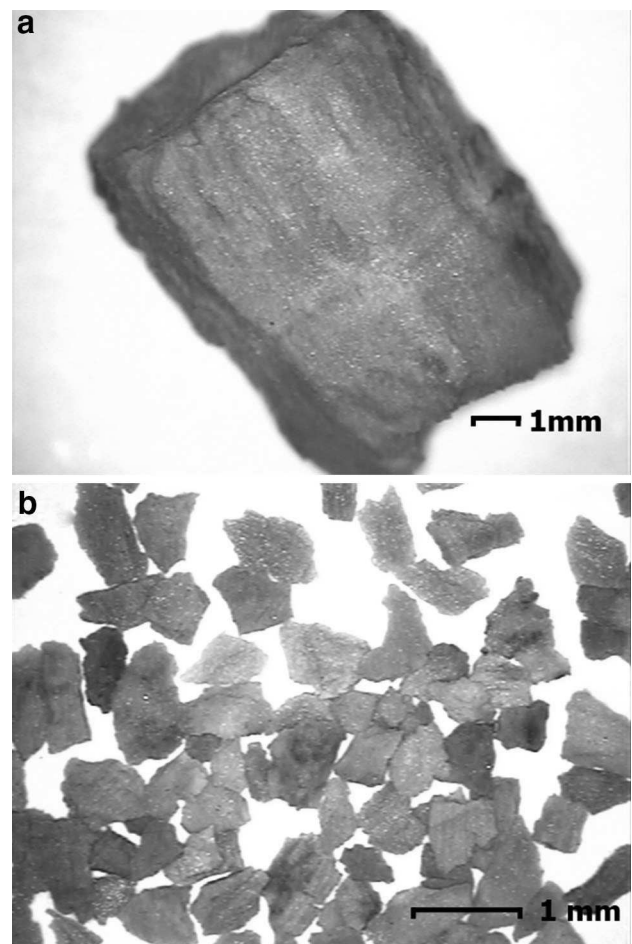


Fig. 1 Microphotos of samples **a** M-1 and **b** M-8 obtained with Mitutoyo Vision Machine. The different angularity of the cork with different sizes can be observed

50, 75 and 100 mm. In these Figures, a displacement of the absorption maximum to lower frequencies due to the increasing thickness of the sample can be observed. The

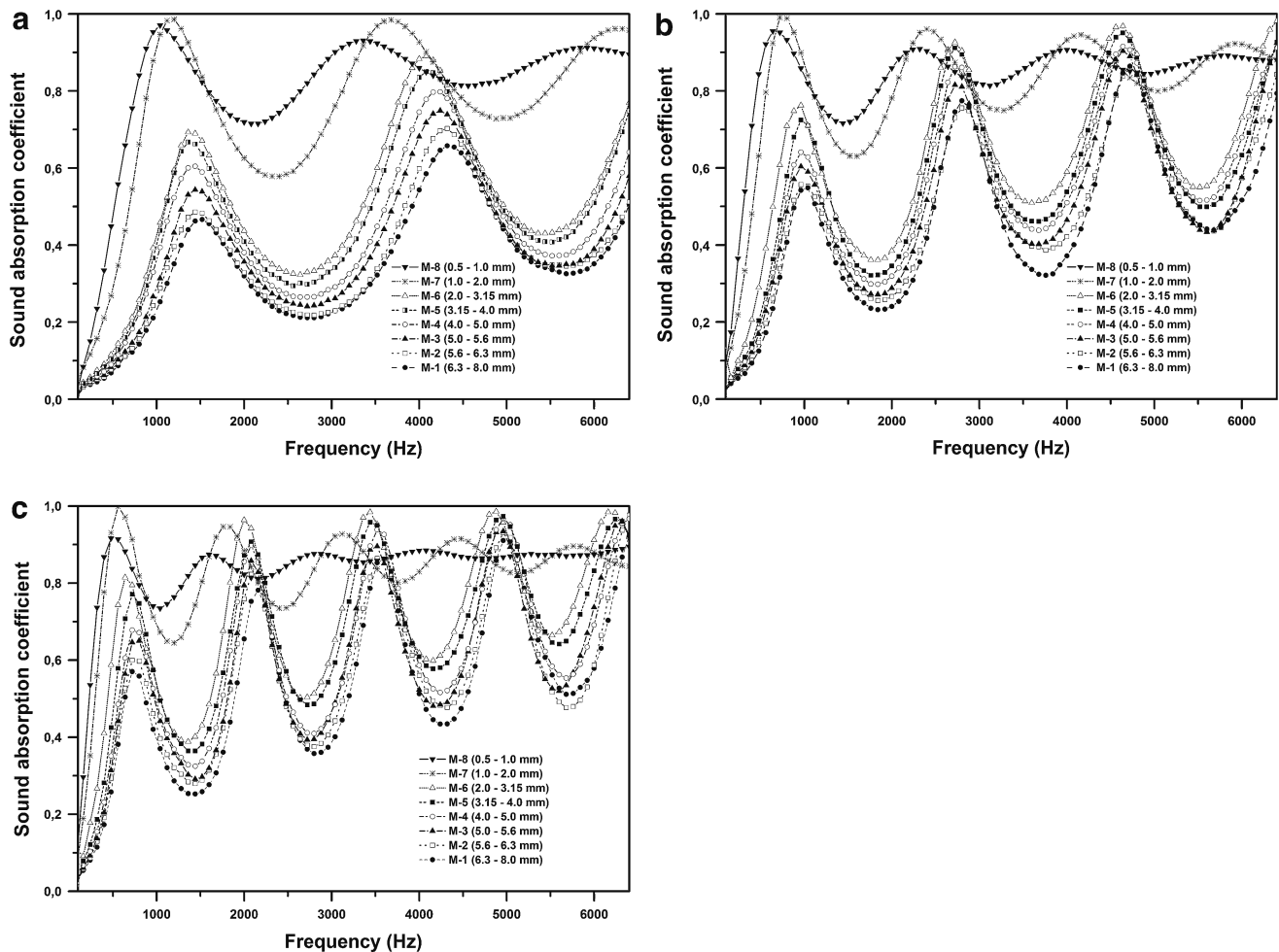


Fig. 2 Sound absorption coefficient for the samples of loose cork having **a** $d = 50$ mm, **b** $d = 75$ mm and **c** $d = 100$ mm

grain sizes for each sample result in a progressively increased value of the absorption coefficient throughout the frequency range. There is a notable difference in the absorption coefficient spectrum between the samples M-6 and M-7 and the rest of the samples.

For smaller grain sizes, the values of the absorption coefficient throughout the frequency range are greater than for larger grains. For sample M-7, the value of the absorption coefficient for the first maximum is 0.97 achieved at 1,040 Hz for a thickness of 50 mm. For sample M-8, the value of the absorption coefficient for the first maximum is 1.00 achieved at 560 Hz for a thickness of 100 mm. These values are mainly due to the flow resistivity. For sample M-8, the absorption coefficient reduces with increasing thickness and decreasing frequency and the absorption coefficient tends asymptotically to 0.90 for higher frequencies (Fig. 3). This is due to a critical thickness above which the absorption coefficient is reduced. In the case of sample M-7, the absorption coefficient increases with increasing thickness and decreasing frequency.

For samples M-1 to M-8, there is a displacement of the first absorption maximum to lower frequencies with increasing thickness of the sample. The difference between the extremes minima and maxima increases for a sample and the widths of the interference minima and maxima in the first absorption coefficient spectrum becomes reduced. Increasing thickness results in a progressively increased value of the absorption coefficient in the higher frequency range. In Figs. 4 and 5, the absorption coefficient spectrum for samples M-1 and M-4 are shown. For sample M-1, the maximum value of the absorption coefficient is 0.92 achieved at 6,400 Hz for a thickness of 100 mm (Fig. 4). For sample M-4, the maximum value of the absorption coefficient is 0.97 achieved at 4,960 Hz for a thickness of 100 mm (Fig. 5). These values show the influence of the intra-particle porosity, likely to be pronounced in the higher frequency range (Boutin et al. 1998) due to the thermal non-equilibrium micropores.

The ratio between the first resonance maximum and its minimum in the absorption coefficient is an important

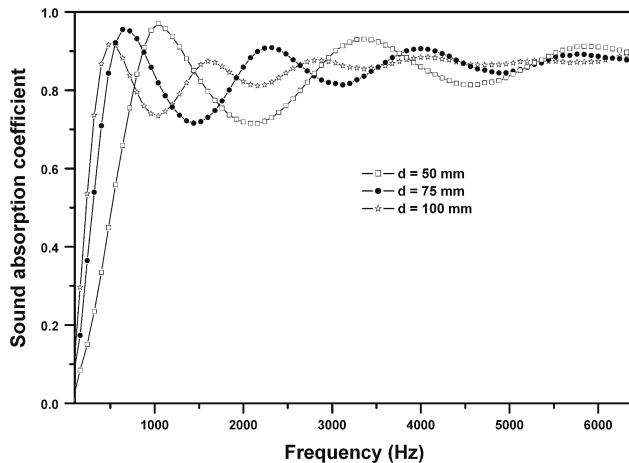


Fig. 3 Sound absorption coefficient for the sample M-8 of loose cork having different thickness

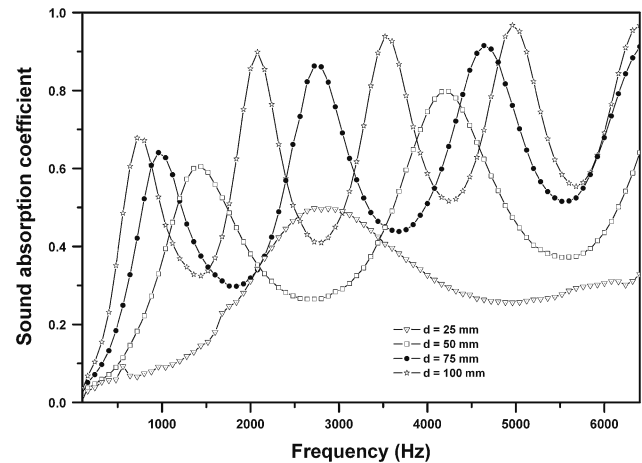


Fig. 5 Sound absorption coefficient for the sample M-4 of loose cork having different thickness

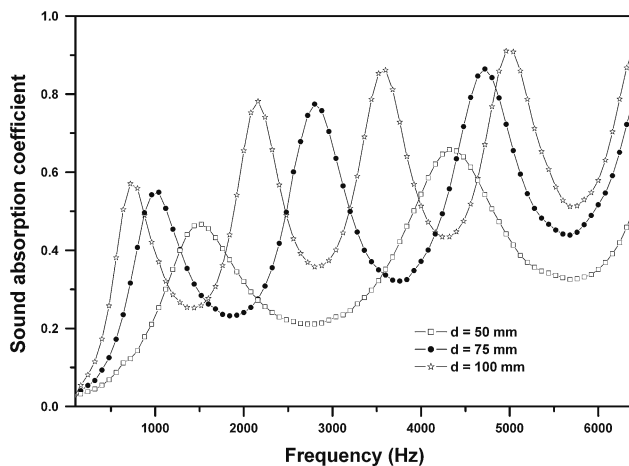


Fig. 4 Sound absorption coefficient for the sample M-1 of loose cork having different thickness

parameter that determines the ability of a material to dissipate the energy of the incident sound wave (Vasina et al. 2006). Table 2 shows the ratios between the first resonance maximum and its minimum of the samples for each thickness. The obtained values of these ratios can provide a good degree of acoustic absorption throughout the considered frequency range (100–3,000 Hz). The values of the absorption coefficient can be considered as a function of the flow resistivity, the tortuosity and the particle size.

3.3 Resonance frequency of the first interference maximum

In many practical applications, it is necessary to apply sound porous absorbers capable of being used, selectively, in a narrow range of frequencies but not at frequencies lying above or below that range. This is due to the necessity to effectively absorb sound from different sources

Table 2 Ratios between the first resonance maximum and its minimum of the samples for each thickness

Samples	d = 50 mm	d = 75 mm	d = 100 mm
M-1	2.3	2.3	2.3
M-2	2.3	2.2	2.1
M-3	2.4	2.1	2.1
M-4	2.3	2.1	2.1
M-5	2.2	2.3	2.2
M-6	2.3	2.2	2.1
M-7	1.7	1.6	1.6
M-8	1.4	1.3	1.2
M-9	2.7	2.5	2.4
M-10	2.1	1.8	2.0
M-11	2.1	2.0	1.7

that produce sounds having different frequency distributions. For this purpose and for low frequencies, the resonance frequency of the first interference maximum, f_r , in the absorption coefficient spectrum of a hard-backed layer of porous absorber is used.

Voronina and Horoshenkov (2003, 2004) carried out an experimental investigation using loose granular materials to develop an empirical model which could predict the first resonance peak in the absorption coefficient spectrum of these loose granular mixes. This characteristic is a function of the layer thickness and other physical parameters which characterise the microstructure of the porous medium (Voronina and Horoshenkov 2004).

Equations (4)–(9) (Voronina and Horoshenkov 2004) show an empirical model for estimating the frequency of the first interference maximum in the absorption coefficient spectrum, f_r . These equations link the parameters that

Table 3 Determination of the frequency of the first interference maximum for the samples of loose cork granulates

Samples	Characteristic particle size, D (mm)	Resonance frequency, fr (Hz)						Differences (%)		
		Measured			Predicted			10.0	7.5	5.0
		Thickness								
		10.0	7.5	5.0	10.0	7.5	5.0	10.0	7.5	5.0
M-1	8.8	750	1,032	1,464	669	898	1,359	10.8	13.0	7.2
M-2	7.3	750	994	1,472	661	889	1,348	11.9	10.6	8.4
M-3	6.3	750	964	1,458	653	880	1,337	12.9	8.7	8.3
M-4	5.5	750	964	1,432	645	871	1,326	14.0	9.6	7.4
M-5	5.1	750	972	1,392	641	866	1,320	14.5	10.9	5.2
M-6	3.8	656	960	1,389	620	842	1,289	5.5	12.3	7.2
M-7	2.1	566	758	1,166	573	785	1,218	−1.2	−3.6	−4.5
M-8	1.2	513	656	1,028	490	686	1,090	4.5	−4.6	−6.0

describe the microstructure of the granular medium and the layer thickness.

$$a = 1 + \frac{\Omega}{(1 + \Omega)(1 + M)} \quad \text{(dimensionless)} \quad (4)$$

$$b = \frac{0.2(1 - \Omega)(1 + \Omega)^2}{\sqrt{D}\xi} \quad \text{(dimensionless)} \quad (5)$$

$$p = 1.65/d \quad [1/m] \quad (6)$$

$$f_r = \frac{c}{8\pi a^2} (\sqrt{b^2 + 4ap} - b)^2 \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

where:

$$M = \frac{\rho_s}{10^3 \rho_0} \quad \text{[dimensionless]} \quad (8)$$

$$\xi = \frac{D\rho_0 c}{\mu} 10^{-4} \quad \text{[dimensionless]} \quad (9)$$

In these equations, Ω is the connected porosity of the sample, D is the characteristic dimension of the particles, c the sound speed in air (m/s), d the thickness of the sample (m), ρ_0 the equilibrium density of air (kg/m^3), ρ_s the skeletal density of the granulate material (kg/m^3), μ the dynamic viscosity of air and ξ and M are two dimensionless parameters that introduce the viscous energy loss and the mechanical friction between the elements of the non-rigid frame in porous materials with low specific density and to the absorption in the frame micro-pores, respectively.

The characteristics of the granular material studied in this work were different from those analyzed by Voronina and Horoshenkov (2003) (the characteristic dimensions of the particles in this study range from 1.2 to 8.8 mm, while in the previous one from 0.4 to 3.5 mm). These authors concluded that their model presents a very good agreement with the experimental data in the frequency range of 250–4,000 Hz for materials with a grain base of

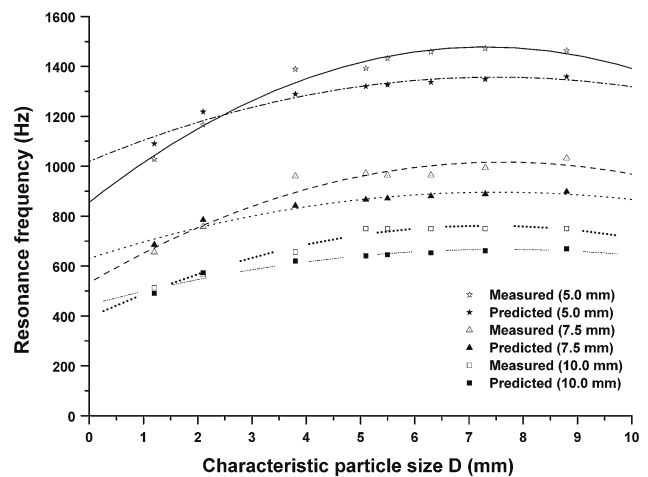


Fig. 6 Values of the measured and the predicted resonance frequencies of the first interference maximum of loose cork granulates and polynomial line which provide a best fit for the data points having the thickness 5.0 (solid line measured, dash-dot line predicted), 7.5 (dash line measured, dot line predicted) and 10.0 mm (short dot line measured, dash-dot-dot line predicted), in the order from top to bottom

0.4–3.5 mm and specific densities between 200 and 1,200 kg/m^3 . It must be emphasized here, that this model was tried out for other types of material, not previously analyzed, having specific densities in the range shown by Voronina and Horoshenkov (2003), and moreover, the range of the grains given by these authors was improved, having an effective size between 0.5 and 8.0 mm in order to ascertain where is the limitation of the model. Thus, Table 3 shows the values of the predicted (values obtained by Eqs. 4–9) and the measured (values obtained through an impedance tube) resonance frequencies of the first interference maximum of loose cork granulate. For samples having $D \leq 2.1$ mm, very good accuracy of the predicted and the measured resonance frequencies of the first

interference maximum (Fig. 6) was found. The differences in percentage for these samples are in the range 1.2–6.0 %. As can be seen in this table, samples having $D > 2.1$ mm show slightly higher resonance frequency for measured than for predicted values. This is in accordance with the limitation of the model shown by the authors.

Table 4 Equations of the polynomial line which provide a best fit for the data points of each sample in this work where X is the characteristic particle size (D)

Sample thickness (mm)		Polynomial regression model	R^2
50	Measured	$-11.6800X^2 + 170.47X + 856.21$	0.9767
	Predicted	$-6.0356X^2 + 90.26X + 1,019.80$	0.9526
75	Measured	$-8.3627X^2 + 127.22X + 532.98$	0.9385
	Predicted	$-4.6964X^2 + 70.64X + 630.54$	0.9549
100	Measured	$-6.8424X^2 + 100.40X + 393.60$	0.9794
	Predicted	$-3.8793X^2 + 58.83X + 443.87$	0.9556

Although the experimental results agree reasonably with the predicted results, it is clear that for higher values of the characteristic dimension (D) there are higher differences. A modification of the dimensionless coefficients of the model for high value of D could minimize the observed differences between experimental and predicted values. Table 4 shows the equation of the second order polynomial line which provides a best fit for the data points that minimize the sum of squared residuals of the polynomial regression model. It is of interest to show the ratio from the coefficients of the polynomial regression model between predicted and measured values. A near estimated ratio 2:2:1/2 can be found in these coefficients between measured and predicted values for all the thicknesses.

3.4 Comparison with other loose granular media

In order to compare with other loose granular media, four different samples of black cork, vermiculite and arlita with thicknesses 25, 50, 75 and 100 mm, were tested.

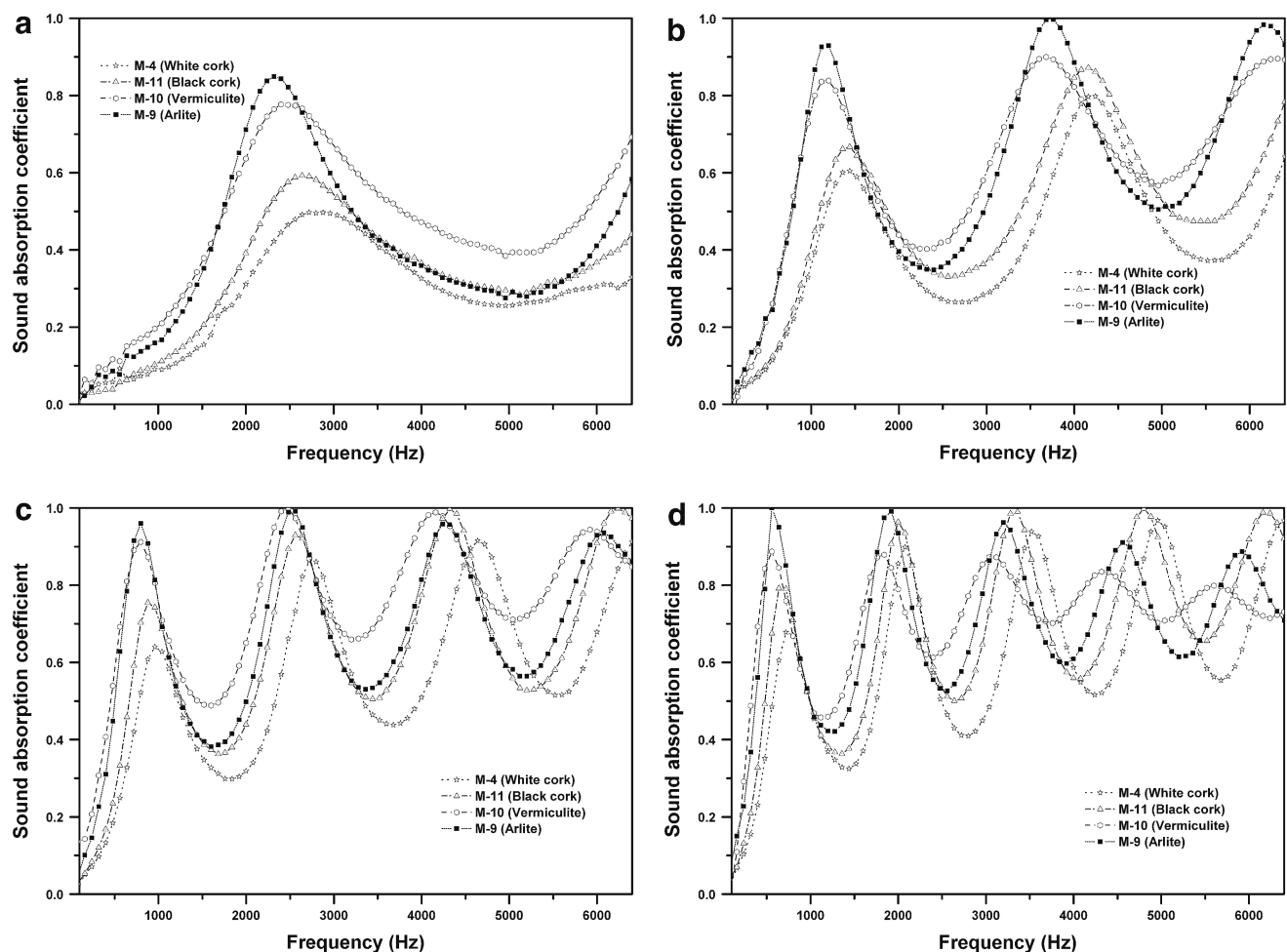


Fig. 7 Sound absorption coefficient for the samples M-4, M-9, M-10 and M-11 having **a** $d = 25$ mm, **b** $d = 50$ mm, **c** $d = 75$ mm and **d** $d = 100$ mm

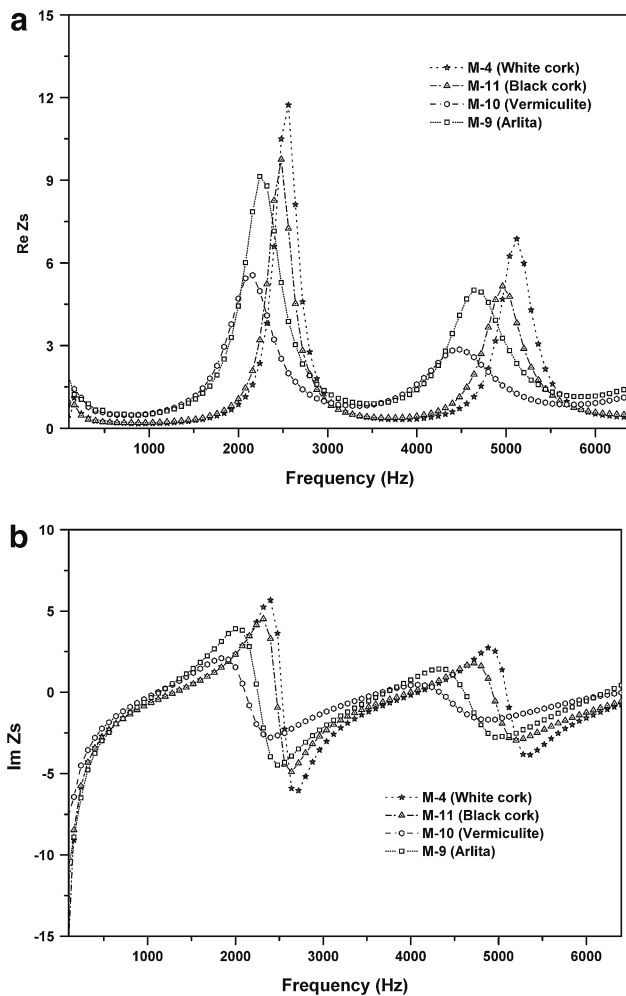


Fig. 8 **a** Real and **b** imaginary parts of the normalised surface impedance for the samples M-4, M-9, M-10 and M-11 having $d = 50$ mm

Figure 7a–d show the absorption coefficient spectrum of white cork, black cork, vermiculite and arlita having sizes between 4.0 and 5.0 mm.

The values of the absorption coefficient at resonance frequencies are greater for sample M-11 than for sample M-4 and slightly shifted to lower frequencies. For higher thicknesses, there is a considerable shift of the interference maxima towards low frequencies and a higher width of these interference maxima. These differences are due to their physical properties (Table 1). Both samples present the same porosity but there is a slight difference between their tortuosity and flow resistivity, properties that are causing the difference in their acoustical performance. Arlita and vermiculite show better performance than white cork for this particle size. In the case of vermiculite, this is due to a greater porosity and tortuosity. In the case of arlita, it is due to the porosity and flow resistivity. The latter doubles the value of the sample M-4.

Figure 8 shows the values of the real and imaginary parts of the surface impedance, Z_s , for the samples M-4, M-9, M-10 and M-11, for 50 mm of thickness. These samples present the same grain size in the range of 4.0–5.0 mm. For samples M-4 and M-11, the real and the imaginary parts of the surface impedance show a slight difference. This difference can explain the deviation in the absorption coefficient between white and black cork. The real and imaginary parts of the surface impedance for sample M-4 becomes relatively larger than for sample M-11. This results in low values of acoustic absorption almost throughout the entire frequency range. The maximum of the real part of the surface impedance for samples M-9 and M-10 is shifted slightly to the lower frequencies and its amplitude is reduced. This can be due to the reducing tortuosity values. The value of the maximum of the real part of the surface impedance of the latter samples is reduced in comparison to samples M-4 and M-11, so this results in an increased value of the sound absorption coefficient for samples M-9 and M-10 around 1,200 Hz (Fig. 7b).

4 Conclusion

Nowadays, the use of commercially available acoustical products in noise control to reduce sound reflected from surfaces is shifted to the use of sustainable absorbers, either from recycled materials, biomass materials or combinations of both.

This work shows an investigation of the acoustical performance of loose cork granulates with different sizes. The main material used in this work is white cork. Other three loose granular materials were tested too; black cork, arlita and vermiculite, having sizes between 4.0 and 5.0 mm. Connected porosity, tortuosity, flow resistivity and sound absorption coefficient were studied. Usually, when the inter-particle pores are smaller, the degree of compaction and the bulk density are higher and the porosity is lower, assuming that the raw density of the cork remains the same. In this work, the results obtained suggest that the angularity of the particles has also an important effect on the porosity and this makes one believe porosity is relatively independent from the grain size. Tortuosity and flow resistivity have an important effect on the acoustic properties. The results obtained from tortuosity suggest that it is dependent on the characteristic particle size.

Very good accuracy between the model of Voronina and Horoshenkov to predict the frequency of the first interference maximum and the measured values was found, but only for samples small enough having $D < 2.1$ mm. As the thickness of the sample increases, the differences in the first resonance frequency between the measured and

predicted values increase. Just as expected, the obtained results show that this model leads to higher deviation from experimental results when the characteristic particle size increases and then, it seems adequate to redefine the parameters used in the model in order to get prediction values closer to the experimental ones.

Cork shows a good sound absorption performance when the particle size is small enough. There is a characteristic particle size where this performance is optimal; having a size in the range of 1.0–2.0 mm. The absorption coefficient spectrum of small grain mixes is relatively smooth and the maximum value of the absorption is limited. For large grains, the absorption coefficient spectrum is of a distinctly resonant character.

References

- Boutin C, Royer P, Auriault JL (1998) Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity. *Int J Solids Struct* 35(34–35):4709–4737
- Brown JS (1980) Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid–solid coupling factors in Biot’s equations for acoustic waves in fluid-filled porous media. *Geophysics* 45(8):1269–1275
- Castro O, Silva JM, Devezas T, Silva A, Gil L (2010) Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Mater Des* 31:425–432
- Ersoy S, Küçük H (2009) Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. *Appl Acoust* 72:215–220
- Fatima S, Mohanty AR (2011) Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Appl Acoust* 72:108–114
- Fernandes EM, Correlo VM, Chagas JAM, Mano JF, Reis RL (2011) Properties of new cork–polymer composites: advantages and drawbacks as compared with commercially available fibreboard materials. *Compos Struct* 93:3120–3129
- Freitas E, Oliveira J, Machado P (2012) Innovative low noise road pavement materials studied in Portugal. *J Acoust Soc Am* 131(4):3225
- Glé P, Gourdon E, Arnaud L (2001) Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Appl Acoust* 72:249–259
- Hong Z, Bo L, Guangsu H, Jia H (2007) A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J Sound Vib* 304:400–406
- Horoshenkov KV, Swift MJ (2001) The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. *Appl Acoust* 62:665–690
- Hosseini Fouladi M, Ayub MD, Jailani Mohd Nor M (2011) Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Appl Acoust* 72:35–42
- International Organization for Standardization ISO 10534-2 (1998) Acoustics—determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: transfer function-method. International Organization for Standardization, Geneva
- Johnson DL, Plona TJ, Scala C, Pasierb F, Kojima H (1982) Tortuosity and acoustic slow waves. *Phys Rev Lett* 49:1840–1844
- Macías-García A, Díaz-Díez MA, Cuerda-Correa EM, Díaz-Parralejo A, Gómez-Serrano V (2009) Use of cork agglomerates as acoustic absorbents. *Mater Technol* 24(2):114–118
- Maderuelo-Sanz R, Martín-Castizo M, Vilchez-Gómez R (2011) The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. *Appl Acoust* 72:823–828
- Maderuelo-Sanz R, Nadal-Gisbert AV, Crespo-Amorós JE, Parres-García F (2012) A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Appl Acoust* 73:402–408
- Maderuelo-Sanz R, Barrigon JM, Martín-Castizo M, Gómez V, Rey G (2013) Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. *Lat Am J Solids Struct* 10:585–600
- Oldham DJ, Egan CA, Cookson RD (2011) Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Appl Acoust* 72:350–363
- Pereira H (2007) *Cork: biology, production and uses*. Elsevier, Amsterdam
- Rives J, Fernandez-Rodriguez I, Gabarrell X, Rieradevall J (2012) Environmental analysis of cork granulate production in Catalonia—Northern Spain. *Resour Conserv Recycl* 58:132–142
- Vasina M, Hughes DC, Horoshenkov KV, Lapčík L Jr (2006) The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl Acoust* 67:787–796
- Voronina NN, Horoshenkov KV (2003) A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media. *Appl Acoust* 64:415–432
- Voronina NN, Horoshenkov KV (2004) Acoustic properties of unconsolidated granular mixes. *Appl Acoust* 65:673–691



The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction

Rubén Maderuelo-Sanz^{a,*}, Manuel Martín-Castizo^a, Rosendo Vílchez-Gómez^b

^a Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción, INTROMAC, Campus Universidad de Extremadura, 10071 Cáceres, Spain

^b Universidad de Extremadura, E.P.C.C., Campus Universidad de Extremadura, 10071 Cáceres, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 August 2010
Received in revised form 3 May 2011
Accepted 9 May 2011
Available online 8 June 2011

Keywords:

Impact sound insulation
Recycled rubber
Mechanical properties
Acoustical properties

ABSTRACT

This paper reports an investigation of a new kind of material and its acoustical performance. The potential of recycled materials made from rubber fluff for reducing impact noise was assessed according to EN ISO 140-8:1997. The performance of these materials was compared to those of some commercially available underlays.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Noise pollution has a significant impact on human quality of life. Noise and vibration are increasing in prevalence in developing and developed societies. Some authors have proposed to use recycled products to provide alternatives to existing products in a great number of commercial and environmental noise control applications, including building, automotive and business services areas and traffic noise abatement [1–4]. Recent studies have shown that recycled polymeric granulates from the recycling of products from end of life tires (ELTs) may be formed into materials that have desirable acoustic and physical properties. The recycling of these products is a pending issue, particularly in developing countries [1–3]. Thus, the use of this type of waste to produce sound absorbers or resilient underlays could solve two environmental problems, noise and environmental pollution. As an example, Miraftab et al. [5] and Taylor [6] suggested a process that could form carpet waste into a viscoelastic material that had potential applications as a carpet underlay material. Rushforth et al. [7] found that underlay samples produced using the optimum grain:fibre ratio presented excellent sound insulation performance in impact loading comparable with some commercial products. Another study conducted by Swift et al. [8] showed that these materials can effectively absorb sound if the size of the aggregate and the binder content are carefully selected and its thickness is tuned to the frequency range of interest. Pfretzschner and Rodríguez [9] verified that rubber

crumbs, specially sorted and prepared, can be a good sound absorber with a broadband absorption spectrum.

In the case of impact sound insulation, floating floors are one of the most effective solutions [10,11] and are frequently used in multi dwelling buildings to reduce floor impact noise. For the proper design of the floating floor, it is essential to understand how floating floors can reduce noise and vibration and how the changes of parameters such as density, dynamic stiffness and compressibility of the layer affect its performance [12]. The basic concept and mathematical model for a floating floor may be found in the book by Cremer et al. [13]. Different types of floating floors can be used for impact sound insulation, including lightweight and heavy-weight floors [14–16].

The purpose of this paper is to experimentally investigate the acoustical properties of new underlays made from granulated rubber from automotive tires and to use the experimental results obtained in the laboratory to develop a new resilient underlay. Subsequently, a comparison with some of the typical commercially available acoustical underlays in Spain was conducted.

2. Materials

The main raw material used was the fluff, with different particle sizes, from the shredding of tires of heavy vehicles. This product is composed of an elastomeric waste called ground tire rubber (GTR). Other materials used in the layers were vermiculite, expanded polystyrene (EPS) and cement mortar.

These materials were mixed with high viscosity polyurethane resins (SikaBond T53 manufactured by Sika) as a binder, in a range

* Corresponding author. Tel.: +34 927181042; fax: +34 927181041.

E-mail address: rmaderuelo@intromac.com (R. Maderuelo-Sanz).

of proportions of 7–15%. This kind of binder was used because of its high viscosity. The use of binders with low viscosity is not recommended because they reduce the porosity and make it very difficult to mix the rubber fluff with the binder efficiently. Table 1 shows the formulations of recycled underlay samples with the physical properties of recycled and commercial underlays.

The manufacturing process can be summarised as follows. All components were mixed in their respective proportions, as shown in Table 1, in the temperature range of 20–30 °C and this mixture was applied with an airless gun with a special tip. The test specimens were square, 200 × 200 mm² in area, with a different thickness for each layer.

3. Experimental methodology

3.1. Physical properties

The connected porosity was measured non-acoustically using the method of water saturation as indicated by Vasina et al. [17]. All samples were dried at 65 °C for 15 days. Then, they were weighed before being wrapped in a thin water-tight film and left under water (the density of water is $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) in a vacuum vessel to saturate. After 24 h, they were carefully removed and weighed again. The porosity was computed by $\Omega = V_w/V_s$, where V_w is the volume in the sample occupied by the water and V_s is the total volume of the sample. The volume of water can be found as $V_w = (m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}})/\rho_w$, where m_{wet} and m_{dry} are the wet and dry masses of the sample, respectively.

3.2. Mechanical properties

To evaluate the mechanical properties of different layers, the dynamic stiffness and compressibility were measured according to Standard EN 29052-1 [18] and Standard EN 12431 [19], respectively.

The apparent dynamic stiffness was determined in the laboratory according to Standard EN 29052-1. In this test, a specimen of the material is placed on the rigid floor and a rigid load plate is placed on top of it. A plastic thin film (less than 0.02 mm in thickness) and a plaster film (less than 5 mm) are placed between the specimen and the load plate to compensate for all irregularities of the surface. A piezoelectric accelerometer (Brüel & Kjær, type 4507B 005) is placed at the centre of the top of the load plate. The total weight on the top of the samples should be $8.0 \pm 0.5 \text{ kg}$.

The load plate is excited by an impulsive signal generated by a plastic-headed and a soft rubber-headed hammer (Endevco, type 2302-100, 220 N range, sensitivity 22.7 mV/N and frequency range 8 kHz) to obtain different kinds of excitation in different frequency bands. The modal hammer produces an impulse force at one hit, which excites the structure with a constant force over the

frequency range of interest. The waveform produced by the modal hammer is an impact transient (short duration) energy transfer event. Its spectrum is continuous with a maximum amplitude at 0 Hz and decaying amplitude with increasing frequency until 8 kHz. This impulse force has information, acceleration response, between 0 Hz to 8 kHz, but the useful frequency range is 0 Hz–5 kHz. For frequencies higher than 5 kHz, the energy is low and thus, it is difficult to excite any resonant mode frequencies.

The frequency bandwidths excited for the plastic-headed and rubber-headed mallets are in the range 0–200 Hz. The 200 Hz baseband analysis corresponds to a sampling rate of 512 points per second (1.953125 ms) and the total data acquisition time should be 8 s for the 4096 points necessary to produce 1600 frequency lines. This maximum number of frequency lines is required if the specified frequency resolution of 0.125 Hz is to be obtained for a 200 Hz baseband analysis ($200 \text{ Hz}/1600 = 0.125 \text{ Hz}$).

The pulses were detected using an accelerometer with a voltage sensitivity of 1064 mV/g. The input and output signals were analysed with a portable Brüel & Kjær PULSE System with four input data channels (type 3560-C).

Using the resonance frequency, according to the standard EN 29052-1 [18], it is possible to evaluate the dynamic stiffness per unit area of the specimen with this expression:

$$s' = (2\pi f_r)^2 m \quad (1)$$

where f_r is the resonance frequency measured (Hz) and m is the mass per unit area of the loading mass (kg/m^2).

Standard EN 12431 provides a method to determine the thickness for floating floor insulating products. For compressibility, 200 × 200 mm² specimens were used. The specimens were evaluated under three static loads with a loading–unloading cycle at short intervals. A correct determination requires testing different static loads on the sample. The specimen must expand freely without any friction. The compressibility c is the absolute difference between d_L and d_B , where d_L is the thickness under static load, 0.25 kPa after 120 s, and d_B is the thickness after a sequenced cycle of loads: 2 kPa (after 120 s), 50 kPa (after 120 s) and 2 kPa (after 120 s). A universal test machine Shimadzu SERVOPULSER U Series Body Frame (max. force 100 kN) operating under load control was used to determine these thicknesses.

Schiavi et al. [11] defined a non-dimensional quantity, namely, a resilient layer thickness percentage decrease:

$$h(c) = 100 \cdot \left(1 - \frac{d_B}{d_L}\right) \quad (2)$$

The relative thickness indicates the quantity, in percentage, of the deformation not recovered at the end of the measurement cycle.

Table 1
Layer components of recycled and commercial underlays and their physical properties.

Sample	GTR grain size (mm)	Underlay components	Density (kg/m^3)	Thickness (mm)	Porosity Ω
M1	<2.0	GTR (50%)/Vermiculite (20%)/EPS (20%)	429.5	10.9	0.62
M2	<3.5	GTR (90%)	430.9	12.0	0.60
M3	0.5–1.0	GTR (85%)	570.0	10.1	0.36
M4	1.0–3.0	GTR (85%)	558.5	9.9	0.54
M5	1.0–3.0	GTR (93%)	544.7	9.8	0.59
M6	0.5–1.0	GTR (90%)	594.6	9.9	0.27
M7	<0.5	GTR (90%)	398.0	10.2	0.31
M8	<2.0	GTR (40%)/Cement mortar (60%)	284.7	10.0	0.23
Impactodan 10	–	Reticulated polyethylene	21.8	10.0	–
Texsilen plus	–	Expanded closed-cell polyethylene	29.0	5.0	–
Trosilen AL-3	–	Expanded polyethylene with aluminium film	48.3	3.0	–
Inasonic 120/20	–	Expanded polyurethane foam	152.6	20.0	–

3.3. Impact sound insulation

To evaluate the theoretical acoustical performance of the different materials, Cremer's model was used [13]. In this model, the basic floor and the top floor are assumed to be two infinitely large and homogeneous slabs, coupled together with an elastic layer characterised only by its stiffness. The impact sound improvement, ΔL , is defined as the difference in the radiated sound power from the primary construction applying the force directly on it and then to the floating slab [20]. Cremer showed that

$$\Delta L = 40 \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 20 \cdot \log\left[1 + \frac{j \cdot 2\pi f m_h}{Z_1}\right] \quad (3)$$

where f is the third-octave centre frequency (Hz), f_0 is the resonance frequency of the mass-spring system (Hz), m_h is the mass of the hammer and Z_1 is the mechanical point impedance of the floating slab. This resonance frequency can be expressed as

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (4)$$

where s' is the dynamic stiffness (N/m³) and m' is the mass per unit area of the floating slab (kg/m²).

For heavy floating slabs, such as concrete, the second term in Eq. (4) can be neglected, thereby obtaining an improvement in the impact sound insulation of 12 dB per octave. However, this assumption on the local reaction for both slabs is not valid in practice for such floating floor constructions because the improvements obtained are never as high as those predicted by this equation [20]. Standard EN 12354-2 [21] proposes a modified version of Eq. (4), where the constant 40 is replaced with 30 (experimental measurements suggest that this constant is more accurate), thereby reducing the frequency dependence to 9 dB per octave. This equation can be expressed as

$$\Delta L = 30 \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (5)$$

This improvement in the impact sound isolation of a floating floor as a function of the frequency has a positive 30 dB/decade slope from the resonance frequency [22]. The limitations of this equation are the compressibility of the layers and the frequency dependence with time. A resilient layer in a floating floor with high compressibility can suffer deflection under the slab weight, causing fiber breakage and decreasing its thickness, which can cause an increase in the relative dynamic stiffness and worsening of the acoustical properties of the insulation layer, as shown by Schiavi et al. [22].

To compare the theoretical and real performance of these layers, the measurements of the impact sound reduction of floor coverings were conducted in compliance with EN ISO 140-8 [23]. In this test, the underlay sample is installed on a normalised concrete slab, which is designed to simulate a typical flooring system. The sample is then subjected to impacts of constant force from a tapping machine.

As established in the EN ISO 140-8 standard, the test was performed between two normalised rooms: the source room, where the normalised concrete slab was installed, and the room directly below, the receiving room. The volume of both rooms is 52.8 m³ and the common area is 12.1 m². The reference floor is a reinforced concrete slab with a thickness of 140 mm. Subsequently, a resilient continuous layer, applied with an airless gun with a special tip, and the floating floor (lightened concrete), which are 5 and 7 mm in thickness, respectively, are placed on the top of the structural slab. This layer dynamically decouples the structural slab from the floating slab.

The sound pressure level in the receiving room was measured with a normalised tapping machine (Brüel & Kjær, type 3207) placed in four different positions in the source room. The impact sound pressure levels were measured with a moving microphone (Brüel & Kjær, type 4189) in the receiving room for 1 min. A PULSE analyser (Brüel & Kjær, type 3560-B-030) measured the average sound levels. These levels were not corrected for the background noise due to their low level. The reverberation time in the receiving room was measured by considering 1 source position and 2 decays with 3 microphone positions. This procedure was conducted first without the resilient layer and later with the layer and the floating floor.

The values of the normalised sound impact pressure levels in third octave bands over the frequency range 100 Hz–5000 Hz were measured for the reference floor, L_{n0} , and for the reference floor with a new layer, L_n . The impact sound improvement ΔL is the difference between L_{n0} and L_n .

The single-number quantities, $L_{n,r,0,w}$ (the weighted normalised impact sound pressure level for the reference floor) and $L_{n,r,w}$ (the weighted normalised impact sound pressure level for the covered floor), were obtained after comparing the measured spectra against a reference curve (defined in Table 3 in EN ISO 717-2 [24] for impact sound insulation). For the values of the impact sound improvement obtained from Cremer's model, $L_{n,r,0,w}$ is defined in Table 4 according to EN ISO 717-2, and $L_{n,r,w}$ is the difference between $L_{n,r,0,w}$ and ΔL . The reference curve is shifted in steps of 1.0 dB against the measured curve until the sum of unfavourable derivations is as large as possible but no greater than 32 dB. The value of the reference curve at 500 Hz is calculated as $L_{n,r,0,w}$ and $L_{n,r,w}$.

The weighted impact sound improvement index ΔL_w is obtained in compliance with EN ISO 717-2 with the following expression:

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \quad (6)$$

where $L_{n,r,0,w}$ is the weighted impact sound pressure level for the reference floor and $L_{n,r,w}$ is the weighted impact sound pressure level for the reference floor with the new layer.

It is both time-consuming and expensive to conduct this standard on a large number of laboratory samples and thus, only specimens with the best laboratory performance were tested.

4. Results

4.1. Experimental tests in the laboratory

Due to the different microstructures of the samples, large differences were observed in their porosity values. This diversity is very interesting because it can provide very different porous microstructures and consequently different acoustical properties. This porosity is distributed between pores of different sizes (ranging from 1 μ m to 1 cm) into and between the particles and in the binder. The values obtained are shown in Table 1. The porosity decreased with the increase of the binder concentration. Sample M1 presented higher values of porosity because of the composition of the composite. Vermiculite and EPS contributed to the porosity with micropores, and their presence resulted in the increased overall porosity of the granular mix. The GTR grain size and binder in Sample M2 determined the value of its porosity. Samples M4 and M5 presented a similar porosity attributed to a relatively high proportion of larger grains in the mix. The other samples had low porosity because the voids between individual grains were filled by the binder.

Fig. 1 shows the impact test results according to Standard EN 29052-1 for new layers. The resonance frequencies are between

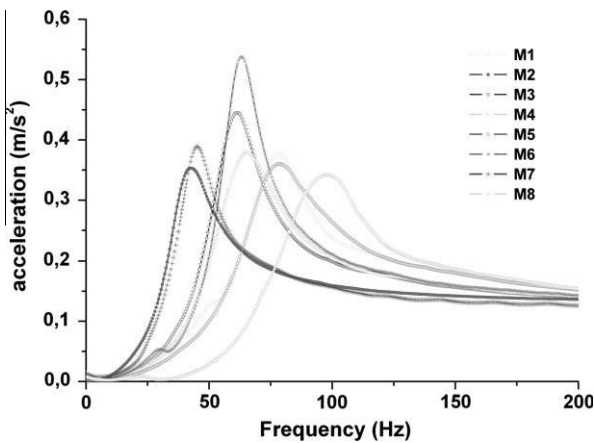


Fig. 1. Frequency response function according to impact tests in the low frequency region for new resilient layers composed of recycled rubber fluff.

42.5 and 100.2 Hz. These values are comparable to the values obtained from commercial layers tested under the same conditions. The resonance frequencies and therefore the dynamic stiffness are comparable between the commercial underlays tested in the laboratory for this study and the new resilient layers, as shown in Fig. 2 and Table 2. It should be noted that one of the commercial products, Inasonic 120/20, has a thickness greater than that of the recycled underlays. Samples M2 and M7 have a weighted impact sound improvement index higher than that of the commercial product Inasonic. Nevertheless, layers with comparable thickness, M2–M7 and Impactodan 10, have a comparable weighted impact sound improvement index.

If the values of the predicted weighted impact sound improvement index and dynamic stiffness are compared between the new layers and the existing materials used in the construction industry (not tested for this paper), they are fairly satisfactory and show that it is possible to use these new layers to produce quality acoustical underlays with impact sound insulation characteristics comparable to commercial layers (Table 2). Values of the dynamic stiffness from new resilient layers are between 14.3 and 49.2 and values of some of the commercial underlays tested are between 7.9 and 124.4.

In addition to dynamic stiffness, the compressibility is also an important aspect of impact sound insulation in layers because the mechanical deformation of resilient materials reduces their

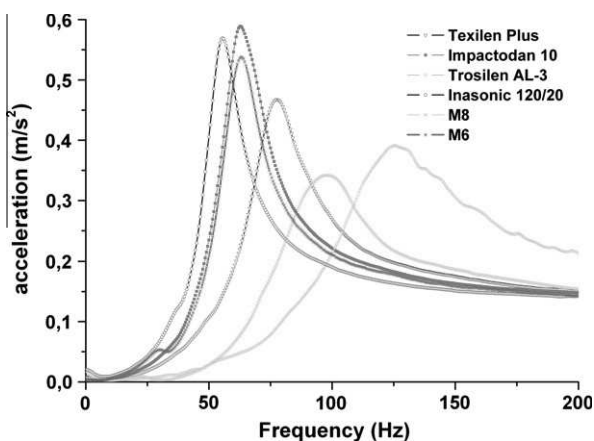


Fig. 2. Frequency response function according to impact tests in the low frequency region for samples M8, M6 and commercial layers tested in the laboratory for this paper.

Table 2

Dynamic stiffness, impact sound improvement index, layer components and thickness of recycled and existing commercial underlays. The manufacturer is shown in brackets.

Sample	σ (MN/ m ³)	ΔL_w (dB)	Underlay components	Thickness (mm)
M1	48.5	23	GTR (50%)/vermiculite (20%)/EPS (20%)	10.9
M2	14.3	31	GTR (90%)	12.0
M3	29.9	26	GTR (85%)	10.1
M4	33.4	25	GTR (85%)	9.9
M5	48.5	23	GTR (93%)	9.8
M6	31.3	25	GTR (90%)	9.9
M7	16.0	30	GTR (90%)	10.2
M8	49.2	22	GTR (40%)/Cement mortar (60%)	10.0
Texsilen plus 5 (TEXSA) ^a	47.4	23	Expanded closed-cell polyethylene	5.0
Trosilen AL-3 ^a	124.4	16	Expanded polyethylene with aluminium film	3.0
Inasonic 120/20 (INASEL) ^a	24.3	27	Expanded polyurethane foam	20.0
ImpactoDAN (DANOSA) ^a	31.3	25	Reticulated polyethylene	10.0
ConforDAN (DANOSA) [25]	100.0	18	Reticulated closed-cell polyethylene	3.0
ChovAIMPACT plus (ChovA) [26]	24.0	24	Polyethylene closed-cell	9.0
ChovAIMPACT AR 10 (ChovA) [26]	7.9	20	Not reticulated closed-cell polyethylene	10.0
ChovAIMPACT AR 5 (ChovA) [26]	32.0	20	Not Reticulated closed-cell polyethylene	5.0
Panel PST (ISOVER) [27]	17.0	22	Rockwool	22.0
Ultracoustic Floor TP (Knauf) [28]	27.0	–	Mineral wool agglomerated with resin	20.0
Ultracoustic Floor TPT 01 (Knauf) [28]	10.0	–	Mineral wool	20.0

^a Samples of commercial layers tested in the laboratory for this paper.

dynamic stiffness and therefore reduces their acoustical properties. Table 3 shows the compressibility and relative thickness (values obtained from Eq. (2)), which indicate the quantity, in percentage, of the deformation not recovered at the end of the measurement cycle for each sample. The values of compressibility demonstrate the remarkable ability of samples M1–M7 to resist great loads and thickness variation percentages and indicate an excellent resistance against collapsing loading.

These polymer materials have interesting damping properties, and thus, the Young's modulus and the loss factor were studied, and the resonance frequencies, dynamic stiffness and damping ratio were measured by the frequency response function. With the Half-Power Point Method, the damping ratio is estimated in the frequency domain by means of the resonance frequency breadth:

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2 \cdot f_0} = \frac{f_2 - f_1}{2 \cdot f_0} \quad (7)$$

where f_2 and f_1 are the frequencies for which the acceleration level decreases by 3 dB from the peak value at the resonance frequency f_0 . It is often useful to relate the loss factor to the damping ratio. The loss factor, η , converts the vibration energy into heat, and thus,

Table 3

Compressibility and decrease in resilient layer thickness percentage.

Sample	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
c (mm)	0.7	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.5	2.5
h (c) (%)	6.5	2.5	3.0	2.1	1.0	2.0	5.0	25.5

it is desirable for materials to have high internal losses for sound insulation. The loss factor can be approximated from the damping ratio (obtained from Eq. (7)) and computed by $\eta = 2\zeta$. The Young's modulus can be estimated by considering that the dynamic stiffness is inversely proportional to the thickness of the specimen:

$$E = s' \cdot d \tag{8}$$

where s' is dynamic stiffness (N/m^3) and d is the thickness of the specimen (m).

The values obtained for the loss factor and the real part of the Young's modulus are shown in Table 4. Values for the loss factor are between 0.17 and 0.49. It would be expected that a combination of a relatively low Young's modulus (low dynamic stiffness) and high loss factor is necessary for good impact sound insulation. This optimum combination of parameters was found in samples M2 and M7. Sample M8 had the lowest values for the loss factor and one of the highest Young's moduli, which is consistent with the assumption that a layer with a combination of a high loss factor and low Young's modulus will provide good impact sound insulation performance [7].

These results suggest that the use of these new layers can replace the use of commercial underlays and, in some cases, improve the performance impact sound insulation in flooring applications with lower thickness and higher airborne sound insulation.

4.2. Comparison between prediction and laboratory tests in a normalised room

For the study of the performance of these new layers in buildings, after the study of small specimens in the laboratory, two samples were tested in a normalised room. These two samples were M6 and M8. These samples were tested due to their low cost to manufacture and, in the case of sample M6, its good results. These tests were carried out in compliance with EN ISO 140-8 with a thickness of approximately 10 mm.

Fig. 3 shows the results of these tests. For sample M6, two tests were conducted, one with 5 mm and the other with 7 mm of compression mortar in the top of the floor, to evaluate its performance with different masses. The impact sound improvement from the prediction according to Cremer's model and the experimental values for sample M6 were observed. The prediction is slightly higher than the experimental results as expected, but it is very interesting to see that the values of sample M6 with 7 mm of compression mortar are lower than the values of sample M6 with 5 mm of compression mortar. The reason could be the stiffness of the system, which increased in the case of the system with 7 mm of compression mortar.

Fig. 3 shows that the frequency dependence between frequencies 100 Hz and 1600 Hz is very close to 9 dB per octave. The curve follows the 30 dB/decade slope as predicted by Eq. (5). At a

Table 4
Loss factor (obtained from Eq. (7)) and real part of the Young's modulus (obtained from Eq. (8)) for new resilient underlays.

Sample	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
η	0.34	0.49	0.33	0.43	0.46	0.26	0.36	0.17
E (Pa)	5.3×10^5	1.7×10^5	3.0×10^5	3.3×10^5	4.8×10^5	3.1×10^5	1.6×10^5	4.9×10^5

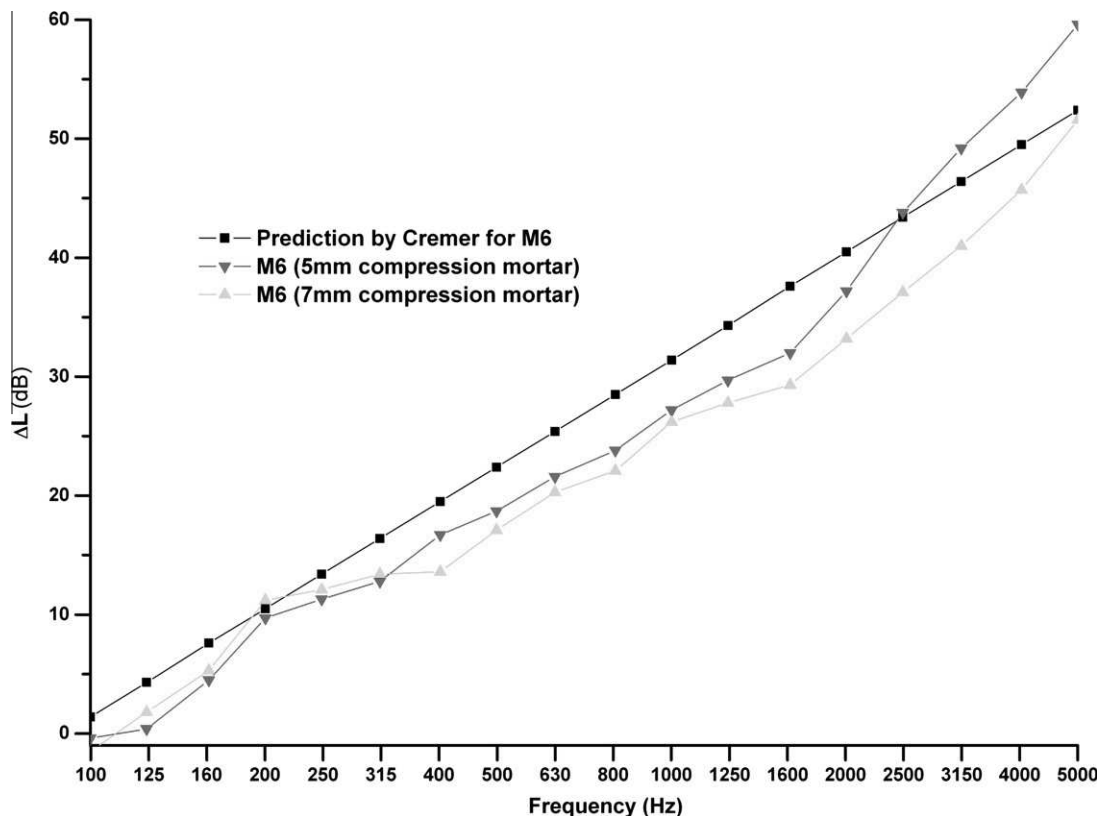


Fig. 3. Measured and predicted values of the improvement in terms of impact sound pressure level for sample M6.

frequency of 1600 Hz, there is a transition from 9 dB per octave to 18 dB per octave. At higher frequencies, above 2 kHz, higher values of impact sound improvement could be explained by a resonance frequency of approximately 2500 Hz. The weighted impact sound improvement index for both cases was 21 and 23 dB, respectively.

For sample M8, there is a great difference between the predicted and experimental values. The manufacture of the layer in the normalised room was incorrect due to its application. The impact sound improvement index for this case was 10 dB, which is very different than the predicted value because the normalised sample M8 was not up to the standard and the related measurements were therefore dismissed.

5. Conclusions

It has been demonstrated that elastomeric waste, called ground tire rubber (GTR), can be recycled into acoustical underlay products that can adequately compete with commercially available acoustical products and, in some cases, show better performance than conventional layers in terms of their acoustical properties. These resilient underlays show good performance results in standard laboratory tests when compared with the other existing underlays. Resilient layers, composed of only GTR and a binder, present better results than others with more components, that is, samples M1 and M8.

Comparisons between the commercial and new acoustic materials demonstrated that the latter can replace commercial products, in some cases, with better sound insulation performance and at a lower thickness. Application of these products with an airless gun with a special tip is different than the old method of application, which covers the entire floor without discontinuities.

To summarise, this study demonstrated that it is possible to have new resilient layers to produce quality acoustical products with an advantageous impact and superior airborne sound insulation characteristics.

Acknowledgements

This research was sponsored by III Regional Plan of Investigation, Research and Innovation (III PRI+D+I, 2005–2008) from 2° Vice-presidency and Regional Office of Economics, Trade and Innovation of the Government of Extremadura, with number PDT08A065. The authors are grateful to Iberian Technology, S.L. and the reviewers for their valuable comments.

References

- [1] Fang Y, Maosensheng Z, Wang Y. The status of recycling of waste rubber. *Mater Des* 2001;22(2):123–8.
- [2] Sunthonpagasit N, Duffey MR. Scrap tires to crumb rubber: feasibility analysis for processing facilities. *Resour Conserv Recycl* 2004;40(4):281–99.
- [3] Hyun J, Sung C, Yong S, Woo K. Status of recycling end-of-life vehicles and efforts to reduce automobile shredder residues in Korea. *J Mater Cycles Waste Manage* 2007;9(2):159–66.
- [4] Zhou H, Li B, Huang G, He J. A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J Sound Vib* 2007;304:400–6.
- [5] Mirafab M, Horrocks R, Woods C. Carpet waste, an expensive luxury we must do without. *AUTEX Res J* 1999;1:1–7.
- [6] Taylor A. Novel underlays from carpet waste. PhD thesis. University of Bolton: UK; 2004.
- [7] Rushforth IM, Horoshenkov KV, Mirafab M, Swift MJ. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Appl Acoust* 2005;66:731–49.
- [8] Swift MJ, Bris P, Horoshenkov KV. Acoustic absorption in recycled rubber granulates. *J Sound Vib* 1999;57:203–12.
- [9] Pfretzschner J, Rodríguez RM. Acoustic properties of rubber crumbs. *Polym Test* 1999;18(2):81–92.
- [10] Schiavi A, Belli AP, Corallo M, Russo F. Acoustical performance characterization of resilient materials used under floating floors in dwellings. *Acta Acust United Acust* 2007;93:477–85.
- [11] Schiavi A, Belli AP, Russo F, Corallo M. Acoustical and mechanical characterization of an innovative expanded sintered elasticized polystyrene (EPS-E) used as underlayer in floating floors. In: *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics*; 2007.
- [12] Sun-Il C, Ho-Hwan C. Insertion loss prediction of floating floors used in ship cabins. *Appl Acoust* 2008;69:913–7.
- [13] Cremer L, Heckl M, Ungar EE. *Structure borne sound: structural vibrations and Sound radiation at audio frequencies*, Springer; 1988.
- [14] Hui CK, Ng KCF. New floating floor design with optimum isolator location. *J Sound Vib* 2007;193(1):175–84.
- [15] Hopkins C, Hall R. Impact sound insulation using timber platform floating floors on a concrete floor base. *Build Acoust* 2006;12:273–84.
- [16] Stewart M, Craik R. Impact sound transmission through a floating floor on a concrete slab. *Appl Acoust* 2000;59:353–72.
- [17] Vasina M, Hughes DC, Horoshenkov KV, Lapcik Jr L. The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl Acoust* 2006;67:787–96.
- [18] EN 29052-1. Acoustics: determination of dynamic stiffness. Part 1: Materials used under floating floors in dwellings; 1992.
- [19] EN 12431. Thermal insulating products for building applications. Determination of thickness for floating floor insulating products; 1998.
- [20] Vigran TE. *Building acoustics*. Taylor & Francis; 2008.
- [21] EN 12354-2. Building acoustics: estimation of the acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms; 2000.
- [22] Schiavi A, Belli AP, Russo F. Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. *Build Acoust* 2005;12(2):99–113.
- [23] EN ISO 140-8. Acoustics: measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor; 1997.
- [24] EN ISO 717-2. Acoustics rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation; 1996.
- [25] Danosa. <http://portal.danosa.com/danosa/> [accessed 28.01 11].
- [26] Chova. <http://www.chova.com/esp/productos.asp> [accessed 28.01 11].
- [27] Isover. <http://www.isover.net/productos/ing/ingles.htm> [accessed 28.01 11].
- [28] Knaufinsulation. http://www.knaufinsulation.es/files/ki_es/upload/documents/ [accessed 28.01 11].