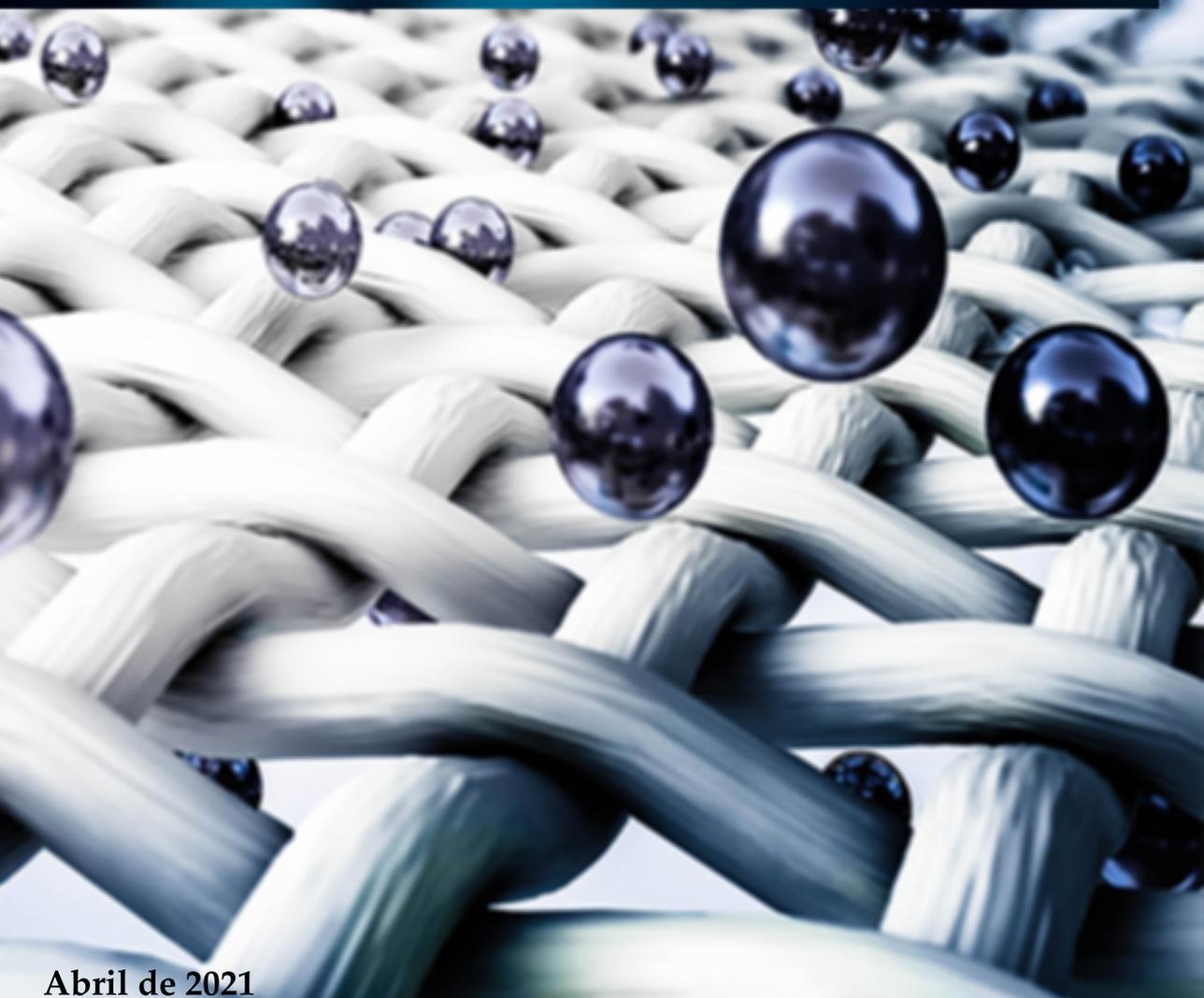


ESTUDIO, MODELADO Y CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE NUEVAS SOLUCIONES EN BASE A TEJIDOS TEXTILES

Roberto Atiénzar Navarro



Abril de 2021

Directores:

R. M^a. del Rey Tormos
R. Picó Vila



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Departamento de Física Aplicada



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**Estudio, modelado y caracterización
acústica de nuevas soluciones en base a
tejidos textiles**

TESIS DOCTORAL

Programa de Doctorado en Diseño, Fabricación y Gestión de
Proyectos Industriales

Presentada por:

Roberto Atiénzar Navarro

Dirigida por los Doctores:

Dra. Romina M^a. del Rey Tormos

Dr. Rubén Picó Vila

València, abril de 2021



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

© Imagen de portada: Allan Swart (123RF Europe BV)

©Autores: Roberto Atiénzar Navarro, Romina M^a. del Rey Tormos y
Rubén Picó Vila

“Life can only be understood backwards; but it must be lived forwards”.

Søren Kierkegaard
(1813–1855)

38°54'49.7" N 0°07'19.7" W

"Aquí crecí yo, en Oliva, mi tierra, junto a mis padres y mis hermanos".

Rober AN

Agradecimientos

Esta Tesis se ha llevado a cabo en el Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras de la Universitat Politècnica de València.

Se ha recorrido un camino duro, largo y difícil para llegar hasta aquí. En primer lugar, me gustaría agradecer esta tesis doctoral a todas aquellas personas que lucharon en primera línea contra la pandemia Covid-19. Juntos pudimos detener este virus y frenar la curva con sonrisas. Las personas que murieron durante la pandemia siempre permanecerán en nuestros corazones.

Mención especial a mis directores de Tesis, Dr. R. Picó–Vila y Dra. R. M^a. del Rey–Tormos por su esfuerzo, dedicación, paciencia y apoyo a lo largo de esta tesis doctoral. Gracias por darme la oportunidad de crecer profesional y personalmente en el campo de investigación de tejidos textiles.

Me gustaría agradecer a la Dra. M^a. Bonet–Aracil y al Dr. J. Gisbert–Payá del Departamento de Ingeniería Textil y Papelera de la Universitat Politècnica de València por su apoyo y asesoramiento recibido durante estos años en el campo de la industria textil. Al Dr. J. Alba–Fernández, al Dr. V. J. Sánchez–Morcillo y al Dr. J. A. Martínez–Mora del Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València por su disposición a ayudarme y por sus sabios consejos.

A mi compañero de batalla, J. C. Rodríguez–Vercher, por sus innumerables consejos tanto en Matlab como en aspectos profesionales. Gracias por acogerme en el laboratorio, desde ese

momento hemos compartido muchos cafés tratando innumerables temas.

A lo largo de esta Tesis he compartido muchas experiencias y viajes con amigos. A todos ellos, muchas gracias por la comprensión durante mi ausencia en más de una ocasión y por todo el apoyo recibido.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, los Atiénzar y los Navarro, especialmente a mis padres, Vicenta y Paco, a mis hermanas Bea y Patri, a mis hermanos Marcial y Fran y a mis sobrinos Noa, Paula, Khloe Kimberley, Kyrian y Kevin Bryan.

Solo me queda agradecer a Alba Gilabert–Milla, a quien dedico esta tesis doctoral. Mi apoyo incondicional, mi motivación y mi amor. Gracias por tu paciencia y por darme ánimo y energía en este largo viaje.

Roberto Atiénzar Navarro
Oliva, abril de 2021

Resumen

Este trabajo de Tesis se centra en el estudio, modelado y caracterización acústica de nuevas soluciones basadas en tejidos textiles, partiendo de condiciones de sostenibilidad. Para ello, se han llevado a cabo cuatro líneas de investigación a fin de analizar el comportamiento acústico de nuevas soluciones basadas en tejidos textiles procedentes de la industria textil, a partir de modificaciones o combinaciones estructurales de los mismos.

En esta Tesis se ha estudiado la estructura de la fibra textil a partir del análisis de los parámetros macroestructurales de la fibra, como la finura, la longitud y la sección transversal. Además, se ha investigado el grado de influencia de estos parámetros sobre la absorción acústica. Se pudo evidenciar que la finura de la fibra tiene una influencia significativa en la absorción acústica en comparación con la longitud de fibra. Además, las fibras huecas tienen un mejor comportamiento acústico, comparado con las fibras sólidas. Una vez analizada la estructura y la composición de la fibra, se adhirieron microcápsulas en la superficie de los tejidos textiles a fin de aumentar la absorción acústica de éstos. Para ello, se han considerado distintas posibilidades de diseño según el tipo de tejido base usado, la homogeneidad de los tejidos de base dopada y la concentración de microcápsulas. Además, se ha utilizado un modelo de membrana con la finalidad de predecir el comportamiento acústico de tejidos textiles dopados con microcápsulas. En este estudio se pudo comprobar que la absorción acústica está influenciada por el dopaje de los tejidos con MCCs. Seguidamente, se combinaron tejidos textiles con otros materiales con el objetivo de disponer de absorción selectiva o de aumentar la

absorción acústica en el rango de frecuencias de trabajo. Asimismo, se ha pretendido observar el efecto acústico de espumas tradicionales perforadas mediante diferentes tecnologías. Además, se han utilizado modelos de doble porosidad y métodos numéricos con la finalidad de validar los resultados obtenidos experimentalmente. Se pudo comprobar que la absorción acústica del sistema tejido-espuma perforada depende ligeramente del textil usado. Además, se obtuvo gran concordancia entre los valores predichos y experimentales. Finalmente, se ha analizado la influencia de la estructura del tejido. Se ha investigado el efecto acústico producido por los parámetros geométricos, utilizados en el diseño de tejidos plegados, como la longitud del pliegue, el número de pliegues, la distancia entre pliegues consecutivos o la altura del pliegue. Se ha pretendido, mediante cambios en la estructura del tejido textil, obtener valores de absorción típicos de un material acústico. Además, se ha utilizado un modelo de membrana permeable plegada con el fin de predecir el coeficiente de absorción acústica en campo difuso. En este estudio se pudo comprobar que los tejidos plegados presentan un mayor coeficiente de absorción acústica en medias y altas frecuencias, tanto en incidencia normal como en incidencia aleatoria. Además, a menor número de pliegues, se consiguen valores más elevados de absorción acústica en todo el margen frecuencial.

Resum

Aquest treball de Tesi es centra en l'estudi, modelat i caracterització acústica de noves solucions basades en teixits tèxtils, partint de condicions de sostenibilitat. Per a això, s'han dut a terme quatre línies de recerca per tal d'analitzar el comportament acústic de noves solucions basades en teixits tèxtils procedents de la indústria tèxtil, a partir de modificacions o combinacions estructurals dels mateixos.

En aquesta Tesi s'ha estudiat l'estructura de la fibra tèxtil a partir de l'anàlisi dels paràmetres macroestructurals de la fibra, com la finor, la longitud, i la secció transversal. A més a més, s'ha investigat el grau d'influència d'aquests paràmetres sobre l'absorció acústica. Es va poder evidenciar que la finor de la fibra té una influència significativa en l'absorció acústica en comparació amb la longitud de fibra. A més, les fibres buides tenen un millor comportament acústic, comparat amb les fibres sòlides. Una volta analitzada l'estructura i la composició de la fibra, es van adherir microcàpsules en la superfície dels teixits tèxtils a fi d'augmentar l'absorció acústica d'aquests. Per a això, s'han considerat diferents possibilitats de disseny segons el tipus de teixit bàsic emprat, l'homogeneïtat dels teixits de base dopada i la concentració de microcàpsules. A més a més, s'ha utilitzat un model de membrana amb la finalitat de predir el comportament acústic de teixits tèxtils dopats amb microcàpsules. En aquest estudi es va comprovar que l'absorció acústica està influenciada pel dopatge dels teixits amb MCCs. Seguidament, es van combinar teixits tèxtils amb

altres materials amb l'objectiu de disposar d'absorció selectiva o d'augmentar l'absorció acústica en el rang de freqüències de treball. Així mateix, s'ha pretès observar l'efecte acústic d'espumes tradicionals perforades mitjançant diferents tecnologies. A més a més, s'han utilitzat models de doble porositat i mètodes numèrics amb la finalitat de validar els resultats obtinguts experimentalment. Es va comprovar que l'absorció acústica de sistema teixit-espuma perforada depèn lleugerament del tèxtil usat. A més, es va obtenir gran concordança entre els valors predits i experimentals. Finalment, s'ha analitzat la influència de l'estructura del teixit. S'ha investigat l'efecte acústic produït pels paràmetres geomètrics, utilitzats en el disseny de teixits plegats, com la longitud del plec, el nombre de plecs, la distància entre plecs consecutius o l'alçada del plec. S'ha pretès, mitjançant canvis en l'estructura del teixit tèxtil, obtenir valors d'absorció típics d'un material acústic. A més a més, s'ha utilitzat un model de membrana permeable plegada per tal de predir el coeficient d'absorció acústica en camp difús. En aquest estudi es va poder comprovar que els teixits plegats presenten un major coeficient d'absorció acústica en mitges i altes freqüències, tant en incidència normal com en incidència aleatòria. A més, a menor nombre de plecs, s'aconsegueixen valors més elevats d'absorció acústica en tot el marge freqüencial.

Abstract

This thesis work focuses on the study, modelling and acoustic characterization of new solutions based on textile fabrics, starting from conditions of sustainability. To this end, four lines of research have been carried out in order to analyse the acoustic behaviour of new solutions based on textile fabrics from the textile industry.

In this Thesis, the structure of the textile fibre has been studied from the analysis of the macrostructural parameters of the fibre, such as fineness, length, and cross section. Furthermore, the degree of influence of these parameters on acoustic absorption has been investigated. It could be shown that the fineness of the fibre has a significant influence on the acoustic absorption compared to the length of the fibre. In addition, hollow fibres have a better acoustic behaviour, compared to solid fibres. Once the structure and composition of the fibre had been analysed, microcapsules were adhered to the surface of the textile fabrics to increase their acoustic absorption. For this, different design possibilities have been considered according to the type of base fabric used, the homogeneity of the doped base fabrics and the concentration of microcapsules. In addition, a membrane model has been used to predict the acoustic behaviour of textile fabrics doped with microcapsules. In this study it was found that acoustic absorption is influenced by fabric doping with MCCs. Then, textile fabrics were combined with other materials in order to have selective absorption or to increase acoustic absorption in the range of working frequencies. In the same way, it has been tried to observe the acoustic effect of traditional foams perforated with

different technologies. In addition, double porosity models and numerical methods have been used to validate the results obtained experimentally. It was found that the acoustic absorption of the perforated fabric-foam system depends slightly on the textile used. In addition, great agreement was obtained between the predicted and experimental values. Finally, the influence of the fabric structure has been analysed. The acoustic effect produced by the geometric parameters used in the design of folded fabrics, such as the length of the fold, the number of folds, the distance between consecutive folds or the height of the fold has been investigated. It has been tried to obtain typical absorption values of an acoustic material through changes in the structure of the textile fabric. Furthermore, a folded permeable membrane model has been used to predict the acoustic absorption coefficient in diffuse field. In this study, it was found that folded fabrics have a higher acoustic absorption coefficient in medium and high frequencies, both in normal incidence and in random incidence. Furthermore, the fewer the folds, the higher the acoustic absorption values are achieved throughout the frequency range.

Índice de contenidos

Listado de tablas.....	v
Listado de figuras.....	vii
Listado de símbolos y abreviaturas.....	xv
Listado de publicaciones.....	xix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Objeto y antecedentes	1
1.2. Estructura de la tesis	5
1.3. Notas bibliográficas.....	6
Capítulo 2. Modelos y métodos	9
2.1. Introducción.....	10
2.2. Modelos para materiales fibrosos y porosos.....	13
2.2.1. Delany-Bazley.....	14
2.2.2. Johnson-Champoux-Allard.....	17
2.2.3. Material de doble porosidad.....	20
2.2.4. Pérdidas visco-térmicas	23
2.3. Membrana permeable	23
2.4. Método de la matriz de transferencia.....	26
2.5. Método de los elementos finitos	30

Capítulo 3. Métodos experimentales..... 37

3.1. Tubo de impedancia	38
3.1.1. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. Método de la función de transferencia	38
3.1.2. Resistividad al flujo. Método de Ingard & Dear	44
3.2. Cámara reverberante de tamaño reducido	47
3.2.1. Tiempo de reverberación y absorción acústica.....	49

Capítulo 4. Estructura de la fibra textil..... 53

4.1. Introducción	54
4.2. Fibras textiles.....	57
4.3. Resultados y discusión	60
4.3.1. Finura de la fibra	62
4.3.2. Longitud de la fibra	63
4.3.3. Sección transversal de la fibra	64
4.4. Conclusiones	66

Capítulo 5. Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles..... 70

5.1. Introducción	71
5.2. Materiales y métodos.....	73
5.2.1. Tejidos base	74
5.2.2. Dopado de tejidos	76
5.3. Resultados y discusión	79
5.3.1. Homogeneidad del proceso de dopado.....	80
5.3.2. Influencia del dopado en la absorción acústica.....	82
5.3.3. Comportamiento de membrana del tejido dopado	84
5.4. Conclusiones	87

Capítulo 6. Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles. 92

6.1. Introducción.....	93
6.2. Materiales y métodos	95
6.2.1. Tejidos textiles y RPU.....	95
6.2.2. Tecnología de perforación de la espuma y configuraciones de medida	97
6.3. Resultados y discusión.....	102
6.3.1. Influencia de la tasa y diámetro de perforación.....	103
6.3.2. Influencia del tejido textil sobre la espuma perforada.....	105
6.3.3. Validación numérica y teórica	107
6.4. Conclusiones.....	111

Capítulo 7. Tejidos textiles plegados 115

7.1. Introducción.....	116
7.2. Materiales y métodos	117
7.2.1. Tejido de algodón.....	118
7.2.2. Técnica de plegamiento	120
7.2.3. Campo difuso. Coeficiente de absorción acústica.....	123
7.2.4. Absorción acústica de membranas permeables plegadas	125
7.3. Resultados experimentales y validación de los modelos de membrana propuestos	128
7.4. Conclusiones.....	132

Capítulo 8. Conclusiones generales 135

Capítulo 9. Futuras líneas de investigación..... 138

Anexo A. Compendio de artículos.....	147
A.1. Influence of fineness, length and hollow section of fibres on the acoustic absorption	148
A.2. Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules ...	164
A.3. Sound absorption properties of perforated polyurethane foams reinforced with woven fabric.....	173
A.4. Influence of fabric folding geometry on the sound absorption ...	191
A.5. Absorción acústica de nuevos tejidos textiles.....	205
A.6. Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules	212
Anexo B. Listado de conferencias	221
Anexo C. Premios	222

Listado de tablas

Tabla 2.1. Modelos y métodos utilizados en cada uno de los capítulos. Delany-Bazley (DB), Johnson-Allard-Champoux (JCA), modelo para materiales de doble porosidad (DP), modelo de pérdidas visco-térmicas (MPV), modelo de membrana permeable (MMP), método de la matriz de transferencia (MMT) y método de los elementos finitos (MEF)	13
Tabla 2.2. Valores de los ocho coeficientes para el tejido textil seleccionado.....	16
Tabla 4.1. Referencia, descripción, características físicas y composición de las fibras textiles utilizadas en el estudio	58
Tabla 4.2. Especificaciones de las fibras acrílicas	61
Tabla 4.3. Especificaciones de las fibras de poliéster.....	61
Tabla 5.1. Espesor (mm), densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de los tejidos base analizados	76
Tabla 5.2. Valores de densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de las muestras de algodón, de espesor 0.3 mm, no dopadas y dopadas.....	83
Tabla 5.3. Valores de espesor (mm), densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de las muestras tipo T dopadas con 100 g/L.....	84
Tabla 6.1. Espesor (mm), densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de los tejidos T1 y T2	97
Tabla 6.2. Parámetros físicos correspondientes a las cuatro configuraciones de perforación analizadas	101

Tabla 6.3. Parámetros acústicos de las configuraciones analizadas. Densidad del material (ρ_m), mesoporosidad (\emptyset_M), densidad de la fibra (ρ_f), longitud característica viscosa (Λ), longitud característica térmica (Λ'), porosidad (\emptyset), tortuosidad (α_∞), resistividad al flujo (σ) y densidad de la fibra (ρ_f)..... 110

Tabla 6.4. Valores de los ocho coeficientes para T1 y T2 obtenidos a partir del modelo Delany-Bazley 109

Tabla 7.1. Parámetros geométricos de los tejidos: n es el número de pliegues; h es la altura del pliegue; x es la distancia entre pliegues consecutivos; N es el factor de plegado 121

Listado de figuras

Figura 2.1. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para un tejido textil de espesor $t = 0.2$ cm. Comparación entre la medida experimental DB_E (línea sólida) y la predicha por el modelo DB_A (línea discontinua).....16

Figura 2.2. Geometría de la celda: caso de sección transversal circular. L es el tamaño de la celda y R es el radio medio del poro19

Figura 2.3. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para una espuma de poliuretano de espesor $t = 2$ cm. Comparación entre la medida experimental JCA_E (línea sólida) y la predicha por el modelo JCA_A (línea discontinua).....20

Figura 2.4. Representación esquemática de una espuma de poliuretano perforada donde se puede apreciar la diferencia entre el microporo y el mesoporo.....21

Figura 2.5. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para una espuma de poliuretano perforada de espesor $t = 2$ cm, $\emptyset_M = 20\%$ y $D = 4$ mm. Comparación entre la medida experimental DP_E (línea sólida) y la predicha por el modelo DP_A (línea discontinua)...22

Figura 2.6. Esquema básico del sistema de membrana. t es el espesor de la membrana. θ_0 es el ángulo de incidencia.....24

Figura 2.7. Esquema 1D del elemento acústico. Descripción elemental del método de la matriz de transferencia (MMT).....27

Figura 2.8. Configuración del sistema membrana permeable-cavidad de aire. r es la profundidad de la cavidad de aire; t es el espesor de la muestra; θ_0 es el ángulo de incidencia28

Figura 2.9. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para un tejido textil de espesor $t \approx 0.2$ cm respaldado con una cavidad de aire de 10 cm. Comparación entre la medida experimental Mem_E (línea sólida) y la predicha por el modelo Mem_A (línea discontinua).....30

Figura 3.1. Esquema del tubo de impedancia utilizado para medir el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. D_i es el diámetro interior del tubo (en el tubo de impedancia empleado, $D_i = 4$ cm); t es el espesor de la muestra; x_1 es la distancia entre el Mic. 1 y la muestra; p_i es la presión acústica de la onda incidente; p_r es la presión acústica de la onda reflejada; y s es la separación entre ambos micrófonos (en el tubo de impedancia empleado, $s = 3.2$ cm).....42

Figura 3.2. Esquema del dispositivo experimental para la medida del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal con una cavidad de aire e. p_t es la presión acústica de la onda transmitida...43

Figura 3.3. Detalle del montaje experimental para la medida del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. a) Cavidad de aire de 10 cm con un tejido de algodón; b) Extremo del tubo de impedancia con un tejido de poliéster colocado en el portamuestras.....43

Figura 3.4. Esquema del tubo de impedancia utilizado para medir la resistencia al flujo a partir del método de Ingard & Dear. L es la distancia entre la cara posterior de la muestra y el extremo rígido ..44

Figura 3.5. Detalle de la cámara reverberante de tamaño reducido. a) Interior de la cámara reverberante durante el ensayo de un material textil seleccionado. La fuente sonora se sitúa en las esquinas de la cámara reverberante a fin de excitar los modos de la sala; b) Exterior de la cámara reverberante49

Figura 3.6. Curva de caída del nivel sonoro y tiempo de reverberación50

Figura 4.1. Imágenes de microscopía electrónica de la sección transversal de diferentes fibras.....55

Figura 4.2. Esquema de la sección transversal de las fibras de poliéster. a) P1; b) P2; c) P3.....58

Figura 4.3. Imágenes de microscopía de las muestras de poliéster. a) P1; b) P2; c) P3.....59

Figura 4.4. Fotografía de algunas de las fibras textiles analizadas. (a) Acrílica A1; (b) Acrílica A3; (c) Poliéster P2; (d) Poliéster P3.....59

Figura 4.5. Detalle del extremo final del tubo de impedancia para calcular el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, incluyendo una muestra de a) fibra A1 y b) fibra P160

Figura 4.6. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras acrílicas, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la finura de la fibra. En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles A1 y A262

Figura 4.7. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras acrílicas, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la longitud de la fibra. En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles A2 y A363

Figura 4.8. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras de poliéster, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la sección transversal de la fibra. En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles P1 y P2.....64

Figura 4.9. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras de poliéster, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la sección transversal de la fibra. En a) se compara la fibra P1 (10 huecos) con la fibra P3 (sin huecos) y en b) se compara la

fibra P2 (1 hueco) con la fibra P3 (sin huecos). En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles P1, P2 y P3.....65

Figura 5.1. Algunos de los materiales textiles seleccionados para los ensayos. a) CO, b) T1, c) T3 y d) T675

Figura 5.2. Esquema de una microcápsula esférica77

Figura 5.3. Esquema del proceso de aplicación de las microcápsulas sobre la superficie de los tejidos textiles de calada mediante la técnica de impregnación77

Figura 5.4. Micrografías FESEM del tejido de algodón. (a) Superficie de la muestra del tejido CO no dopado; (b) Tejido CO dopado con una concentración de microcápsulas de 25 g/L.....79

Figura 5.5. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tres muestras de algodón medidas en un tubo de impedancia con una cavidad de aire de 10 cm. Las muestras fueron cortadas del mismo tejido textil dopado con la misma concentración de MCCs (25 g/L) a fin de probar la repetibilidad y la homogeneidad del proceso de dopado.....81

Figura 5.6. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de muestras de algodón dopadas con distintas concentraciones de microcápsulas con una cavidad de aire de 10 cm83

Figura 5.7. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tejidos textiles no dopados (línea de puntos) y dopados (línea discontinua) usando una cavidad de aire de 10 cm. Los resultados experimentales se comparan con la estimación del modelo teórico de membrana (línea sólida). Las diferencias en el modelo entre tejidos dopados y no dopados son despreciables y han sido representadas con la misma curva. a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5 y f) T686

Figura 6.1. Espuma de poliuretano reciclada (RPU). A la izquierda se muestra un ejemplo de una muestra preparada para ensayo del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia y a la derecha se observa la superficie de la muestra a través de microscopía con 16X aumentos	96
Figura 6.2. Superficie de los tejidos analizada con la técnica de microscopía usando 16X aumentos, donde se aprecia el relieve formado por los hilos de urdimbre y trama para el tejido a) T1 y el tejido b) T2.....	97
Figura 6.3. Espuma perforada con láser (izquierda) y fresadora (derecha) con las mismas especificaciones: $D = 6 \text{ mm}$ y $\emptyset_M = 20\%$	98
Figura 6.4. Imagen de microscopía electrónica de la superficie de la espuma de poliuretano perforada con diferentes técnicas: a) láser, b) fresado	99
Figura 6.5. Configuración en 2D de una muestra RPU. Perforaciones en red cuadrada de constante a , D : diámetro del orificio perforado y R : radio de la espuma.....	100
Figura 6.6. Esquema de las cuatro configuraciones consideradas y descritas en la Tabla 6.2	101
Figura 6.7. Muestra el sistema formado por la combinación tejido-espuma y detalle, a nivel microscópico, de los dos materiales	102
Figura 6.8. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de muestras RPU perforadas con dos técnicas distintas (M: CNC fresadora y L: CNC láser) para $D = 4 \text{ mm}$ y $\emptyset_M = 20\%$	104
Figura 6.9. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las muestras RPU perforadas para $D = 4 \text{ mm}$ ($\emptyset_M = 5\%$ y $\emptyset_M = 20\%$)	105

Figura 6.10. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de los tejidos T1 y T2 106

Figura 6.11. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las diferentes combinaciones entre espumas RPU perforadas y no perforadas y los tejidos textiles (T1 y T2): (a) $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm, T1; (b) $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm, T2..... 107

Figura 6.12. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las espumas RPU perforadas con $D = 4$ mm. Comparación entre las medidas experimentales (línea continua), el modelo teórico (línea discontinua) y el método numérico (línea punteada). a) $\emptyset_M = 5\%$, $D = 4$ mm; b) $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm 108

Figura 6.13. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las muestras RPU recubiertas por dos tejidos textiles. Comparación entre las medidas experimentales (línea continua), el modelo teórico (línea discontinua) y el método numérico (línea punteada). a) T1: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm; b) T1: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 6$ mm; c) T2: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm; d) T2: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 6$ mm..... 109

Figura 7.1. Vista tridimensional del tejido de sarga creado con el software TexGen..... 118

Figura 7.2. Diferentes muestras de algodón bajo estudio. En la izquierda se muestra una configuración no plegada y a la derecha una plegada..... 119

Figura 7.3. Imagen de microscopía electrónica de la estructura de la fibra textil..... 119

Figura 7.4. Imagen de microscopía electrónica de la sección transversal de la fibra textil 120

Figura 7.5. Parámetros de diseño de tejidos plegados. S es la longitud del tejido plegado; L es la longitud del pliegue; h es la altura del

pliegue; x es la distancia entre pliegues consecutivos; w es la anchura del tejido plegado.....120

Figura 7.6. Procedimiento para introducir el textil plegado en el porta-muestras. a) El tejido se corta en forma elíptica; b) La muestra textil se pliega al patrón de diseño deseado; c) La muestra plegada se ajusta perfectamente al porta-muestras.....123

Figura 7.7. Valores de la función de ponderación $w(\theta)$ en ángulos de 0 a $\pi/2$ rad124

Figura 7.8. Configuración del sistema membrana permeable plegada-cavidad de aire. \bar{r} es es la distancia promedio entre la superficie reflectante y el tejido plegado; x es la distancia entre dos pliegues consecutivos; L es la longitud del pliegue; h es la altura del pliegue; θ_0 es el ángulo de incidencia.....126

Figura 7.9. Detalle del interior de la cámara reverberante de tamaño reducido durante el ensayo de un material textil plegado (configuración T8). La muestra está colocada sobre un soporte de madera de 2 cm de altura. Las medidas fueron realizadas a una temperatura $T = 21 \pm 2$ °C y con una humedad relativa de $HR = 56 \pm 5\%$127

Figura 7.10. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tejidos textiles plegados con un número de pliegues distinto. a) $S_i = 15$ cm: T0($n=0$), T1($n=5$), T2($n=10$), T3($n=15$); b) $S_i = 20$ cm: T0($n=0$), T4 ($n=5$), T5($n=10$), T6($n=15$), T7($n=20$).....129

Figura 7.11. Coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria obtenido en la cámara reverberante de tamaño reducido y utilizando una cavidad de aire de 2 cm. a) Método de Sabine; b) Método de Eyring.....130

Figura 7.12. Coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria medido (línea continua) y predicho (línea discontinua) para las

configuraciones de plegado y no plegado. a) Configuración T0 (no plegado); b) Configuración T8 (plegado) 132

Figura 9.1. Muestra las tres configuraciones del tejido espaciador. a) Espaciador completo; b) Hilos espaciadores + capa tejida (superior o inferior); c) Una sola capa tejida..... 139

Figura 9.2. Esquema de un tejido espaciador formado por dos telas tejidas (capa superior e inferior) unidas por hilos (capa intermedia)140

Figura 9.3. Diferentes vistas del modelo geométrico 3D del tejido textil.....141

Listado de símbolos y abreviaturas

α	Coeficiente de absorción acústica.
$\bar{\alpha}$	Coeficiente de absorción acústica promedio.
α_s	Coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria.
α_∞	Tortuosidad.
γ	Coeficiente de dilatación adiabática en el aire.
Γ	Constante de propagación compleja [m^{-1}].
Δx	Tamaño del elemento de malla [m].
ε	Error cuadrático.
θ_0	Ángulo de incidencia [rad].
λ	Longitud de onda [m].
Λ	Longitud característica viscosa [m].
Λ'	Longitud característica térmica [m].
μ	Viscosidad dinámica [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].
ξ	Función dependiente de la frecuencia y de la geometría.
ρ_0	Densidad del aire [kg/m^3].
ρ_m	Densidad del material [kg/m^3].
ρ_f	Densidad de la fibra [kg/m^3].
ρ_M	Densidad de los mesoporos cilíndricos [kg/m^3].
ρ_{JCA}	Densidad dinámica compleja en el modelo JCA [kg/m^3].
ρ_{dp}	Densidad en materiales de doble porosidad [kg/m^3].
σ	Resistividad al flujo de aire [$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$].
ϕ	Ángulo azimutal [rad].
\emptyset	Porosidad del material [%].
\emptyset_M	Meso-porosidad [%].
\emptyset_f	Diámetro de la fibra [μm].

Listado de símbolos y abreviaturas

χ	Raíz cuadrada del número de Prandtl.
ω	Frecuencia angular [rad/s].
a	Distancia entre dos celdas unidad adyacentes [m].
A	Fibra acrílica.
c_0	Velocidad del sonido en el aire [m/s].
CO	Tejido de algodón.
CNC	Control numérico por computadora.
D_i	Diámetro interno del tubo de impedancia [m].
D	Diámetro de la perforación [m].
DB	Modelo Delany–Bazley.
DP	Modelo para materiales de doble porosidad.
f_i	Frecuencia de corte inferior del tubo de impedancia [Hz].
f_l	Frecuencia de corte de la cámara reverberante [Hz].
f_u	Frecuencia de corte superior del modelo de membrana [Hz]; Frecuencia de corte superior del tubo de impedancia [Hz].
FESEM	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo.
h	Altura del pliegue [m].
H_c	Factor de calibración.
H_I	Función de transferencia para la onda incidente.
H_R	Función de transferencia para la onda reflejada.
\hat{H}_{12}	Función de transferencia acústica compleja no corregida.
H_{12}	Función de transferencia acústica compleja corregida.
HR	Humedad relativa [%].
JCA	Modelo Johnson–Champoux–Allard.
k_0	Número de onda [rad/m].
K_M	Módulo de compresibilidad compleja de los mesoporos cilíndricos [Pa].
K_{dp}	Módulo de compresibilidad de un material con doble porosidad [Pa].
K_{JCA}	Módulo de compresibilidad complejo [Pa].
L	Longitud total de la fibra [μm]; técnica láser; longitud del pliegue [m].
m_f	Densidad de masa superficial [kg/m^2].

M	Técnica de fresado.
MCCs	Microcápsulas.
MEF	Método de los elementos finitos.
MMP	Modelo de membrana permeable.
MMT	Método de la matriz de transferencia.
MPV	Modelo de pérdidas visco-térmicas.
n	Número de orificios; número de pliegues.
\vec{n}	Vector normal unitario de una superficie [m].
N	Factor de plegado [%].
N_{Pr}	Número de Prandtl.
p	Presión acústica [Pa].
P	Fibra de poliéster.
r	Coefficiente de reflexión complejo; Profundidad de la cavidad de aire [m].
\bar{r}	Distancia promedio entre la superficie reflectante y el tejido plegado [m].
R	Radio de la sección transversal de los mesoporos cilíndricos [m].
R_i	Radio interior del tubo de impedancia [m].
R_s	Resistencia al flujo de aire [Pa·s/m].
RPU	Espuma de poliuretano reciclada.
s	Separación entre micrófonos, en el método del tubo de impedancia, para el cálculo del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal [m].
S	Longitud del tejido plegado [m].
S_i	Longitud del tejido no plegado [m].
t	Espesor de la muestra [m].
T	Temperatura [°C].
T	Matriz de transferencia de un sistema.
T_{ac}	Matriz de transferencia de la cavidad de aire.
T_{mem}	Matriz de transferencia de la membrana permeable.
TR	Tiempo de reverberación [s].
T	Tejido textil con hilos de poliéster.

Listado de símbolos y abreviaturas

u	Velocidad de partícula [m/s].
V_f	Volumen del tejido con pliegues [m ³].
V_t	Volumen del tejido sin pliegues [m ³].
w	Función de ponderación; anchura del tejido plegado [m].
x	Distancia entre pliegues consecutivos [m].
x_1	Distancia entre el micrófono más alejado y la superficie de la muestra, en el método del tubo de impedancia, para el cálculo del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal [m].
Z	Impedancia acústica específica de un medio [Pa·s/m].
Z_0	Impedancia característica del aire [Pa·s/m].
Z_M	Impedancia mecánica [Pa·s/m].
Z_l	Impedancia de cierre [Pa·s/m].
Z_r	Impedancia de radiación [Pa·s/m].
\bar{Z}_r	Impedancia de radiación promedio [Pa·s/m].
Z_{AC}	Impedancia acústica de la cavidad de aire [Pa·s/m].
Z_{mem}	Impedancia acústica de la membrana permeable [Pa·s/m].

Listado de publicaciones

[1] Atiénzar–Navarro R, Picó R, del Rey R, Gisbert–Payá J. Absorción acústica de nuevos tejidos textiles. *Sociedad Española de Acústica*, 2019;50(1-2):12-18. ISSN: 2254-2396.

[2] Atiénzar–Navarro R, Bonet–Aracil MÁ, Gisbert–Payá J, del Rey R, Picó R. Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules. *Sociedad Española de Acústica*, 2019;50(3–4):13–21. ISSN: 2254–2396.

[3] Atiénzar–Navarro R, Bonet–Aracil MÁ, Gisbert–Payá J, del Rey R, Picó R. Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules. *Applied Acoustics*, 2020;164:1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107285>.

[4] Atiénzar–Navarro R, del Rey R, Alba J, Sánchez–Morcillo VJ, Picó R. Sound absorption properties of perforated polyurethane foams reinforced with woven fabric. *Polymers*, 2020;12:401–419.
<https://doi.org/10.3390/polym12020401>.

[5] Atiénzar–Navarro R, Bonet–Aracil MÁ, Gisbert–Payá J, del Rey R, Picó R. Influence of fineness, length and hollow section of fibres on the acoustic absorption. *Textile Research Journal*. PENDIENTE DE ACEPTACIÓN.

[6] Atiénzar–Navarro R, Picó R, del Rey R, Bonet–Aracil MÁ, Bou–Belda E. Influence of fabric folding geometry on the sound absorption. *Journal of Natural Fibers*.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Objeto y antecedentes

Este trabajo de Tesis tiene como punto de partida la hipótesis dada por el reto 5 del programa europeo Horizonte 2020 [Horizonte 2020] que indica que es posible el uso de materias primas y materiales secundarios sostenibles, y compatibles desde el punto de vista medioambiental. Además, señala que se puede hacer un uso sostenible de los recursos naturales y que, eligiendo adecuadamente los materiales que se tomen como solución, éstos pueden reutilizarse o reciclarse en parte o en su totalidad. Esta hipótesis lleva al planteamiento de que pueden desarrollarse nuevos materiales, nuevos productos, y dimensionar soluciones tecnológicas sostenibles que permitan el uso de materias primas renovables, reduzcan o eliminen el uso de sustancias peligrosas y la generación de residuos que supongan un gran impacto en el medio ambiente.

El nuevo programa europeo denominado Horizonte 2030 [Horizonte 2030] entró en funcionamiento a lo largo de 2020. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de este nuevo programa, en particular, los ODS 7¹, 9², 11³, 12⁴ y 13⁵, refuerzan la necesidad de reducir, reutilizar y reciclar los residuos en busca de un desarrollo sostenible. Cada día, con mayor intensidad, las sociedades avanzadas están exigiendo una sensibilidad especial hacia la compatibilidad entre el concepto de progreso y desarrollo, y el respeto al entorno y al medio ambiente, favoreciendo la regeneración y la sostenibilidad del ecosistema, sólo posible con una adecuada gestión y un uso y aprovechamiento responsable de los recursos naturales [Berglund et al., 1999].

En la actualidad, muchos investigadores se están centrando en el uso de materias primas o residuos renovables para el desarrollo de eco-materiales que puedan presentar propiedades acústicas absorbentes [Maderuelo–Sanz et al., 2012]. Se ha demostrado la aplicación en soluciones acústicas del reciclado de botellas de plástico (PET) [Del Rey et al., 2011] y también de diferentes fibras naturales, como las del kenaf [Ramis et al., 2010], el coco [Ramis et al., 2014] o la lana de oveja [Del Rey et al., 2017]. Otros materiales, que se obtienen a partir del reciclado de residuos textiles, como las espumas, orillos y mezclas de diferentes composiciones (algodón con poliéster, poliéster ligado o termofusionado, y ligante de poliéster para reducir las fibras fenólicas), también presentan aplicaciones acústicas evidentes [Ekici et al., 2012].

Los textiles son materiales competitivos debido a su durabilidad, flexibilidad, baja densidad, bajo coste y con un impacto ambiental muy bajo [Padhye & Nayak, 2016]. Estos materiales se basan en una

¹ ODS 7. Energía asequible y no contaminante.

² ODS 9. Industria, innovación e infraestructura.

³ ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.

⁴ ODS 12. Producción y consumo responsable.

⁵ ODS 13. Acción por el clima.

red de fibras naturales, sintéticas o regeneradas que han sido fabricadas mediante diferentes técnicas, como el tejido de punto, punto anudado, trenzado, croché, fieltro, o a partir de una combinación de estas técnicas.

Llegados a este punto, es necesario distinguir entre dos tipos de textiles: tejidos y no tejidos. En los tejidos textiles, los hilos se entrelazan entre sí a través de dos patrones: urdimbre (hilo longitudinal) y trama (hilo transversal). Este tipo de tejidos presentan mayor robustez en su estructura interna en comparación con las telas no tejidas, donde no existen hilos entrelazados, pero cuentan con una estructura interna organizada y las fibras están unidas mediante la aplicación de calor o productos químicos. A lo largo de esta Tesis nos centraremos en los tejidos de calada (en inglés, *woven*) y se investigarán determinados parámetros intrínsecos, como la densidad lineal de hilo, el espesor del tejido, la textura de la superficie y otros factores que puedan influir en la absorción acústica.

Un tejido textil presenta una pobre absorción acústica en todo el margen frecuencial, si éste no está respaldado por otra estructura como, por ejemplo, una cavidad de aire [Soltani & Zerrebini, 2012]. Como consecuencia, en la literatura se encuentran varias investigaciones relacionadas con diferentes soluciones a fin de mejorar las propiedades acústicas de los tejidos, que son utilizados en múltiples áreas de aplicación, particularmente, en nuevos avances tecnológicos [Na et al., 2007; Segura–Alcaraz et al., 2017]. En general, los tejidos utilizados con fines acústicos son delgados comparados con la longitud de onda en el rango de frecuencias de interés. La descripción de su comportamiento acústico requiere, por tanto, de modelos físicos acordes con esta condición. Así pues, se pueden modelar como una membrana permeable [Pieren, 2012; Sakagami et al., 2014]. Pieren utiliza en [Pieren, 2012] tejidos delgados con respuesta de tipo membrana acústica en sus modelos de absorción acústica. Las propiedades de absorción acústica de los tejidos delgados se ven afectadas por las vibraciones inducidas por el sonido

[Sakagami et al., 2014], y éstas también se ven afectadas debido al proceso de fabricación y a las características físicas del tejido, como la densidad de hilo, la naturaleza, las fibras, las condiciones de humectabilidad y el tratamiento de los poros [Kang et al., 2018].

El objetivo principal de la Tesis se focaliza en el estudio, modelado y caracterización acústica de eco-materiales eco-innovadores basados en tejidos textiles, partiendo de condiciones de sostenibilidad y buscando una disminución del impacto ambiental con el uso responsable de los recursos naturales y una mejora de las prestaciones de los materiales, en base al reto 5 del programa H2020 y a los ODS 7, 9, 11, 12 y 13 del programa H2030. Esta Tesis se fundamenta en los estudios previos de nuevos materiales obtenidos a partir del reciclado de productos. Por tanto, se persigue un uso sostenible de los recursos naturales mediante el desarrollo de nuevos materiales, nuevos productos y diseño de nuevas soluciones constructivas, que utilizan como materia prima los residuos, reutilizándolos o reciclándolos en parte o en su totalidad.

A partir de estas directrices abarcaremos conceptos basados en la forma de materiales absorbentes para combinar los efectos intrínsecos del material y los dotados por la nueva estructura a fin de mejorar la absorción acústica en los tejidos textiles. Por tanto, se buscarán múltiples mecanismos con la finalidad de controlar las propiedades acústicas de los tejidos textiles a partir de modificaciones estructurales del mismo y, además, se buscarán soluciones a fin de aumentar la absorción acústica de los textiles de bajo espesor. Con este objetivo se han desarrollado cuatro ejes principales de estudio para entender nuevos fenómenos físicos en la propagación de las ondas a través de los materiales tejidos, y que se puedan aprovechar para mejorar la eficiencia en la absorción acústica. El primer estudio está relacionado con la estructura interna de las fibras, donde se investiga la influencia de parámetros intrínsecos, como la longitud, la finura o la sección transversal de la fibra, en la absorción acústica. Una vez estudiada la estructura y la composición de las fibras, se procede a alterar, en un

segundo estudio, las propiedades del textil modificando la capa límite del material mediante la adhesión (dopaje) de microcápsulas. Así pues, como el tejido textil, por si solo, no presenta una buena absorción acústica en todo el rango de frecuencias útil debido, principalmente, a su bajo espesor, se adhiere, en un tercer estudio, una espuma de poliuretano reciclada y perforada al tejido a fin de mejorar sus propiedades acústicas. Finalmente, en un último estudio se diseñan estructuras textiles plegadas y se investiga el efecto producido por la geometría del tejido con pliegues sobre la absorción acústica.

Esta tesis doctoral se presenta para obtener el grado de Doctor en el Programa de Doctorado de Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales por la Universitat Politècnica de València. Este trabajo de Tesis ha sido financiado principalmente por una Beca de Personal Investigador en Formación (programa VALI+D), con número de expediente ACIF/2017/073, y que fue concedida por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana junto con el apoyo de los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos (Fondos EIE–Unión Europea). Además, otra parte de la financiación ha provenido de proyectos vinculados con la temática de la Tesis: el proyecto FIS2015-65998-C2-2 concedido por el Ministerio de Economía e Innovación (MINECO) y el proyecto AICO/2016/060 concedido por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana.

1.2 Estructura de la tesis

La organización de los contenidos de esta Tesis se describe de forma breve aquí. Este trabajo contiene nueve capítulos y tres anexos, y está redactado a partir de una colección de artículos que se incluyen en el Anexo [A](#).

El **Capítulo 1-Introducción** ubica al lector en los antecedentes y los objetivos más importantes que han motivado esta investigación. El

Capítulo 2-Modelos y métodos recoge, por un lado, los modelos teóricos para materiales fibrosos y porosos ya que algunas de las nuevas soluciones acústicas presentan doble porosidad y, por otro lado, los métodos usados en los distintos trabajos de esta Tesis. El **Capítulo 3-Métodos experimentales** está dedicado a la descripción de los dispositivos experimentales utilizados para caracterizar acústicamente soluciones basadas en textiles, como el tubo de impedancia y la cámara reverberante de tamaño reducido. En el **Capítulo 4-Estructura de la fibra textil** se estudia como afectan los parámetros intrínsecos de la estructura de la fibra textil en la absorción acústica. El **Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles** analiza el comportamiento acústico de los tejidos dopados con microcápsulas. En el **Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles** se evalúa la mejora producida por los textiles en la absorción acústica cuando son respaldados por espumas perforadas. El efecto de la geometría del tejido plegado en la absorción acústica es analizado en el **Capítulo 7-Tejidos textiles plegados**. En los **Capítulos 8-Conclusiones generales** y **9-Futuras líneas de investigación** se reflexiona sobre las conclusiones más relevantes y las futuras líneas de investigación, que están relacionadas con este trabajo de Tesis, respectivamente.

1.3 Notas bibliográficas

Las referencias de este trabajo de Tesis se incluyen al final de cada capítulo con el fin de facilitar la búsqueda de las referencias citadas al lector.

Referencias

[Horizonte 2020] Portal Español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Horizonte 2020. Disponible online (consultado el 16 de diciembre de 2020): <https://eshorizonte2020.es/>.

[Horizonte 2030] Portal Español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Horizonte 2030. Disponible online (consultado el 16 de diciembre de 2020): <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

[Berglund et al., 1999] Berglund B, Lindvall T, Schwela DH, World Health Organization. Guidelines for community noise. Geneva, Switzerland, WHO, 1999.

[Soltani & Zerrebini, 2012] Soltani P, Zerrebini M. The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics. *Text Res J*, 2012;82(9):875–82. <https://doi.org/10.1177/0040517511402121>.

[Na et al., 2007] Na Y, Lancaster J, Casali J, Cho G. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Text Res J*, 2007;77(5):330–5. <https://doi.org/10.1177/0040517507078743>.

[Segura–Alcaraz et al., 2017] Segura–Alcaraz MP, Bonet–Aracil MÁ, Segura–Alcaraz JG, Montava–Seguí I. Sound absorption of textile material using a microfibras resistive layer. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2017;254:072022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/254/7/072022>.

[Maderuelo–Sanz et al., 2012] Maderuelo–Sanz R, Nadal–Gisbert A, Crespo–Amorós JE, Pares–García F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Appl Acoust*, 2012;73:402–408. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.001>.

[Del Rey et al., 2011] Del Rey R, Alba J, Ramis J, Sanchís VJ. New absorbent acoustic materials from plastic bottle remnants. *Mater Construcc*, 2011;61(304):547–558. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2011.59610>.

[Ramis et al., 2010] Ramis J, Alba J, del Rey R, Escuder E, Sanchís VJ. New absorbent material acoustic based on kenaf's fibre. *Mater Construcc*, 2010;60(299):133–143. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2010.50809>.

[Ramis et al., 2014] Ramis J, del Rey R, Alba J, Godinho L, Carbajo L. A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber. *Mater Construcc*, 2014;64(313): e008. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00513>.

[Del Rey et al., 2017] Del Rey R, Alba J, Crespo JE, Fontoba J. Propuesta de soluciones ligeras para el aislamiento acústico a ruido aéreo basadas en lana de oveja y green composites. 48º Congreso español de acústica, 2017.

Capítulo 1. Introducción

[Ekici et al., 2012] Ekici B, Kentli A, Küçük H. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. *Arch Acoust*, 2012;37(4):515–520. <http://dx.doi.org/10.2478/v10168-012-0052-1>.

[Padhye & Nayak, 2016] Padhye R, Nayak R. *Acoustic Textiles*. Textile Science and Clothing Technology. Melbourne, Victoria, Australia (Springer), 2016.

[Pieren, 2012] Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text Res J*, 2012;82(9):864–874. <https://dx.doi.org/10.1177/0040517511429604>.

[Sakagami et al., 2014] Sakagami K, Fukutani Y, Yairi M, Morimoto M. A theoretical study on the effect of a permeable membrane in the air cavity of a double-leaf microperforated panel space sound absorber. *Appl Acoust*, 2014;79:104–109. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.12.015>.

[Kang et al., 2018] Kang Y, Lee E, Choi S, Shin E. Acoustic properties of sound-absorbing polyester fabrics woven with thick staple and thin draw textured yarn for use in interior decoration. *J Text Inst*, 2018;1–9:202–210. <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1508798>.

Capítulo 2

Modelos y métodos

El contenido de este capítulo incluye, por un lado, los modelos teóricos para materiales fibrosos y porosos y, por otro, los métodos analíticos y numéricos utilizados en los distintos trabajos de esta Tesis. Los contenidos están organizados de la siguiente manera: en la Sección 2.1 se presenta una breve introducción que recoge los antecedentes teóricos de diferentes modelos y métodos que son utilizados con la finalidad de describir las propiedades acústicas de materiales con estructura fibrosa y porosa. La Sección 2.2 desarrolla con detalle los diferentes modelos para materiales fibrosos y porosos. Delany–Bazley es uno de los modelos más utilizados para la caracterización acústica de materiales fibrosos. Las propiedades acústicas de los materiales porosos se describen mediante el modelo de Johnson–Champoux–Allard. Los modelos Auriault & Boutin y Zwikker–Kosten se utilizan en materiales de doble porosidad. Finalmente, se presenta el modelo de pérdidas visco-térmicas que se utiliza en el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles, para reproducir numéricamente el comportamiento acústico de muestras con doble porosidad. En la Sección 2.3 se presenta el

modelo de membrana que se emplea en el Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles y en el Capítulo 7-Tejidos textiles plegados, para describir el comportamiento acústico de un tejido textil. El método de la matriz de transferencia, utilizado en el sistema membrana–cavidad, es considerado en la Sección 2.4. En la Sección 2.5 se introduce el modelo numérico basado en elementos finitos que se implementa a fin de validar los resultados obtenidos teórica y experimentalmente en el tubo de impedancia acústica.

2.1 Introducción

Desde hace varios años, se ha puesto mucho énfasis en investigar modelos con el propósito de caracterizar acústicamente distintos materiales porosos o fibrosos [Allard, Champoux & Depollier, 1987; Allard, 1993; Brouard, Lafarge & Allard, 1994; Katragadda, Lai & Bolton, 1995; Atalla & Sgard, 2007], a partir de diferentes características físicas del material, como la densidad, la resistencia al flujo, el módulo de compresibilidad, el factor de estructura o la tortuosidad. Los modelos empíricos, fenomenológicos y microestructurales permiten determinar la impedancia característica y la constante de propagación de los materiales fibrosos a partir de sus propiedades físicas. En esta línea es importante citar el modelo de Delany–Bazley (DB) [Delany & Bazley, 1970] que es uno de los métodos más empleados en la literatura para predecir el coeficiente de absorción acústica de materiales fibrosos. Para el cálculo de esas dos variables (impedancia característica y constante de propagación), el modelo DB hace uso de la resistividad al flujo y de ocho coeficientes adicionales que son obtenidos de forma empírica a partir de un modelo de ajuste [Nelder & Mead, 1965]. Johnson–Champoux–Allard (JCA) describieron en [Johnson et al., 1987; Allard & Champoux, 1992] los efectos disipativos visco–inerciales y viscotérmicos en un medio poroso. En este contexto, varios investigadores han utilizado el modelo JCA en combinación con el método de la matriz de transferencia (MMT)

[Atalla & Sgard, 2007; Chevillotte, 2012; Verdière et al., 2013; Prasetyo et al., 2018; Zenong et al., 2019] a fin de modelar el comportamiento acústico de estructuras multicapa. En [Prasetyo et al., 2018] se utiliza la combinación JCA–MMT con el propósito de desarrollar un modelo de predicción para sistemas de doble capa. En 1994, Voronina presenta en [Voronina, 1994] un modelo empírico para materiales homogéneos que tiene en cuenta las características estructurales de los materiales fibrosos. Además, cabe destacar los distintos modelos empíricos propuestos por Voronina [Voronina, 1996; Voronina, 1998; Voronina, 1999; Voronina & Horoshenkov, 2003] donde aparecen parámetros como el factor de estructura o la tortuosidad, ambos ligados a la distribución de poros o fibras que caracterizan estos materiales. En 2005, Umnova et al. propusieron en [Umnova et al., 2005] un método acústico para estimar la porosidad y tortuosidad de los materiales poroso-rígidos.

El modelo de membrana permeable (MMP) permite predecir el comportamiento acústico de tejidos textiles delgados. El efecto producido por una membrana permeable en la absorción acústica ha sido ampliamente estudiado durante muchos años. Mason investiga en [Mason, 1966] las propiedades acústicas de la membrana permeable. En 1996, se desarrolla una nueva teoría para la absorción y transmisión del sonido a través de una sola membrana permeable [Takahashi, Sakagami & Marimoto, 1996]. A raíz de este estudio, Kang et al. desarrolla en [Kang et al., 1999] un método teórico capaz de predecir el comportamiento acústico de membranas micro-perforadas, respaldadas por una cavidad de aire con terminación rígida. En la última década, Pieren R. presenta en [Pieren, 2012] un modelo teórico para la predicción del coeficiente de absorción acústica de membranas permeables delgadas. En este modelo, la membrana se representa por su resistencia al flujo y su densidad superficial.

El efecto acústico en materiales con doble porosidad (DP) ha sido investigado por diversos autores. En 1993, Auriault & Boutin [Auriault & Boutin, 1993] utilizaron una técnica de homogeneización a fin de describir de forma macroscópica un medio poroso de doble porosidad. En 1998, se investiga en [Boutin, Royer & Auriault, 1998] la propagación de la onda sonora a través de un medio poroso saturado de aire. En este caso, también se utiliza la teoría de la homogeneización, presentando unos resultados válidos siempre para longitudes de onda mayores en comparación con el tamaño de los poros. En 2001, Atalla et al. presenta en [Atalla et al., 2001] un modelo numérico, en 3D, basado en elementos finitos, para predecir el coeficiente de absorción acústica de un material poroso no homogéneo. En 2003, Olny–Boutin usaron en [Olny & Boutin, 2003] el método de homogeneización para estructuras periódicas y el modelo simplificado propuesto por Zwikker–Kosten [Zwikker & Kosten, 1949] a fin de estudiar la propagación de las ondas en un medio poroso con dos redes de poros interconectados. Además, mostraron el efecto que tienen algunos parámetros de diseño (la meso-porosidad, el tipo de red y el tamaño del poro) en la absorción acústica. En 2005, Sgard et al. analizan en [Sgard et al., 2005] una serie de modelos para predecir la transmisión de las ondas sonoras en medios con doble porosidad e investigaron el efecto que tiene el tamaño de la abertura, la tasa de perforación y el uso de distintas cavidades de aire sobre el coeficiente de absorción acústica. Recientemente, Carbajo et al. utiliza en [Carbajo et al., 2019] modelos de doble porosidad a fin de modelar acústicamente materiales porosos rígidos.

En la Tabla 2.1 se muestran los modelos y métodos que se han aplicado en cada capítulo de esta Tesis. En el Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles se utiliza el modelo de membrana permeable (MMP) aplicado a los tejidos textiles y el método de la matriz de transferencia (MMT), a fin de estudiar la absorción acústica de un sistema compuesto por una membrana delgada (tejido) y una cavidad de aire. En el Capítulo 6-Espuma

perforada y reforzada con tejidos textiles se emplea el modelo de Delany–Bazley (DB) para caracterizar acústicamente tejidos de bajo espesor. El modelo Johnson–Champoux–Allard (JCA) se utiliza para la caracterización acústica de materiales porosos, como la espuma de poliuretano reciclada. Para describir el comportamiento de un material poroso perforado se usa el modelo para materiales de doble porosidad (DP) y para modelizar estos materiales meso-perforados mediante el método de los elementos finitos (MEF) se hace uso del modelo de pérdidas visco-térmicas (MPV). En el Capítulo 7-Tejidos textiles plegados se emplea el modelo de membrana permeable (MMP) y el método de la matriz de transferencia (MMT) para predecir el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria de tejidos de bajo espesor, plegados y no plegados, que se encuentran colocados en el interior de una cámara reverberante de tamaño reducido.

	Modelos					Métodos	
	DB	JCA	DP	MPV	MMP	MMT	MEF
Capítulo 5					X	X	
Capítulo 6	X	X	X	X			X
Capítulo 7					X	X	

Tabla 2.1. Modelos y métodos utilizados en cada uno de los capítulos. Delany-Bazley (DB), Johnson-Allard-Champoux (JCA), modelo para materiales de doble porosidad (DP), modelo de pérdidas visco-térmicas (MPV), modelo de membrana permeable (MMP), método de la matriz de transferencia (MMT) y método de los elementos finitos (MEF).

2.2 Modelos para materiales fibrosos y porosos

A continuación, se describen los modelos para materiales fibrosos y porosos, que han sido estudiados a lo largo de esta Tesis.

2.2.1 Delany–Bazley

El modelo semi-empírico de Delany–Bazley (DB) [Delany & Bazley, 1970] describe el comportamiento acústico de los materiales a partir de la constante de propagación (Γ) y de la impedancia acústica (Z). Las relaciones Z y Γ se basan en interpolaciones de medidas en función del cociente $\rho_0 \cdot f / \sigma$. Son muy diversos los trabajos que se han basado en este modelo para describir el comportamiento acústico de diferentes tipos de materiales fibrosos, citando aquí los más recientes [Arenas et al., 2020; Atiénzar–Navarro et al., 2020; Othmani et al., 2017; Del Rey et al., 2017; Ramis et al., 2014; Del Rey et al., 2011; Ramis et al., 2010]. En el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles se aplica este modelo para la caracterización acústica de tejidos textiles de bajo espesor.

El método consiste en la obtención de los coeficientes C_i (con $i = 1, 2, \dots, 8$) que mejor se ajusten a las ecuaciones presentadas para los materiales sujetos a estudio,

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0}\right) \left[C_5 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-c_6} \right], \quad (2.1)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0}\right) \left[1 + C_7 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-c_8} \right], \quad (2.2)$$

$$Z_r = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-c_2} \right], \quad (2.3)$$

$$Z_i = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \cdot \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-c_4} \right], \quad (2.4)$$

donde α es la constante de atenuación (Np/m) y β es la constante de fase (rad/m), Z_r y Z_i son la parte real e imaginaria de la impedancia característica, σ es la resistividad al flujo de aire ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$), ρ_0 es la densidad del aire ($\approx 1.21 \text{ kg}/\text{m}^3$), f es la frecuencia (Hz) y c_0 es la velocidad del sonido en el aire ($\approx 343 \text{ m}/\text{s}$). Este modelo puede brindar resultados que no son físicamente correctos en bajas frecuencias, siendo el rango de validez de estas relaciones: $10^{-2} \leq$

$f/\sigma \leq 1$. Por tanto, para valores de f/σ fuera de este rango, no son aplicables estas expresiones. El modelo DB considera que los materiales son de fabricación homogénea, que la propagación es una onda plana y que la estructura es rígida.

A partir de la impedancia característica y de la constante de propagación, se obtiene la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal [UNE-EN 12354-6:2004]

$$\alpha_n = \frac{4Z_1Z_0}{|Z_1| + 2Z_0Z_{1R} + (Z_0)^2} \quad , \quad (2.5)$$

donde $Z_0 = \rho_0c_0 = 415$ rayls, Z_1 es la impedancia de cierre definida en la ecuación (2.6), y Z_{1R} es la parte real de la impedancia de cierre. La impedancia de cierre (Z_1) se define como la impedancia del material cuando éste se apoya sobre una terminación rígida [UNE-EN 12354-6:2004],

$$Z_1 = (Z_r + iZ_i) \cdot [\coth(\alpha + i\beta) \cdot t] \quad , \quad (2.6)$$

siendo t el espesor de la muestra.

Para conocer los parámetros C_i del ajuste, se utiliza un método iterativo basado en la reducción de la función del error cuadrático [Nelder & Mead, 1965]. Se consigue así calcular los coeficientes que mejor describen el comportamiento acústico según el modelo de las muestras bajo ensayo,

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i})^2 \quad , \quad (2.7)$$

donde $\alpha_{n,i}$ representa los valores del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, medido para un material absorbente escogido, a la frecuencia i -ésima y $\hat{\alpha}_{n,i}$ es el valor anterior estimado, que se obtiene a partir de las ecuaciones (2.1)–(2.4).

Los coeficientes se derivan de la minimización de la función de error, es decir, resolviendo el siguiente sistema

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial C_i} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i}) \frac{\partial \hat{\alpha}_{n,i}}{\partial C_i} = 0, \quad 1 \leq i \leq 8. \quad (2.8)$$

En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de funcionamiento del modelo DB, donde se compara la medida experimental del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y la predicha por el modelo, de un tejido textil de espesor $t = 0.2$ cm. La resistividad al flujo del tejido utilizado es de $\sigma = 185$ kPa·s·m⁻². Se puede observar que la absorción acústica del tejido es muy reducida y que la desviación en la estimación del modelo respecto del valor experimental para el coeficiente de absorción acústica es menor a 0.05. En la Tabla 2.2 se presentan los valores de los ocho coeficientes para el tejido analizado.

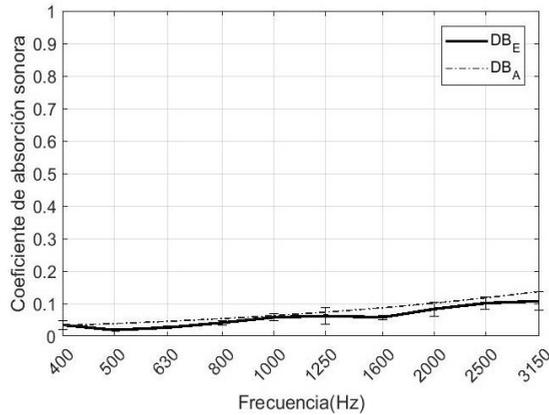


Figura 2.1. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para un tejido textil de espesor $t = 0.2$ cm. Comparación entre la medida experimental DB_E (línea sólida) y la predicha por el modelo DB_A (línea discontinua).

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
0.0621	0.9051	0.0812	0.9253	0.0485	0.7410	0.1180	0.5500

Tabla 2.2. Valores de los ocho coeficientes para el tejido textil seleccionado.

2.2.2 Johnson-Champoux-Allard

El modelo propuesto por Johnson–Champoux–Allard (JCA) describe en [Johnson et al., 1987; Allard & Champoux, 1992] los efectos disipativos visco–inerciales y viscotérmicos para materiales fibrosos y porosos. Este modelo se aplica en el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles, para la caracterización acústica de materiales porosos, como la espuma de poliuretano reciclada. Los efectos visco–inerciales vienen dados por la expresión de densidad dinámica compleja (ρ_{JCA} , kg/m³) y los efectos térmicos se tienen en cuenta en la expresión del módulo de compresibilidad complejo (K_{JCA} , Pa), como

$$\rho_{JCA}(\omega) = \frac{\alpha_{\infty}\rho_0}{\emptyset} \left(1 + \frac{\sigma\emptyset}{j\omega\rho_0\alpha_{\infty}} \sqrt{1 + \frac{4j\omega\alpha_{\infty}^2\mu\rho_0}{\sigma^2\Lambda^2\emptyset^2}} \right), \quad (2.9)$$

$$K_{JCA}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\emptyset} \left(\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\mu}{j\omega\Lambda'^2 N_{Pr}\rho_0} \sqrt{1 + \frac{j\omega\Lambda'^2 N_{Pr}\rho_0}{16\mu}} \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (2.10)$$

En las ecuaciones (2.9) y (2.10), los parámetros físicos característicos de las propiedades del aire son la viscosidad dinámica $\mu = 1.84 \cdot 10^{-5}$ (Pa · s), el coeficiente de dilatación adiabática $\gamma = 1.4$ y el número de Prandtl $N_{Pr} = 0.708$, a presión y temperatura atmosféricas normales. Los parámetros macroscópicos de medios porosos y fibrosos como la porosidad (\emptyset), la tortuosidad (α_{∞}), la longitud característica viscosa (Λ), y la longitud característica térmica (Λ') vienen definidos más adelante en esta sección.

A partir de las ecuaciones (2.9) y (2.10), la impedancia característica compleja dependiente de la frecuencia (Z_c , Pa · s/m) y el número de onda complejo (k_c , rad/m) son definidos de la siguiente manera [Johnson et al., 1987; Allard & Champoux, 1992]

$$Z_c = \sqrt{\rho_{JCA} K_{JCA}} \quad , \quad (2.11)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\frac{\rho_{JCA}}{K_{JCA}}} . \quad (2.12)$$

Estas dos magnitudes permiten calcular la impedancia de superficie (Z_s) de una muestra rígidamente respaldada, de espesor t , como

$$Z_s = -jZ_c \coth(k_c t). \quad (2.13)$$

El coeficiente de absorción acústica en incidencia normal se calcula a partir de la ecuación (2.13), como

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2. \quad (2.14)$$

La impedancia característica compleja, Z_c , y el número de onda complejo, k_c , pueden ser predichos a partir de la estimación de cuatro parámetros que intervienen en el modelo JCA (porosidad, tortuosidad, longitud característica viscosa y térmica). Estos parámetros son fundamentales para poder describir el comportamiento acústico de materiales porosos y fibrosos.

La porosidad (\emptyset) se define como la relación entre el volumen de aire que contiene el material con respecto al volumen total que ocupa, y se puede estimar en función de las densidades volumétricas del material, ρ_m , y de la fibra, ρ_f , como [Voronina, 1994]:

$$\emptyset = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_f}. \quad (2.15)$$

La tortuosidad (α_∞) describe la influencia de la estructura interna de un material en sus propiedades acústicas. Según [Umnova et al., 2005], la tortuosidad depende de la porosidad de la siguiente manera

$$\alpha_\infty = 1 + (1 - \emptyset)(2\emptyset)^{-1}. \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) es válida para materiales porosos de esqueleto rígido.

La longitud característica viscosa (Λ) está relacionada con el tamaño más pequeño de los poros y se utiliza para describir los efectos disipativos visco–inerciales [Johnson et al., 1987]. La longitud característica térmica (Λ') está relacionada con el tamaño más grande de los poros y se usa para caracterizar el efecto de disipación térmica [Allard & Champoux, 1992], como

$$L = \frac{4\rho_m}{\pi\rho_f d^2} , \quad (2.17)$$

$$\Lambda' = 2\Lambda = \frac{1}{\pi RL} , \quad (2.18)$$

donde L es el tamaño de la celda (ver Figura 2.2), d es el diámetro medio del poro y $R = d/2$.

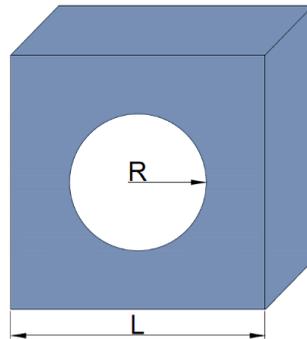


Figura 2.2. Geometría de la celda: caso de sección transversal circular. L es el tamaño de la celda y R es el radio medio del poro.

En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de funcionamiento del modelo JCA, donde se compara la medida experimental del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y la predicha por el modelo para una espuma de poliuretano de espesor $t = 2$ cm. Como se puede ver en la Figura 2.3, de 400 Hz a 2000 Hz no hay

diferencias significativas entre el modelo JCA y las medidas. En cambio, de 2000 Hz a 3150 Hz, sí que se observan ligeras diferencias que pueden deberse a imperfecciones en el material poroso analizado.

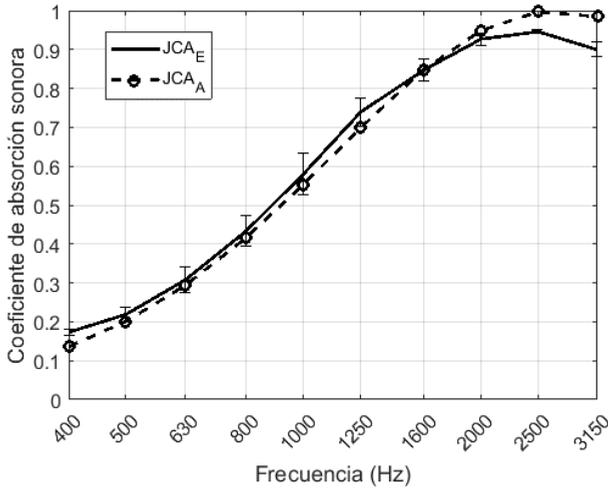


Figura 2.3. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para una espuma de poliuretano de espesor $t = 2$ cm. Comparación entre la medida experimental JCA_E (línea sólida) y la predicha por el modelo JCA_A (línea discontinua).

2.2.3 Material de doble porosidad

Se conoce como material meso-perforado o de doble porosidad (DP) al material resultante de perforar un medio poroso. Auriault & Boutin [Auriault & Boutin, 1993] propusieron un modelo general para describir el comportamiento acústico de un material meso-perforado, que presenta dos redes periódicas de poros interconectados de diferente tamaño (véase Figura 2.4). La relación de escala entre los mesoporos y los microporos es pequeña ($\approx 10^{-1}$). Este modelo se aplica en el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles, para la caracterización acústica de la espuma de poliuretano perforada.

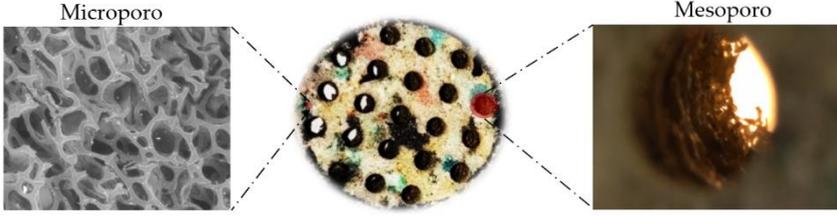


Figura 2.4. Representación esquemática de una espuma de poliuretano perforada donde se puede apreciar la diferencia entre el microporo y el mesoporo.

El método de homogeneización para estructuras periódicas se utiliza para describir la propagación de las ondas en medios con doble porosidad, desde el punto de vista macroscópico. Las expresiones de densidad dinámica compleja (ρ_{dp}) y del módulo de compresibilidad complejo (K_{dp}) para un medio homogéneo están dadas por [Olhy & Boutin, 2003]:

$$\rho_{dp} = \left(\frac{1-\emptyset_M}{\rho_m} + \frac{1}{\rho_M} \right)^{-1}, \quad (2.19)$$

$$K_{dp} = \left(\frac{1-\emptyset_M}{K_m} + \frac{1}{K_M} \right)^{-1}, \quad (2.20)$$

donde \emptyset_M es la meso-porosidad. Los subíndices m y M hacen referencian a los microporos y mesoporos, respectivamente.

La densidad dinámica compleja (ρ_M) y el módulo de compresibilidad complejo (K_M) de los orificios cilíndricos de sección circular pueden calcularse a partir del modelo simplificado propuesto por Zwikker–Kosten [Zwikker & Kosten, 1949]:

$$\rho_M = \frac{\rho_0}{\emptyset_M \cdot \left(1 - \frac{2J_1(s\sqrt{-j})}{s\sqrt{-j}J_0(s\sqrt{-j})} \right)}, \quad (2.21)$$

$$K_M = \frac{\gamma P_0}{\emptyset_M \cdot \left(\gamma - (\gamma - 1) \cdot \left(1 - \frac{2J_1(N_{Pr}s\sqrt{-j})}{N_{Pr}s\sqrt{-j}J_0(N_{Pr}s\sqrt{-j})} \right) \right)}, \quad (2.22)$$

donde $s = R \left(\frac{\omega \rho_0}{\mu} \right)^{1/2}$, R es el radio de la sección transversal circular (mesoporos cilíndricos), J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de primer tipo, de orden cero y uno, respectivamente.

En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de la aplicación del modelo de doble porosidad, donde se compara la medida experimental del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y la predicha por el mismo. Se ha utilizado para ello una espuma de poliuretano, de espesor $t = 2$ cm, perforada con una tasa de perforación $\emptyset_M = 20\%$, un diámetro de perforación $D = 4$ mm y una profundidad de perforación completa. La resistividad al flujo de la espuma utilizada es de $\sigma = 20.4$ kPa·s·m⁻². Como se puede ver en la Figura 2.5, entre 1000 Hz y 2000 Hz hay una ligera desviación del modelo respecto del valor experimental, pero esta desviación se encuentra dentro del porcentaje de dispersión de las medidas experimentales, representado a partir de barras de error.

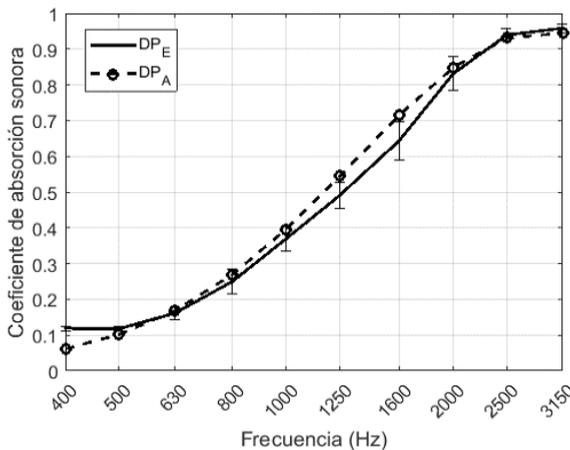


Figura 2.5. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para una espuma de poliuretano perforada de espesor $t = 2$ cm, $\emptyset_M = 20\%$ y $D = 4$ mm. Comparación entre la medida experimental DP_E (línea sólida) y la predicha por el modelo DP_A (línea discontinua).

2.2.4 Pérdidas visco-térmicas

El modelo de pérdidas visco-térmicas (MPV) es de gran importancia a la hora de modelar correctamente la propagación de la onda sonora dentro del tubo de impedancia. El MPV se utiliza en el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles a fin de tener en cuenta la fricción de la onda sonora con las paredes del tubo de impedancia y con las paredes de materiales de doble-porosidad [Zwikker & Kosten, 1949; Romero et al., 2016]. En este punto es clave destacar la importancia de distinguir entre la absorción de la muestra y la del aire. Aunque los efectos energéticos en las ondas sonoras son similares, el objeto que produce las pérdidas, así como los fenómenos físicos, son distintos en ambos casos (muestra y aire). Por tanto, las pérdidas se modelan de forma distinta utilizando las siguientes expresiones de número de onda e impedancia [Zwikker & Kosten, 1949]

$$k_c = \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{\kappa}{s} (1 + (\gamma - 1)/\chi) \right) , \quad (2.23)$$

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{s} \left(1 + \frac{\kappa}{s} (1 - (\gamma - 1)/\chi) \right) , \quad (2.24)$$

siendo $s = R_i/\delta$, donde R_i es el radio interior del tubo de impedancia y $\delta = \sqrt{2\mu/\rho_0\omega}$ es el espesor de la capa límite viscosa, $\kappa = (1 + j)/\sqrt{2}$, y $\chi = \sqrt{Pr}$ es la raíz cuadrada del número de Prandtl a presión atmosférica. A bajas frecuencias, en el tubo de impedancia utilizado, las partes imaginarias de k_c y Z_c son despreciables.

2.3 Membrana permeable

En esta sección, el modelo de membrana se aplica a los tejidos textiles. Estos tejidos pueden considerarse delgados en comparación con la longitud de onda de la onda sonora incidente ya que su espesor es mucho menor que la longitud de onda menor en el rango de trabajo

($t \ll \lambda$). Pueden, por tanto, caracterizarse acústicamente como una membrana permeable. Para el modelo, además de esta hipótesis, también se han considerado los fenómenos de disipación de energía [Sakagami et al., 1998; Kang & Fuchs, 1999; Pieren, 2012].

Supongamos una onda plana que se propaga en el aire desde la izquierda e incide sobre la estructura con un ángulo θ_0 , con respecto al vector normal de la superficie de la membrana (véase la Figura 2.6). Cuando la onda sonora incide sobre la superficie del material, parte de la energía sonora se refleja, parte se transmite y parte es absorbida por la membrana debido a la fricción interna y a los efectos viscoelásticos [Sakagami et al., 2014].

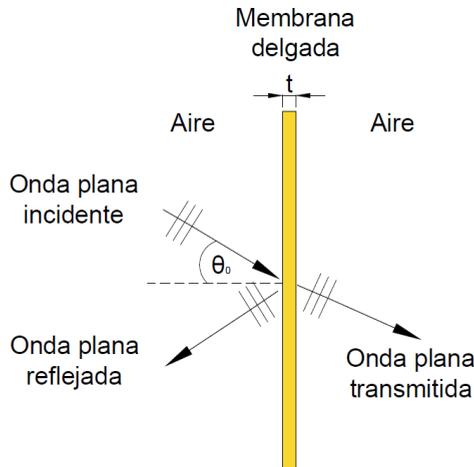


Figura 2.6. Esquema básico del sistema de membrana. t es el espesor de la membrana. θ_0 es el ángulo de incidencia.

Se muestra aquí la caracterización acústica de la membrana permeable delgada por medio de su impedancia acústica. Como se ha comentado anteriormente, la membrana se asume que es acústicamente delgada (mucho más pequeña que la longitud de onda en el rango de frecuencias de trabajo) hasta la frecuencia $f_u = c_0/t$, siendo c_0 la velocidad del sonido en el aire. Por tanto, f_u determina la frecuencia de corte superior de validez del modelo.

En el modelo de membrana [Kang & Fuchs, 1999; Pieren, 2012], la membrana permeable se describe acústicamente mediante el uso de dos parámetros: la resistencia al flujo de aire (R_s) y la densidad de masa superficial (m_f). La resistencia al flujo R_s (Pa·s/m) describe la pérdida de energía acústica en la membrana debido a los efectos viscosos y puede expresarse mediante la relación entre la diferencia de presión a través de la membrana permeable, Δp , y la velocidad del flujo de aire u , como

$$R_s = \frac{\Delta p}{u} . \quad (2.25)$$

El comportamiento mecánico de la membrana se describe a partir de la segunda ley de Newton a fin de estimar las vibraciones inducidas que ocurren dentro de la membrana, como

$$\Delta p = m_f \frac{\partial u_M}{\partial t} , \quad (2.26)$$

donde m_f es la densidad de masa superficial y u_M es la velocidad de partícula de la membrana.

En el dominio de la frecuencia, la membrana puede caracterizarse a partir de la impedancia mecánica, Z_M , como

$$Z_M = R_M + i\omega m_f , \quad (2.27)$$

donde R_M es la rigidez a la flexión, que describe las pérdidas debidas a la fricción mecánica en la membrana. Depende de varios factores, como el ángulo de incidencia y los parámetros intrínsecos de la membrana. El comportamiento inercial de la membrana está representado por la parte reactiva de Z_M . Para materiales de bajo espesor como los tejidos textiles, normalmente la rigidez a la flexión (R_M) es muy pequeña, por tanto, a menudo sólo se tiene en cuenta el factor inercial de la membrana que está dado por $i\omega m_f$. En esta Tesis, R_M no es tomada en consideración, por tanto, la impedancia mecánica

del tejido se modela únicamente con $i\omega m_f$, tal y como se asume en otros trabajos [Atalla & Sgard, 2007; Allard & Atalla, 2009; Pieren et al., 2012].

La impedancia acústica de la membrana, Z_{mem} , se puede calcular a partir de las ecuaciones (2.25) y (2.27), a través de una combinación en paralelo de las impedancias R_s y Z_M , como

$$Z_{\text{mem}}(\omega) = R_s \parallel Z_M = \frac{Z_M R_s}{Z_M + R_s} \quad , \quad (2.28)$$

$$\text{Real}\{Z_{\text{mem}}\} = \frac{R_s (\omega m_f)^2}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} \quad , \quad (2.29)$$

$$\text{Imag}\{Z_{\text{mem}}\} = \frac{R_s^2 \omega m_f}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} \quad . \quad (2.30)$$

2.4 Método de la matriz de transferencia

El método de la matriz de transferencia (MMT) se puede utilizar en el análisis de problemas de propagación y dispersión de las ondas sonoras, elásticas y electromagnéticas en una dimensión. Este método resulta ser de gran utilidad en sistemas que se pueden representar a través de una secuencia de subsistemas, donde se interactúa solo con sistemas adyacentes [Campa & Camporeale, 2010]. Por tanto, este método se aplica en el Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles y en el Capítulo 7-Tejidos textiles plegados, con la finalidad de caracterizar acústicamente tejidos respaldados por una cavidad de aire. El método de la función de transferencia supone que las ondas se propagan en una dimensión, pero este método puede utilizarse para modelar sistemas 2D o 3D, donde se puede describir la propagación sonora en una dimensión [Mechel, 2008]. A partir del MMT se puede estimar la impedancia característica y el número de onda de los materiales bajo estudio [Song & Bolton, 2000].

La matriz de transferencia de un sistema, \mathbf{T} , describe el comportamiento acústico del mismo desde $x=0$ a $x=r$ (véase la Figura 2.7). Se utiliza para relacionar la presión sonora, p , y la componente x de la velocidad de la partícula, u , entre las dos caras del sistema [Allard & Atalla, 2009; Verdière et al., 2013], tal y como se expresa a continuación

$$\begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=0} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=r} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=r} . \quad (2.31)$$

En la Figura 2.7 se muestra un sistema compuesto por un elemento acústico de profundidad r , en el que una onda plana incidente (p_i), emitida por una fuente sonora colocada en un extremo del tubo de impedancia, interactúa con el sistema, en el que parte de su energía se refleja (p_r) y otra parte se transmite (p_t). Además, otra parte de la energía es absorbida en caso de considerar las pérdidas en el sistema.

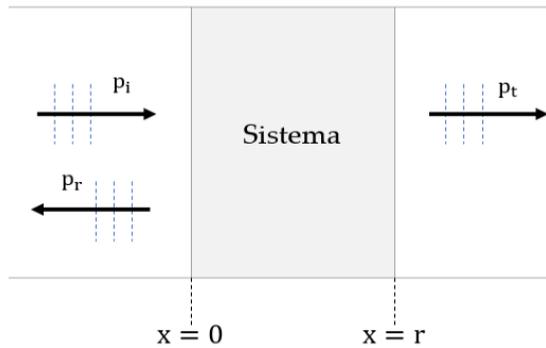


Figura 2.7. Esquema 1D del elemento acústico. Descripción elemental del método de la matriz de transferencia (MMT).

En el Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles y en el Capítulo 7-Tejidos textiles plegados se estudia la absorción acústica de un sistema compuesto por una membrana delgada y una cavidad de aire (véase la Figura 2.8). La matriz de transferencia de una cavidad de aire, T_{ac} , con una profundidad r , y la de una membrana permeable,

T_{mem} , se puede expresar [Verdière et al., 2013; Prasetyo et al., 2018; Zenong et al., 2019] como

$$T_{\text{ac}} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 r) & jZ_0 \sin(k_0 r) \\ \frac{j}{Z_0} \sin(k_0 r) & \cos(k_0 r) \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

$$T_{\text{mem}} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{\text{mem}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

donde Z_0 es la impedancia característica del aire, k_0 es el número de onda y Z_{mem} es la impedancia de transferencia acústica de la membrana.

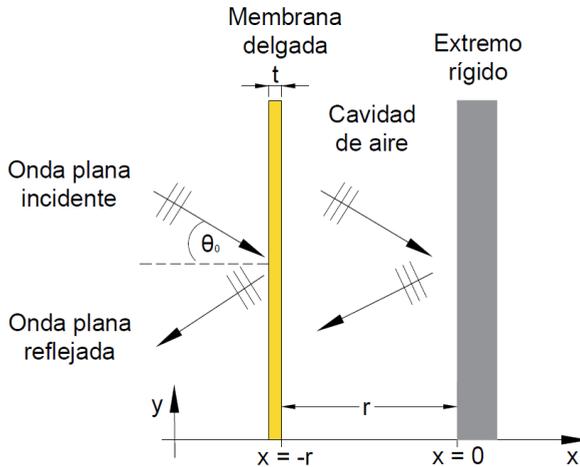


Figura 2.8. Configuración del sistema membrana permeable-cavidad de aire. r es la profundidad de la cavidad de aire; t es el espesor de la muestra; θ_0 es el ángulo de incidencia.

La terminación del dispositivo en condiciones de contorno rígido ($u \rightarrow 0$) puede ser representada a partir de un vector columna, como

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

La matriz de transferencia de la estructura, T_s , que está formada por la membrana permeable, la cavidad de aire y el extremo rígido, se puede expresar como

$$T_s = T_{\text{mem}} \cdot T_{\text{ac}} \cdot B. \quad (2.35)$$

La impedancia de superficie, Z_s , del sistema se puede obtener a partir del cociente entre el primer y el segundo elemento de la ecuación (2.35), como

$$Z_s = \frac{p_1}{u_1} = \frac{T_s(1)}{T_s(2)}, \quad (2.36)$$

siendo u_1 la velocidad normal.

Una vez obtenida la impedancia de superficie, el coeficiente de absorción acústica se calcula como en la ecuación (2.14).

En la Figura 2.9, se muestra el funcionamiento del modelo para un tejido textil, de espesor $t \approx 2$ cm, y respaldado por una cavidad de aire de 10 cm. El valor de resistividad al flujo del tejido sujeto a ensayo es $\sigma = 225$ kPa·s·m⁻² y su densidad superficial $m_f = 240$ g/m². Como se puede observar en la Figura 2.9, el MMT estima de manera adecuada la posición de la primera frecuencia de resonancia ($f_{\text{res}} = 630$ Hz). Por debajo de 315 Hz, las diferencias se deben a las limitaciones del tubo de impedancia, que son descritas en la Sección 3.1 del Capítulo 3- Métodos experimentales. En medias y altas frecuencias, se tiene una buena aproximación entre el método y las medidas, las ligeras diferencias pueden deberse a la falta de homogeneidad de los tejidos usados.

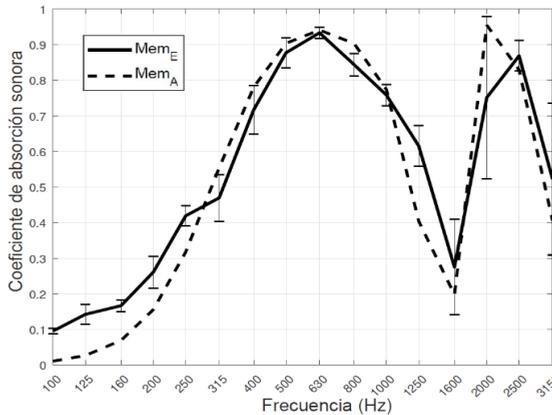


Figura 2.9. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal para un tejido textil de espesor $t \approx 0.2$ cm respaldado por una cavidad de aire de 10 cm. Comparación entre la medida experimental Mem_E (línea sólida) y la predicha por el modelo Mem_A (línea discontinua).

2.5 Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico lineal de aproximación de problemas continuos que es utilizado para modelar y simular diferentes fenómenos físicos que aparecen en los sistemas estudiados, con la finalidad de validar los modelos teóricos y los resultados experimentales [Kampinga et al., 2011]. Este método se basa en la discretización de los dominios que componen cada uno de los sistemas, resolviendo las ecuaciones que gobiernan la física de cada elemento resultante [Ihlenburg, 1998]. La aplicación de este método resulta de gran interés cuando el modelo a desarrollar presenta una geometría compleja, el rango de los parámetros bajo estudio es muy amplio o cuando no se puede proporcionar resultados precisos mediante cálculos manuales [Oladejo et al., 2012]. Este método se aplica en el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles a fin de predecir la absorción acústica del sistema tejido-espuma.

En el modelo, la propagación del sonido en el tubo de impedancia se estudia resolviendo la ecuación de Helmholtz en régimen armónico ($e^{i\omega t}$), como

$$\nabla^2 p(\omega) + k^2 p(\omega) = 0 \quad , \quad (2.37)$$

donde k es el número de onda sin pérdidas, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$ representa el Laplaciano y p es la amplitud compleja de la presión acústica.

Para un tubo de impedancia perfectamente rígido, la condición de contorno es de tipo Neumann, siendo la componente normal de la velocidad de partícula igual a cero,

$$-\vec{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\vec{\nabla} p) \right) = 0 \quad , \quad (2.38)$$

donde \vec{n} es el vector normal a la superficie y ρ_c es la densidad del medio. En la derivación de la ecuación (2.38) se ha utilizado la ecuación de Euler linealizada.

En todos los modelos utilizados en esta Tesis, la fuente sonora se modeliza por medio de una onda plana con una amplitud normalizada de 1 Pa. Al resolver numéricamente la ecuación (2.37), se obtiene el campo de presión sonora resultante para cada frecuencia f , relacionada con la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$.

Para la convergencia del modelo, el elemento de malla se ha de escoger tal que cumpla la condición $\Delta x < c_0 / (8 \cdot f_{\max})$. Al respetar este criterio, se asegura la convergencia de la malla [Courant et al., 1967]. De esta manera, el método de simulación utiliza al menos 8 elementos por longitud de onda y permite obtener un cálculo preciso hasta la frecuencia máxima de interés: 3150 Hz. Por tanto, para la modelización del tubo de impedancia se utiliza un tamaño de malla $\Delta x \approx 14$ mm.

Los resultados de las simulaciones numéricas son analizados a través de herramientas de postprocesado del campo acústico con objeto de compararlos, posteriormente, con los datos teóricos y experimentales. En esta Tesis se ha utilizado el software comercial de elementos finitos COMSOL Multiphysics® versión 5.5 situado en el servidor IUMPA-2 de la Universitat Politècnica de València. Se ha escogido este software de elementos finitos porque permite utilizar de manera sencilla y cómoda todos los modelos descritos en este capítulo.

El sistema del IUMPA-2 cuenta con 256 GB de RAM y dos procesadores Intel® Xeon® CPU E5-2680 v2 con una frecuencia de funcionamiento de 2.80 GHz. Atendiendo a estas características principales, el tiempo de cálculo es aproximadamente de una hora para las simulaciones de los modelos 2D y de un día para los modelos 3D de esta Tesis.

Referencias

[Delany & Bazley, 1970] Delany ME, Bazley EN. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl Acoust*, 1970;3(2):105–116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9).

[Nelder & Mead, 1965] Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *Comput J*, 1965;7(4):308–313.

[Johnson et al., 1987] Johnson DL, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J Fluid Mech*, 1987;176:379–402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>.

[Allard & Champoux, 1992] Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am*, 1992;91:3346–3353. <https://doi.org/10.1121/1.402824>.

[Verdière et al., 2013] Verdière, K, Panneton, R, Elkoun S, Dupont T, Leclaire P. Transfer matrix method applied to the parallel assembly of sound absorbing materials. *J Acoust Soc Am*, 2013;134(6):4648–4658. <http://dx.doi.org/10.1121/1.4824839>.

[Prasetiyo et al., 2018] Prasetiyo I, Desendra G, Hermanto MN, Adhika D. On woven fabric sound absorption prediction. *Arch Acoust*, 2018;43(4):707–715. <https://doi.org/10.24425/aoa.2018.125164>.

[Zenong et al., 2019] Zenong C, Xianhui L, Xiaoling G, Bin Z, Tuo X. Optimization of sound absorption performance of woven fabric. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Madrid, Spain, 16–19 June, 2019;2916–2923(8).

[Voronina, 1994] Voronina N. Acoustical properties of fibrous materials. *Appl Acoust*, 1994;42:165–174. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0003-682X(94)90005-1).

[Voronina, 1996] Voronina N. Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. *Appl Acoust*, 1996;48(2):121–132. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(95\)00055-E](https://doi.org/10.1016/0003-682X(95)00055-E).

[Voronina, 1998] Voronina N. An empirical model for elastic porous materials. *Appl Acoust*, 1998;55(1):67–83. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00098-4](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00098-4).

[Voronina, 1999] Voronina N. An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity. *Appl Acoust*, 1999;58:295–304. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00076-0).

[Voronina & Horoshenkov, 2003] Voronina N, Horoshenkov KV. A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media. *Appl Acoust*, 2003;64:415–432. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(02\)00105-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(02)00105-6).

[Umnova et al., 2005] Umnova O, Attenborough K, Ho-Chul S, Cummings A. Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Appl Acoust*, 2005;66:607–624. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.02.005>.

[Sakagami et al., 1998] Sakagami K, Kiyama M, Morimoto M, Takahasi D. Detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane. *Appl Acoust*, 1998;54(2):93–111. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00085-6).

[Kang & Fuchs, 1999] Kang J, Fuchs HV. Predicting the absorption of open wave textiles and micro perforated membranes backed by an air space. *J Sound Vib*, 1999;220(5):905–920. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1977>.

[Pieren, 2012] Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text Res J*, 2012;82(9):864–874. <https://doi.org/10.1177/0040517511429604>.

Capítulo 2. Modelos y métodos

[Atalla et al., 2001] Atalla N, Sgard F, Olny X, Panneton R. Acoustic absorption of macro-perforated porous materials. *J Sound Vib*, 2001;243(4):659–678. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3435>.

[Olny & Boutin, 2003] Olny X, Boutin C. Acoustic wave propagation in double porosity media. *J Acoust Soc Am*, 2003;114(1):73–89. <https://doi.org/10.1121/1.1534607>.

[Zwikker & Kosten, 1949] Zwikker C, Kosten CW. Sound absorbing materials. New York: Elsevier, 1949.

[Sgard et al., 2005] Sgard FC, Olny X, Atalla N, Castel F. On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Appl Acoust*, 2005; 66:625–651. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.09.008>.

[Carbajo et al., 2019] Carbajo J, Prieto A, Ramis J, Río–Martín L. A non-parametric fluid-equivalent approach for the acoustic characterization of rigid porous materials. *Appl Math Model*, 2019;76: 330–347. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.05.046>.

[Arenas et al., 2020] Arenas J, del Rey R, Alba J, Oltra R. Sound–absorption properties of materials made of esparto grass fibers. *Sustainability*, 2020;14(12):5533. <https://doi.org/10.3390/su12145533>.

[Atiéndzar–Navarro et al., 2020] Atiéndzar–Navarro R, del Rey R, Alba J, Sánchez–Morcillo VJ, Picó R. Sound absorption properties of perforated recycled polyurethane foams reinforced with woven fabric. *Polymers*, 2020;12(2), 401. <https://doi.org/10.3390/polym12020401>.

[Othmani et al., 2017] Othmani C, Taktak M, Zain A, Hantati T, Dauchez N, Elnady T, Fakhfakh T, Haddar M. Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes. *Appl Acoust*, 2017;120:90–97. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.010>.

[Del Rey et al., 2017] Del Rey R, Uris A, Alba J, Candelas P. Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications. *Materials*, 2017;10(11):1277. <https://doi.org/10.3390/ma10111277>.

[Ramis et al., 2014] Ramis J, del Rey R, Alba J, Godinho L, Carbajo J. A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber. *Mater construcc*, 2014; 64(313):1–7. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00513>.

[Del Rey et al., 2011] Del Rey R, Alba J, Ramis J, Sanchis V. New absorbent acoustics materials from plastic bottle remnants. *Mater Construcc*, 2011;61,204:547–558. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.59610>.

[Ramis et al., 2010] Ramis J, Alba J, del Rey R, Escuder E, Sanchís VJ. New absorbent material acoustic base on kenaf's fibre. *Mater Construcc*, 2010;60(299):133–143. <https://doi.org/10.1016/10.3989/mc.2010.50809>.

[UNE-EN 12354-6:2004] UNE-EN 12354-6:2004, Acústica en la edificación. “Estimación de las características de las edificaciones a partir de las características de sus elementos”, parte 6, “Absorción sonora en espacios cerrados”.

[Romero–García et al., 2016] Romero–García V, Theocharis G, Richoux O, Pagneux V. Use of complex frequency plane to design broadband and sub-wavelength absorbers. *J Acoust Soc Am*, 2016; 139: 3395–3403. <https://doi.org/10.1121/1.4950708>.

[Sakagami et al., 2014] Sakagami K, Fukutani Y, Yairi M, Morimoto M. A theoretical study on the effect of a permeable membrane in the air cavity of a double-leaf microperforated panel space sound absorber. *Appl Acoust*, 2014;79:104–109. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.12.015>.

[Campa & Camporeale, 2010] Campa G, Camporeale SM. Application of transfer matrix method in acoustics. In: Proceedings of the COMSOL Conference, 2010.

[Mechel, 2008] Mechel FP. Formulas of acoustics. Springer–Verlag, Berlín, Heidelberg, New York, 2008.

[Song & Bolton, 2000] Song BH, Bolton JS. A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials. *J Acoust Soc Am*, 2000;107(3):1131–1152. <https://doi.org/10.1121/1.428404>.

[Kampinga et al., 2011] Kampinga WR, Wijnant YH, Boer A. An efficient finite element model for viscothermal acoustics. *Acta Acust United Acust*, 2011;97(4):618–631. <https://doi.org/10.3813/AAA.918442>.

[Ihlenburg, 1998] Ihlenburg F. Finite element analysis of acoustics scattering. Springer, 1998.

[Oladejo et al., 2012] Oladejo KA, Abu R, Adewale MD. Effective modeling and simulation of engineering problems with COMSOL Multiphysics. *Int J Sci and Technol*, 2012;2(10):742–748.

[Courant et al., 1967] Courant R, Friedrichs K, Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM J Res Dev*, 1967;2(11),215–234.

[Allard & Atalla, 2009] Allard JF, Atalla N. Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing Materials. John Wiley & Sons, 2nd ed., 2009.

Capítulo 2. Modelos y métodos

[Allard, Champoux & Depollier, 1987] Allard JF, Champoux Y, Depollier, C. Modelization of layered sound absorbing materials with transfer matrices. *J Acoust Soc Amer*, 1987;82: 1792–6.

[Allard, 1993] Allard, J.F. (1993) Propagation of sound in Porous media. Modeling sound absorbing materials. Chapter 11, Elsevier Applied Science, London.

[Brouard, Lafarge & Allard, 1994] Brouard B, Lafarge D, Allard JF. Measurement and prediction of the surface impedance of a resonant sound absorbing structure. *Acta Acustica* 1994;2:301–306.

[Katragadda, Lai & Bolton, 1995] Katragadda S, Lai HY, Bolton JS. A model for sound absorption by and sound transmission through limp fibrous layers. *J Acoust Soc Am*, 1995;98:2977.

[Atalla & Sgard, 2007] Atalla N, Sgard, F. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *J Sound Vib*, 2007;303(1-2):195–208.

[Chevillotte, 2012] Chevillotte, F. Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Appl Acoust*, 2012;73(1), 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.07.005>.

[Takahashi, Sakagami & Marimoto, 1996] Takahashi D, Sakagami K, Morimoto M. Acoustic properties of permeable membranes. *J Acoust Soc Am*, 1996;99(5), 3003–3009. <https://doi.org/10.1121/1.415213>.

[Auriault and Boutin, 1993] Auriault J, Boutin C. Deformable porous media with double porosity. Quasi-statics. II: Memory effects. *Transp Porous Med*, 1993;10:153–169. <https://doi.org/10.1007/BF00617006>.

[Boutin, Royer & Auriault, 1998] Boutin C, Royer P, Auriault JL. Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity. *Int J Solids and Struct*, 1998;35(34-35):4709–4737. [https://doi.org/10.1016/s0020-7683\(98\)00091-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7683(98)00091-2).

[Mason, 1966] Mason V. On the coupling of a membrane with an incident sound field. *J Sound Vib*, 1966;4:9–17.

Capítulo 3

Métodos experimentales

En este capítulo se describen, con detalle, los métodos experimentales utilizados para la caracterización acústica de las soluciones que se presentan en este trabajo de Tesis basadas en textiles. Los contenidos de este capítulo están organizados en dos secciones. La Sección 3.1 está dedicada a la descripción del tubo de impedancia que se utiliza para medir mediante la técnica de los dos micrófonos, tanto el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal como la resistencia específica al flujo de los materiales estudiados en el Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles, en el Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles, y en el Capítulo 7-Tejidos textiles plegados. En el Capítulo 4-Estructura de la fibra textil se utiliza el tubo de impedancia únicamente para obtener el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. En la Sección 3.2 se describen las características generales de una cámara

reverberante de pequeñas dimensiones. Ésta es utilizada para poder conocer el coeficiente de absorción acústica bajo incidencia aleatoria de los materiales estudiados en el Capítulo 7-Tejidos textiles plegados.

3.1 Tubo de impedancia

Los métodos utilizados a lo largo de esta Tesis para la caracterización acústica de las muestras son los descritos, por un lado, en la norma ISO 10534-2:1998 [ISO 10534-2, 1998], para determinar el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal (α); por otro lado, las recomendaciones de Ingard & Dear en [Ingard & Dear, 1985] para medir la resistencia al flujo de aire (R_s) y, posteriormente, calcular la resistividad específica al flujo (σ), que se define como la resistencia al flujo de aire dividida por el espesor de la muestra.

3.1.1 Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. Método de la función de transferencia

El coeficiente de absorción acústica (α) en incidencia normal se mide a través de un tubo de impedancia según la norma ISO 10534-2:1998 [ISO 10534-2:1998]. El método de ensayo descrito en esta norma está basado en el método de la función de transferencia y requiere el uso de dos posiciones fijas de micrófono, un sistema digital de análisis de señal, un ordenador para el tratamiento de la señal y una fuente sonora. Este método presenta la ventaja de requerir poco espacio de trabajo en el laboratorio y permite evaluar las propiedades de absorción acústica usando solamente muestras del mismo tamaño que el diámetro del tubo de impedancia, ayudando así a reducir costes y recursos.

El tubo de impedancia utilizado es un tubo de metacrilato hermético con paredes completamente rígidas y transparentes, con una sección circular de 4 cm de diámetro. Los micrófonos

(Brüel&Kjær de campo libre de ½ pulgada – tipo 4190) se montan en la pared del tubo de forma rasante y se colocan cerca de la muestra de ensayo a fin de poder registrar la presión acústica. En un extremo del tubo se coloca la muestra del material a caracterizar y en el otro extremo se monta una fuente sonora capaz de emitir ondas planas (Beyma CP800Ti). Como sistema de análisis de señal se ha utilizado Pulse LabShop v.22.2.0.197.

Cada ensayo se repite al menos con tres muestras de geometría idéntica y siempre utilizando las mismas condiciones de montaje, con el objetivo de reducir el error de dispersión producido por la variabilidad presentada por el material, la variabilidad en el corte de las muestras y otros factores experimentales. Además, el material debe ajustarse perfectamente al porta-muestras sin llegar a comprimirlo.

Las medidas experimentales realizadas en todos los estudios de la Tesis cubren un rango de frecuencias de 100 Hz a 3150 Hz. Estos límites frecuenciales están establecidos por las restricciones impuestas por la distancia entre las dos posiciones de micrófono, la precisión del equipo de procesado de señal y del diámetro interno del tubo de impedancia [ISO 10534-2:1998]. Para la aplicación del método, la longitud de onda que se propaga a través del tubo (λ) debe ser mucho mayor que la sección transversal del tubo de impedancia para poder asegurar la propagación de ondas planas. Por tanto, la siguiente condición: $\lambda \gg 1.7D_i$, donde D_i es el diámetro interno del tubo debe cumplirse.

El coeficiente de reflexión acústica complejo en incidencia normal está definido como $r = p_r/p_i$, siendo p_r y p_i la presión acústica de la onda reflejada e incidente, respectivamente. Éste puede determinarse a partir de la función de transferencia, H_{12} , entre ambas posiciones de micrófono frente a la muestra ensayada, y ésta viene definida como $H_{12} = p_2/p_1$, siendo p_2 y p_1 las presiones acústicas complejas en las dos posiciones de micrófono 2 y 1, respectivamente (ver Figura 3.1).

En régimen armónico ($e^{j\omega t}$), las expresiones de la presión acústica de la onda plana incidente y reflejada se pueden expresar, respectivamente, como

$$p_i(x, t) = Ae^{j(\omega t - k_0 x)} \quad , \quad (3.1)$$

$$p_r(x, t) = Be^{j(\omega t + k_0 x)} \quad , \quad (3.2)$$

donde A y B son las amplitudes de presión compleja de las ondas que se propagan en la dirección positiva y negativa del eje x, respectivamente, $k_0 = \omega/c_0$ es el número de onda, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, siendo f la frecuencia en Hz y c_0 es la velocidad del sonido en el aire.

Las expresiones de la velocidad de partícula de la onda incidente y reflejada se pueden describir respectivamente por

$$u_i(x, y, t) = \frac{p_i(x, t)}{Z_0} \quad , \quad (3.3)$$

$$u_r(x, y, t) = -\frac{p_r(x, t)}{Z_0} \quad , \quad (3.4)$$

donde $Z_0 = \rho_0 c_0$ es la impedancia característica del aire siendo ρ_0 la densidad del aire.

Las expresiones de las presiones acústicas p_1 y p_2 se basan en una superposición de la onda incidente (A) y de la onda reflejada (B) evaluadas en 1 y en 2, como

$$p_1(x, t) = Ae^{j(\omega t - k_0 x_1)} + Be^{j(\omega t + k_0 x_1)} \quad , \quad (3.5)$$

$$p_2(x, t) = Ae^{j(\omega t - k_0 x_2)} + Be^{j(\omega t + k_0 x_2)} \quad , \quad (3.6)$$

donde x_1 (m) y x_2 (m) son la distancia desde la muestra de ensayo al micrófono más alejado y más cercano, respectivamente.

A partir de las ecuaciones (3.5) y (3.6) y teniendo en cuenta que el coeficiente de reflexión también se puede definir como $r=B/A$, la función de transferencia compleja, \hat{H}_{12} , se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\hat{H}_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{-jk_0x_2} + re^{jk_0x_2}}{e^{-jk_0x_1} + re^{jk_0x_1}} \quad (3.7)$$

Cuando se utiliza la técnica de los dos micrófonos se produce un desajuste de amplitud y fase entre los canales de entrada de ambos micrófonos que debe corregirse. Por tanto, para corregir este desajuste y minimizar las diferencias en amplitud y fase entre ambos canales se utiliza la técnica basada en la medición repetida con los micrófonos intercambiados. Para cada medida sobre una muestra de ensayo se intercambian los canales obteniendo las funciones de transferencia H'_{12} y H'_{21} a fin de calcular el factor de calibración dado por la ecuación (3.8)

$$H_c = \sqrt{\frac{H'_{12}}{H'_{21}}} = |H_c|e^{j\phi_c} \quad (3.8)$$

donde ϕ_c es el ángulo de fase corregido.

A partir de la ecuación (3.8), la función de transferencia acústica compleja corregida, H_{12} , está dada por:

$$H_{12} = |H_{12}|e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (3.9)$$

El coeficiente de reflexión complejo, $r(\omega)$, para una onda plana en incidencia normal representa la relación compleja entre la amplitud de presión de la onda reflejada y la onda incidente, y se puede expresar como

$$r(\omega) = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (3.10)$$

donde $H_I = e^{jks}$ es la función de transferencia de la onda incidente, $H_R = e^{-jks}$ es la función de transferencia de la onda reflejada y s es la distancia entre ambos micrófonos ($s = 3.2$ cm).

A partir del coeficiente de reflexión complejo, se calcula el coeficiente de absorción acústica y la impedancia acústica específica, respectivamente como

$$\alpha = 1 - |r(\omega)|^2 \quad , \quad (3.11)$$

$$Z = R + jX = Z_0 \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad , \quad (3.12)$$

donde R es la componente real y X es la componente imaginaria.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de la configuración experimental utilizada para este procedimiento.

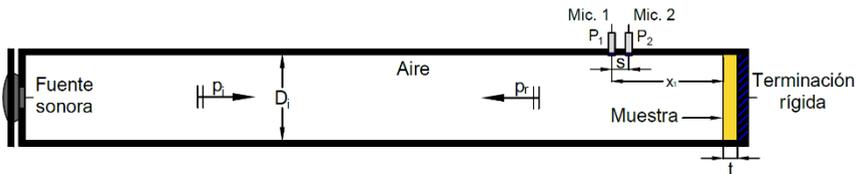


Figura 3.1. Esquema del tubo de impedancia utilizado para medir el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. D_i es el diámetro interior del tubo (en el tubo de impedancia empleado, $D_i = 4$ cm); t es el espesor de la muestra; x_1 es la distancia entre el Mic. 1 y la muestra; p_i es la presión acústica de la onda incidente; p_r es la presión acústica de la onda reflejada; y s es la separación entre ambos micrófonos (en el tubo de impedancia empleado, $s = 3.2$ cm).

El otro método de ensayo utilizado en esta Tesis para la caracterización acústica de materiales se basa en el uso de un tubo de impedancia que presenta una cavidad de aire o plenum (e), que se forma entre el material a ensayo y la pared rígida (ver Figura 3.2). En la norma ISO 10534-2:1998 [ISO 10534-2:1998] se especifica que la muestra sometida a ensayo debe estar apoyada sobre una superficie reflectante, como es la terminación del tubo de impedancia. En el esquema que se muestra en la Figura 3.2, la configuración a ensayar

en tubo de impedancia a fin de conocer el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal está formada por el conjunto del material más la cavidad de aire.

En la Figura 3.3 se puede ver con detalle la parte final del tubo de impedancia, donde se muestra la colocación de ambos micrófonos según la norma [ISO 10534-2:1998], el plénum y el porta-muestras utilizado.

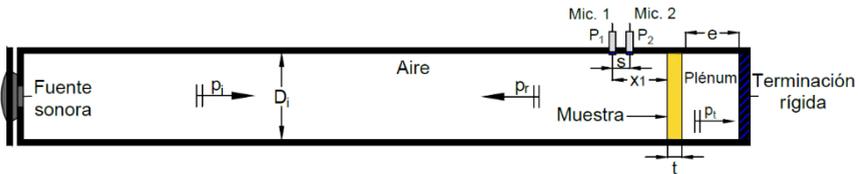


Figura 3.2. Esquema del dispositivo experimental para la medida del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal con una cavidad de aire e . p_t es la presión acústica de la onda transmitida.

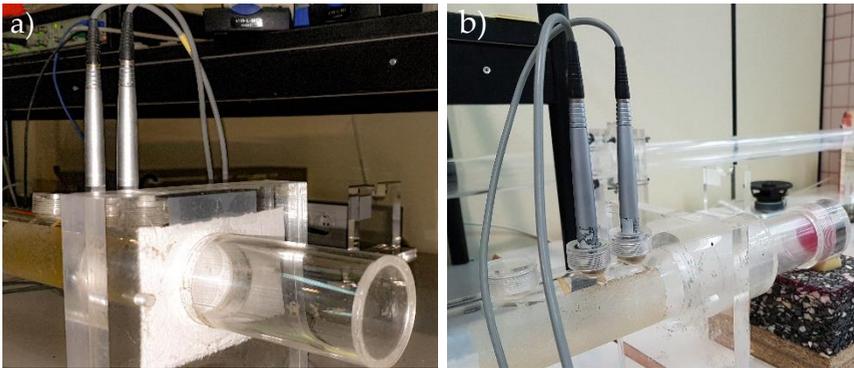


Figura 3.3. Detalle del montaje experimental para la medida del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. a) Cavidad de aire de 10 cm con un tejido de algodón; b) Extremo del tubo de impedancia con un tejido de poliéster colocado en el porta-muestras.

3.1.2 Resistividad al flujo. Método de Ingard & Dear

La resistividad al flujo (σ , Pa·s/m²) es uno de los parámetros más significativos para la caracterización acústica de materiales ya que mide la dificultad de un flujo de aire para fluir a través de un material evaluado en una unidad de espesor. La configuración experimental utilizada se basa en el método indirecto propuesto por Ingard & Dear [Ingard & Dear, 1985]. Este método ha sido muy utilizado como alternativa a la norma ISO 9053:1994 [ISO 9053, 1994]. Ejemplos de ello se pueden encontrar en las referencias [Del Rey et al., 2013; Alba et al., 2019]. Recientemente, se ha publicado la norma ISO 9053:2018 [ISO 9053-1, 2018] que permite la estimación de la resistencia al flujo a partir del tubo de impedancia.

En este método [Ingard & Dear, 1985], el dispositivo de medida está compuesto por un tubo de metacrilato transparente de sección circular situando una fuente sonora en un extremo y en el otro, una terminación completamente rígida. El micrófono 1 (Mic. 1) se sitúa justo delante de la muestra a ensayo para medir directamente la presión sonora (P_1) y el micrófono 2 (Mic. 2) se coloca al final del tubo de impedancia, cerca de la terminación rígida (P_2).

En la Figura 3.4 se muestra un esquema del dispositivo experimental, donde se puede apreciar la ubicación de ambos micrófonos y la posición de la muestra.

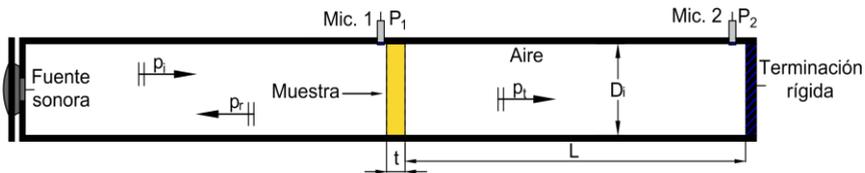


Figura 3.4. Esquema del tubo de impedancia utilizado para medir la resistencia al flujo a partir del método de Ingard & Dear. L es la distancia entre la cara posterior de la muestra y el extremo rígido.

Como se ha descrito en la Sección 3.1.1, para la aplicación del método de Ingard & Dear [Ingard & Dear, 1985], la primera limitación a tener en cuenta es que la longitud de onda ha de ser mayor a 1.7 veces el diámetro del tubo de impedancia utilizado ($\lambda \gg 1.7D_i$). Por tanto, a partir de la definición de la longitud de onda, la frecuencia de trabajo más alta del tubo de impedancia (f_u) ha de ser menor a 5000 Hz y ésta se calcula como:

$$f_u \ll \frac{c_0}{1.7 \cdot D_i} = 5000 \text{ Hz} \quad , \quad (3.13)$$

siendo D_i el diámetro interior del tubo de impedancia ($D_i = 4 \text{ cm}$) y c_0 la velocidad del sonido en el aire ($c_0 = 340 \text{ m/s}$).

La expresión que relaciona la velocidad de la partícula entre la cara incidente de la muestra, u_1 , y la presión registrada en la terminación rígida del tubo de impedancia, P_2 , se define como:

$$u_1 = -i \frac{P_2}{\rho_0 c_0} \sin(kL) \quad , \quad (3.14)$$

donde ρ_0 es la densidad del aire.

La expresión que relaciona las presiones registradas por ambos micrófonos viene definida por:

$$P_1 = P_2 \cos(kL) \quad , \quad (3.15)$$

donde k es el número de onda y L es la distancia entre la cara posterior de la muestra y la terminación rígida.

A partir de estas expresiones, la impedancia al flujo, Z , se expresa como:

$$Z = i\rho_0 c_0 \frac{P_1}{P_2} \frac{1}{\sin(kL)} - i\rho_0 c_0 \cot(kL) \quad . \quad (3.16)$$

Dado que la función de transferencia se define como $H_{12} = P_2/P_1$, la impedancia al flujo de la ecuación (3.16) se puede reescribir, como

$$Z = i\rho_0 c_0 \frac{1}{H_{12} \sin(kL)} - i\rho_0 c_0 \cot(kL) . \quad (3.17)$$

Según el método de Ingard & Dear [Ingard & Dear, 1985], la impedancia al flujo normalizada para las frecuencias que satisfacen la siguiente condición: $L + t = (2n - 1) \lambda/4$, donde n es un número entero, viene dada por

$$\frac{Z}{\rho_0 c_0} = \theta + i\chi = i \frac{1}{H_{12}} (-1)^{n-1}. \quad (3.18)$$

A partir de la ecuación (3.18), es posible obtener la parte real (θ) y la parte imaginaria (χ) de la impedancia característica Z , como

$$\theta = \left| \text{Im} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right|, \quad (3.19)$$

$$\chi = \text{Re} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) (-1)^{n-1}, \quad (3.20)$$

donde θ es la resistencia al flujo y χ es la reactancia al flujo.

En aquellas frecuencias que cumplen la relación $L + t = (2n - 1) \lambda/4$, la reactancia al flujo es mucho más pequeña que la resistencia al flujo, por tanto, ésta puede ser despreciada y se puede realizar la siguiente simplificación:

$$\theta \approx \left| \frac{1}{H_{12}} \right|. \quad (3.21)$$

Por tanto, los valores promedio de la resistividad al flujo de aire se obtienen a partir del valor absoluto de la parte imaginaria de la función de transferencia, de forma que

$$\sigma \approx \left(\frac{\rho_0 c_0}{t} \right) \left| \operatorname{Im} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right|, \quad (3.22)$$

donde t es el espesor de la muestra.

3.2 Cámara reverberante de tamaño reducido

A partir del dispositivo experimental basado en el tubo de impedancia acústica explicado en la Sección 3.1, se puede conocer el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal. Para la estimación de la absorción acústica en incidencia aleatoria, existen otros métodos. En particular, en esta tesis doctoral se han llevado a cabo medidas experimentales con el método de la cámara reverberante de tamaño reducido, en condiciones de campo sonoro difuso. La cámara reverberante usada fue diseñada por la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG) de la Universitat Politècnica de València (UPV) y cuenta con un volumen de 1.12 m^3 y una superficie de 6.74 m^2 [Del Rey et al., 2017]. Para el diseño de esta cámara se han seguido todas las especificaciones de la ISO 354:2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante [ISO 354, 2004]. En la EPSG se dispone de una cámara reverberante estandarizada con forma de poliedro irregular de seis caras [Ramis et al., 2005], con una superficie de $236 \pm 2 \text{ m}^2$ y un volumen de $238 \pm 2 \text{ m}^3$.

La cámara reverberante de tamaño reducido presenta unas paredes asimétricas y en el interior se encuentran pequeños difusores de madera necesarios para mejorar su difusividad [Del Rey et al., 2017]. Se considera que un campo sonoro es difuso cuando en cualquier posición de la cámara reverberante, la densidad de energía es uniforme y todas las direcciones de propagación dentro del recinto son igualmente probables. Por tanto, para un campo perfectamente difuso, los siguientes supuestos deben cumplirse:

- 1) Distribución uniforme de la densidad de energía dentro de la sala.
- 2) La energía incide sobre una superficie de manera uniforme desde todas las direcciones.

Comparada con la cámara reverberante estandarizada, esta cámara de pequeño tamaño es capaz de obtener el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria a partir de pequeñas muestras, con una superficie $\cong 0.2 \text{ m}^2$, permitiendo así realizar ensayos de bajo coste, alternativos a los ensayos en cámara reverberante estandarizada, donde se necesitan 10–12 m^2 de muestra.

El rango de frecuencias de trabajo en intervalos de 1/3 de octava es de 400 Hz a 6300 Hz, con el fin de asegurar las especificaciones de campo sonoro difuso descritas en la norma ISO 354:2003 [ISO 354, 2003].

El procedimiento de ensayo utilizado es el que se describe en la ISO 354:2003 [ISO 354, 2003]. Se han utilizado dos posiciones de fuente sonora en todos los ensayos y, por cada posición de fuente, se han obtenido seis curvas de caída de nivel, que fueron medidas en posiciones distintas. Las distancias mínimas requeridas entre posiciones de fuente, micrófono y cualquier otra superficie reflectante se han redimensionado usando el factor 1:6 con respecto a la cámara reverberante normalizada. Se ha empleado esta relación de escalado como compromiso entre el tamaño de la cámara y el margen de frecuencias que se pretende evaluar. Factores de redimensionado más bajos (1:3 o 1:4) darían lugar a prototipos que no pueden considerarse de pequeñas dimensiones⁶ [Bertó, 2015]. En la Figura 3.5a se muestra la posición de un material textil dentro de la cámara reverberante y en

⁶ Una cámara reverberante de pequeñas dimensiones es un pequeño laboratorio utilizado para ensayar, de forma fiable, el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria de diferentes materiales. Los resultados que se obtienen son comparables a los que se obtendrían en una cámara reverberante normalizada, pero de una manera más económica, eficaz y rápida.

la Figura 3.5b se muestra, desde el exterior, la cámara reverberante de tamaño reducido.

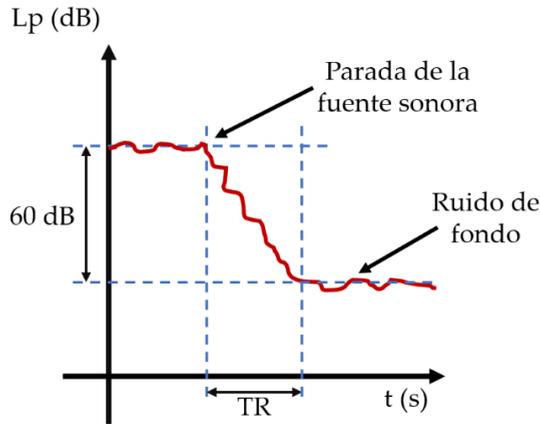


Figura 3.5. Detalle de la cámara reverberante de tamaño reducido. a) Interior de la cámara reverberante durante el ensayo de un material textil seleccionado. La fuente sonora se sitúa en las esquinas de la cámara reverberante a fin de excitar los modos de la sala; b) Exterior de la cámara reverberante.

Para las medidas experimentales, se ha utilizado como fuente sonora una caja acústica de marca Genelec y modelo 8030A, que tiene una respuesta en frecuencia en campo libre de 58 Hz a 20000 Hz (± 2.0 dB) a 1 m. Es una caja acústica de dos vías, con un altavoz de graves (58 Hz a 3000 Hz) y un altavoz de agudos (3000 Hz a 20000 Hz). Ambas vías son utilizadas para los ensayos, porque son necesarias para reproducir el rango de frecuencias de interés (400 Hz a 6300 Hz).

3.2.1 Tiempo de reverberación y absorción acústica

El tiempo de reverberación (TR) es el parámetro más importante para describir la calidad acústica de un espacio o una sala y con él se pueden cuantificar las propiedades acústicas de los materiales acústicos en condiciones de campo difuso. El TR es el tiempo que tarda en producirse una caída en la sala de 60 dB del nivel de presión sonora respecto del estacionario una vez la fuente cesa la excitación. La caída del estacionario se mide normalmente a partir de una bajada de 10, 20 o 30 dB y luego se extrapola el intervalo de tiempo correspondiente al intervalo de 60 dB (véase la Figura 3.6).



Fuente: www.estudio15.es

Figura 3.6. Curva de caída del nivel sonoro y tiempo de reverberación.

Una vez definidas las posiciones de fuente y micrófono, se obtiene el tiempo de reverberación de la cámara vacía y luego se obtiene el TR con la muestra a ensayo en el interior del recinto, bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa. Las mediciones del TR se realizaron a partir del método de ruido interrumpido, donde la fuente emite un ruido continuo, generalmente rosa, y cesa bruscamente la emisión transcurridos unos segundos (a fin de asegurar que se ha llegado al estado estacionario).

Una vez conocido el TR es posible estimar el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria a partir de las fórmulas de Sabine [Sabine, 1922] y Eyring [Eyring, 1930]. En la fórmula de Sabine la energía se disipa de forma continua, mientras que Eyring propuso que la disipación de energía se producía en unidades de $(1 - \bar{\alpha})$ en cada reflexión. La fórmula de Sabine es precisa en salas "vivas", es decir, cuando los materiales de las superficies de la sala presentan poca absorción, en cambio, a medida que aumenta la absorción, la fórmula de Eyring proporciona mejores resultados del tiempo de reverberación.

En el método de Sabine [Sabine, 1922], el tiempo de reverberación puede calcularse como

$$TR_{\text{Sabine}} = 0.162 \frac{V}{A} , \quad (3.23)$$

donde V es el volumen de la cámara reverberante de tamaño reducido (m^3) y A es el área de absorción sonora equivalente (m^2).

A partir del área de absorción sonora equivalente (A) de la cámara tanto vacía como con la muestra a evaluar, se obtiene el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria, α_s , como

$$\alpha_s = \left[0.162V \cdot \left(\frac{1}{TR_2} - \frac{1}{TR_1} \right) \right] \cdot \frac{1}{S} , \quad (3.24)$$

donde TR es el tiempo de reverberación (s). Los subíndices 1 y 2 hacen referencia al promedio de los tiempos de reverberación de la cámara reverberante en cada banda de frecuencia sin y con la muestra sujeta a ensayo, respectivamente.

En el método de Eyring [Eyring, 1930], el tiempo de reverberación puede calcularse como

$$TR_{\text{Eyring}} = \frac{0.162V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} , \quad (3.25)$$

para

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i , \quad (3.26)$$

donde S es la superficie cubierta por la muestra a ensayo (m^2), S_i la superficie i -ésima (m^2) y α_i es el coeficiente de absorción acústica asociado a la superficie S_i .

Referencias

[ISO 10534-2, 1998] ISO 10534–2. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method. Acoustique Comité Européen de Normalisation, Brussels, 1998.

[Ingard & Dear, 1985] Ingard KU, Dear TA. Measurement of Acoustic Flow Resistance. *J Sound Vib*, 1985;103:567–572. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(85\)80024-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(85)80024-9).

[ISO 9053, 1991] ISO 9053. Acoustics – Materials for acoustical applications – Determination of airflow resistance. Geneva: International Standardization Organization, 1991.

[Del Rey et al., 2013] Del Rey R, Alba J, Arenas JP, Ramis J. Technical notes: evaluation of two alternative procedures for measuring airflow resistance of sound absorbing materials. *Arch Acoust*, 2013;38(4), 547–554. <https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0064>.

[Alba et al., 2019] Alba J, Arenas JP, del Rey R, Rodríguez JC. An electroacoustic method for measuring airflow resistivity of porous sound-absorbing materials. *Appl Acoust*, 2019;150, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.009>.

[ISO 9053–1, 2018] ISO 9053–1. Acoustics – Determination of airflow resistance. Part 1: Static airflow method. Geneva: International Standardization Organization, 2018.

[Ramis et al., 2005] Ramis J, Alba J, Martínez J, Redondo J. The uncertainty in absorption coefficients measured in reverberant chambers: A case study. *Noise Vib Worldw*, 2005;36(1):7–12. <https://doi.org/10.1260/0957456053499185>.

[Del Rey et al., 2017] Del Rey R, Alba J, Bertó L, Gregori A. Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Mater Constr*, 2017;67(328):e139. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07316>.

[ISO 354, 2004] ISO 354. Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. TC: ISO/TC 43/SC 2, *Building acoustics*, ICS: 91.120.20, 2003.

[Bertó, 2015] Bertó L. (2015). Nuevos materiales, modelos y técnicas de caracterización acústica de la edificación y acústica medioambiental. (Doctorado). Universitat Politècnica de València.

[Sabine, 1922] Sabine WC. *Collected papers on acoustics*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1922.

[Eyring, 1930] Eyring CF. Reverberation time in “dead” rooms. *J Acoust Soc Am*, 1930;1:217–239. <https://doi.org/10.1121/1.1915175>.

Capítulo 4

Estructura de la fibra textil

Registro bibliográfico

- **Autores (p. o. de firma).** R. Atiénzar–Navarro, M. Bonet–Aracil, J. Gisbert–Payá, R. del Rey and R. Picó.
- **Título.** Influence of fineness, length and hollow section of fibres on the acoustic absorption.
- **Revista.** *Textile Research Journal*. Pendiente de aceptación.
- **Fecha.** 2021.

En este capítulo se analiza la influencia de la estructura macroscópica de las fibras en el coeficiente de absorción acústica. El contexto general de esta investigación se enmarca en la búsqueda de nuevas soluciones basadas en textiles que puedan proporcionar absorción acústica, por tanto, entender la influencia de los parámetros propios de las fibras en la absorción es un factor fundamental desde el punto de vista acústico. Los contenidos de este capítulo están organizados en cuatro secciones. La Sección 4.1 abarca los antecedentes y estado actual de las fibras textiles. Las distintas fibras sintéticas utilizadas se detallan en la Sección 4.2. En la Sección 4.3 se presentan los resultados, donde se muestra la relación existente entre la longitud, la finura y la sección transversal sólida/hueca sobre la absorción acústica. Finalmente, la Sección 4.4 recoge las conclusiones más relevantes de este estudio. Para mayor detalle se remite al lector al Anexo A.1.

4.1 Introducción

Las fibras son materias primas que se utilizan en la fabricación de productos textiles. Se pueden clasificar según diferentes criterios, como su origen (natural o químico) o sus propiedades (convencional o técnico).

Existen muchas definiciones para las fibras textiles, pero la más comúnmente aceptada es la que ofrece el Instituto Textil [Hearle & Morton, 2008], donde dichas fibras son unidades de materia caracterizadas por su flexibilidad, su finura y su alta relación longitud/diámetro, y se utilizan de forma general para fines textiles. Las propiedades de la fibra se pueden analizar de acuerdo con su macroestructura o microestructura. La macroestructura está directamente ligada a parámetros geométricos de la fibra, mientras que la microestructura está relacionada con la estructura interna de la fibra y estudia cómo se unen los átomos y cómo las macromoléculas están estructuradas en una región cristalina o amorfa.

Hay algunos parámetros que están directamente relacionados con la macroestructura de la fibra como la finura, la longitud, el grosor o la sección transversal. Las características dimensionales más importantes para caracterizar las fibras son la longitud y la finura. Por un lado, la longitud depende de la naturaleza de la fibra. Por ejemplo, la longitud de la fibra de algodón es más corta que la longitud de la fibra de lana, mientras que la longitud de la fibra de seda es la más larga de todas las fibras naturales porque es un filamento¹. En cambio, las fibras sintéticas pueden ser tan largas como se desee porque generalmente se producen como un filamento (longitud infinita) y se cortan, posteriormente, a la longitud deseada. Por otro lado, la finura no es sencilla de medir ya que la sección transversal de las fibras puede variar y mostrar diferentes formas, además de la circular (véase la Figura 4.1). Desde 1960, el Sistema Internacional (SI) adoptó la masa

¹ El término filamento se utiliza para identificar fibras de longitud indeterminada.

lineal, tex (g/km), como unidad válida para medir la finura de las fibras, pero también se utiliza comúnmente la décima parte del tex, denominada dtex.

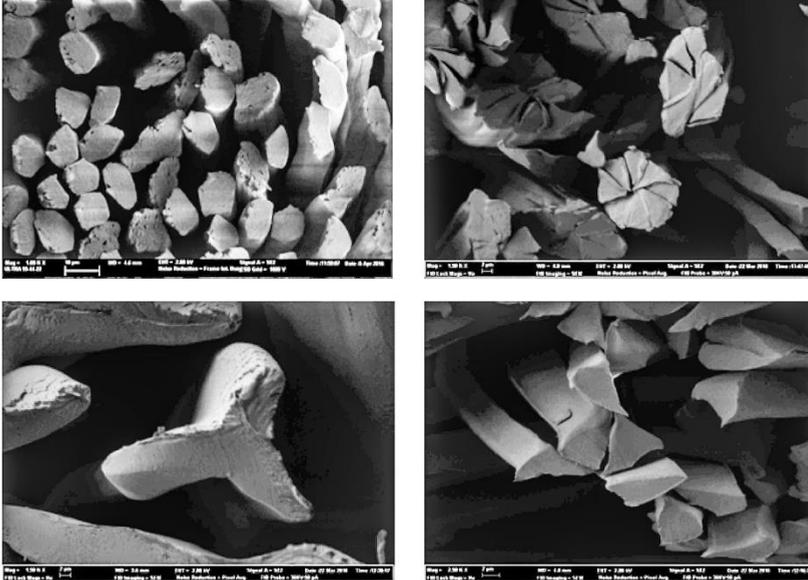


Figura 4.1. Imágenes de microscopía electrónica de la sección transversal de diferentes fibras.

Los parámetros de longitud y finura de las fibras han sido ampliamente estudiados en las últimas décadas [Wang et al., 2004; Yan & Yu, 2007]. Algunos autores se han centrado en la mejora de la finura de las fibras de plátano a fin de ser utilizadas en textiles [Balakrishnan et al., 2019], otros estudiaron la finura de la estructura externa e interna de fibras de bambú [Hu et al., 2019]. La finura de diferentes tipos de fibra de algodón en función del tipo de área de cultivo fue investigada por Palamutcu et al. en [Palamutcu et al., 2019]. En [Sitotaw et al., 2019] se investigaron las propiedades físicas de la fibra de lana de oveja, como su resistencia, finura o longitud, en función del tipo de oveja.

Los tejidos textiles se pueden utilizar en muchos ámbitos y para diferentes propósitos, como en la confección de telas, ropa o cuerdas. Actualmente, en espacios arquitectónicos se tiende a usar telas como estructuras tensas [Morales–Guzmán, 2019], para el aislamiento térmico [Eyupoglu et al., 2019] o acústico [Broda & Baczek, 2019]. Recientemente, se han considerado textiles sostenibles con fines acústicos [Rubino et al., 2019].

Debido al gran interés en los tejidos textiles, el estudio de las fibras es un parámetro clave para entender el comportamiento acústico de los tejidos. La absorción acústica de los tejidos puede variar dependiendo del método de fabricación, la falta de homogeneidad de la estructura, la resistencia al flujo de aire, la naturaleza de los poros, la densidad y el tamaño de la fibra [Thilagavathi et al., 2019; Padhye et al., 2016]. Aso & Kinoshita analizaron en [Aso & Kinoshita, 1963] la relación entre el mecanismo de absorción y las propiedades físicas de varios tejidos de algodón, con diferentes densidades de hilo. Los mismos autores estudiaron en [Aso & Kinoshita, 1963] varios parámetros de la fibra, como la longitud, la finura, el grosor, la orientación, la porosidad o la elasticidad, con la finalidad de determinar su influencia sobre la absorción acústica.

El tipo de fibras de un tejido textil influye de forma significativa en el comportamiento acústico del tejido. Shoshani & Rosenhouse demostraron en [Shoshani & Rosenhouse, 1990] que algunos parámetros que caracterizan al tejido, como el contenido de la fibra o el factor de cobertura tienen un pequeño efecto sobre el coeficiente de absorción acústica a bajas frecuencias, pero un impacto significativo a altas frecuencias. Na et al. investigaron en [Na et al., 2007] como afectaba la estructura y la forma geométrica de los textiles de microfibra en la absorción acústica, en comparación con tejidos de fibra convencionales. Los resultados mostraron que las microfibras tenían un mejor comportamiento acústico que las telas de fibra tradicionales debido a su mayor área superficial. Recientemente, Küçük & Korkmaz [Küçük & Korkmaz, 2012] estudiaron los efectos

de algunos parámetros intrínsecos, como el contenido de la fibra, sobre la absorción acústica y demostraron que a mayor cantidad de fibra por unidad de área se producía una mejora en la absorción acústica en medias y altas frecuencias.

El objetivo de este trabajo consiste en investigar la influencia de los parámetros geométricos de la fibra sobre el coeficiente de absorción acústica. Los parámetros a analizar son la finura, la longitud y el tipo de sección transversal, sólida o hueca, que están directamente relacionados con la macroestructura de la fibra. A partir del análisis de los parámetros de la fibra se determina la cantidad de fibra necesaria para obtener un valor de absorción acústica específico.

4.2 Fibras textiles

La fibra es un sólido caracterizado por su finura, su flexibilidad y su elevada relación longitud/finura y, ésta es utilizada como materia prima para elaborar los textiles. Un total de seis fibras, tres de acrílica y tres de poliéster, fueron proporcionadas por el Dpto. de Ingeniería Textil y Papelera (DITEXPA-UPV) de la Universitat Politècnica de València con la finalidad de observar las diferencias en la estructura de la fibra. Todas las fibras analizadas contenían principalmente, poliacrilonitrilo² del mismo proveedor. La Tabla 4.1 muestra la información técnica y la referencia de cada una de las fibras utilizadas.

² El poliacrilonitrilo (PAN) es un polímero que se utiliza para la fabricación de fibras sintéticas.

Referencia	Descripción	Longitud (mm)	Finura (dtex)	Composición
A1	Neochrome BR	63	3.3	Acrílica
A2	Neochrome MT	63	5.4	Acrílica
A3	Negro BR	37	5.4	Acrílica
P1	HCS	32	7.8	Poliéster
P2	HCSH	32	7.8	Poliéster
P3	NHCS	32	7.8	Poliéster

Tabla 4.1. Referencia, descripción, características físicas y composición de las fibras textiles utilizadas en el estudio.

La principal diferencia entre las muestras de poliéster (P1, P2 y P3) se encuentra en su estructura. El poliéster P1 presenta diez huecos y el poliéster P2 contiene un único hueco central. Sin embargo, la fibra P3 tiene la misma composición que las fibras P1 y P2, pero sin huecos. Varios investigadores se han centrado en analizar la influencia de las fibras huecas de poliéster en las propiedades mecánicas [Yang et al., 2009; Khoddami & Gong, 2009]. En Campeau et al. [Campeau et al., 2019] se investiga la influencia de fibras naturales huecas en comparación con fibras sólidas sobre la absorción acústica en incidencia normal.

En este trabajo se ha investigado la influencia de los huecos en el comportamiento acústico de las fibras. En la Figura 4.2 se muestra un esquema de la sección transversal de las tres muestras de poliéster consideradas en la Tabla 4.1.

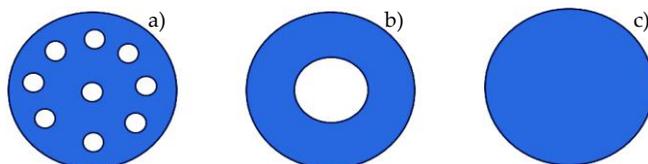


Figura 4.2. Esquema de la sección transversal de las fibras de poliéster. a) P1; b) P2; c) P3.

En la Figura 4.3 se presentan tres imágenes de microscopía con una resolución de hasta 50 μm de las tres fibras de poliéster. Se puede observar la presencia de diez huecos para P1, un único hueco para P2 y ningún hueco para P3, tal y como se ha representado en la Figura 4.2. En la Figura 4.4, se muestran diferentes fibras acrílicas y de poliéster, que han sido analizadas en este estudio.

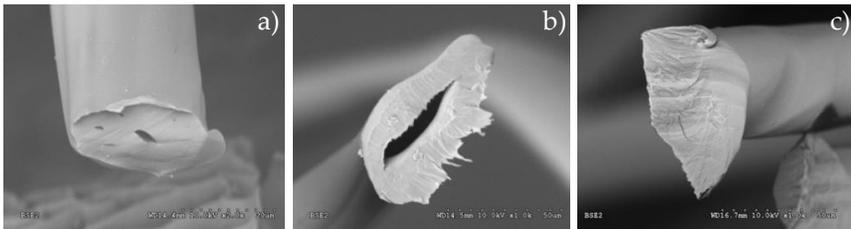


Figura 4.3. Imágenes de microscopía de las muestras de poliéster. a) P1; b) P2; c) P3.

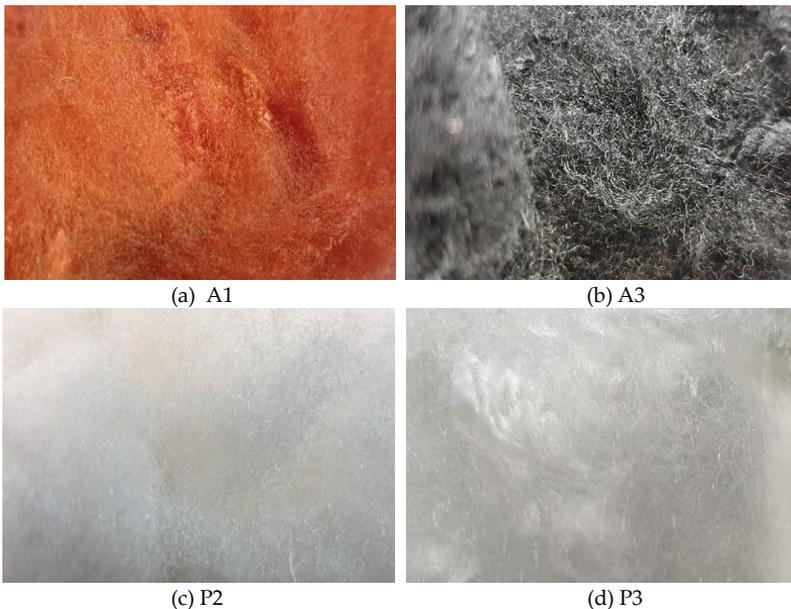


Figura 4.4. Fotografía de algunas de las fibras textiles analizadas. (a) Acrílica A1; (b) Acrílica A3; (c) Poliéster P2; (d) Poliéster P3.

4.3 Resultados y discusión

En este estudio se han preparado diferentes muestras a partir de las fibras mostradas en la Tabla 4.1. Concretamente, se han elaborado nueve muestras de fibras acrílicas con un espesor de 3.8 cm a 6.5 cm, cuya referencia se puede observar en la Tabla 4.2, y nueve muestras de fibra de poliéster con un espesor de 4 cm a 7 cm, como se observa en la Tabla 4.3. Estos espesores seleccionados son típicos de materiales porosos y fibrosos, que son utilizados como materiales absorbentes acústicos o parte de soluciones acústicas. Además, cada fibra ha sido analizada con tres masas distintas de 1.3 g, 3.2 g y 6.4 g a fin de comparar distintas fibras con la misma densidad. En la Figura 4.5 se muestra, con detalle, la parte final del tubo de impedancia con los dos micrófonos y la muestra de fibra colocada en el extremo del tubo.

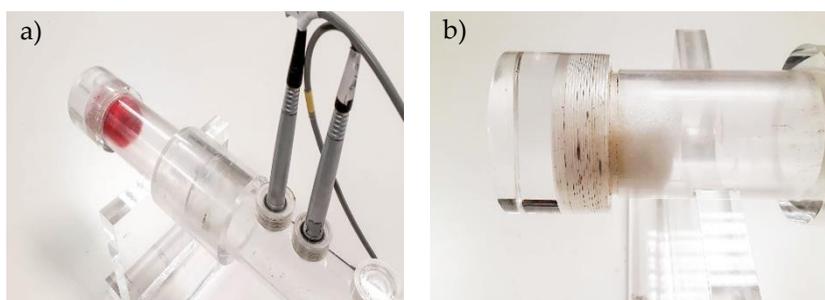


Figura 4.5. Detalle del extremo final del tubo de impedancia para calcular el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, incluyendo una muestra de a) fibra A1 y b) fibra P1.

En las Tablas 4.2 y 4.3 se presentan las propiedades físicas de las muestras de fibra acrílica y de poliéster, respectivamente. Por cada estudio de las propiedades acústicas de las fibras se utilizan tres muestras, con geometría idéntica, y bajo las mismas condiciones de montaje, a fin de reducir el error de dispersión producido por la falta de homogeneidad del material textil. Los valores de espesor y densidad corresponden con los valores promedio.

Tipo	Espesor (cm)	Densidad (kg/m ²)
A1 _{1.3g}	3.80±0.20	0.94±0.10
A1 _{3.2g}	4.30±0.25	2.31±0.24
A1 _{6.4g}	6.50±0.80	4.62±0.31
A2 _{1.3g}	4.00±0.15	0.94±0.10
A2 _{3.2g}	4.50±0.20	2.31±0.25
A2 _{6.4g}	5.50±0.50	4.62±0.49
A3 _{1.3g}	3.80±0.30	0.94±0.11
A3 _{3.2g}	4.30±0.20	2.31±0.28
A3 _{6.4g}	6.50±0.50	4.62±0.39

Tabla 4.2. Especificaciones de las fibras acrílicas.

Tipo	Espesor (cm)	Densidad (kg/m ²)
P1 _{1.3g}	4.00±0.15	0.94±0.01
P1 _{3.2g}	5.00±0.20	2.31±0.04
P1 _{6.4g}	7.00±0.50	4.62±0.15
P2 _{1.3g}	4.00±0.20	0.94±0.05
P2 _{3.2g}	5.00±0.30	2.31±0.32
P2 _{6.4g}	6.50±0.50	4.62±0.22
P3 _{1.3g}	4.00±0.30	0.94±0.09
P3 _{3.2g}	4.00±0.40	2.31±0.03
P3 _{6.4g}	5.00±0.45	4.62±0.12

Tabla 4.3. Especificaciones de las fibras de poliéster.

Además, para el estudio de la finura, la longitud y la sección transversal de la fibra se presentan los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles, de acuerdo con el Documento Básico de Protección contra el Ruido (DB-HR), que forma parte del Código Técnico de la Edificación (CTE) [Real Decreto 1371/2007].

4.3.1 Finura de la fibra

En esta sección, se analizaron las fibras acrílicas (A1 y A2) de la Tabla 4.2, que poseen la misma longitud (63 mm) y composición, pero diferente finura de fibra. En la Figura 4.6 se comparan los valores de coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de la fibra A1 (finura: 3.3 dtex) y la fibra A2 (finura: 5.4 dtex).

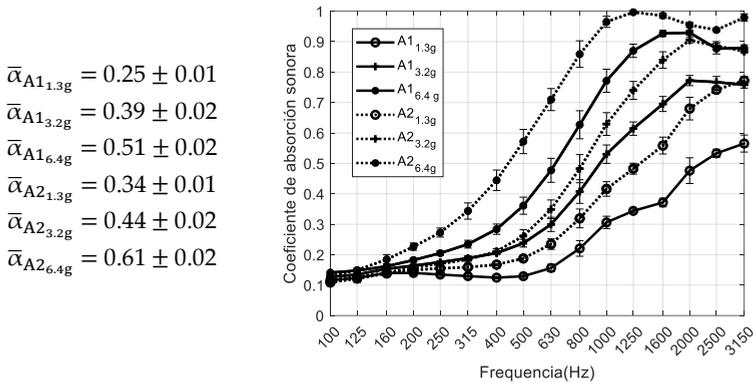


Figura 4.6. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras acrílicas, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la finura de la fibra. En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles A1 y A2.

Los resultados mostrados en la Figura 4.6 evidencian una clara influencia de la finura de las fibras en la absorción acústica. Las muestras A1 (3.3 dtex) presentan unos valores de coeficiente de absorción acústica en incidencia normal más bajos que las muestras A2 (5.4 dtex), en todo el margen frecuencial. Este efecto puede observarse sin tener en cuenta los diferentes gramajes utilizados (1.3 g; 3.2 g; 6.4 g), y aparece cuando las fibras tienen la misma longitud, pero diferente finura. El aumento de la finura de la fibra conduce a un aumento del valor del coeficiente de absorción acústica. Además, puede verse en la Figura 4.6, que el máximo de absorción sonora aumenta gradualmente y se desplaza hacia bajas frecuencias cuando el contenido de fibra aumenta.

4.3.2 Longitud de la fibra

En esta sección, se estudiaron las fibras acrílicas (A2 y A3) de la Tabla 4.2, que presentan la misma composición y finura (5.4 dtex), pero diferente longitud de fibra. En la Figura 4.7 se comparan los valores de coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de la fibra A2 (longitud: 63 mm) y la fibra A3 (longitud: 37 mm).

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{A2_{1.3g}} &= 0.34 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{A2_{3.2g}} &= 0.44 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{A2_{6.4g}} &= 0.61 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{A3_{1.3g}} &= 0.32 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{A3_{3.2g}} &= 0.49 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{A3_{6.4g}} &= 0.55 \pm 0.02 \end{aligned}$$

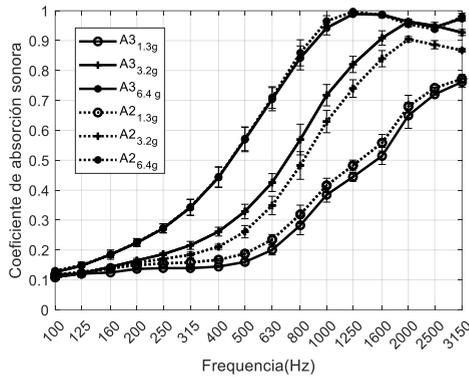


Figura 4.7. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras acrílicas, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la longitud de la fibra. En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles A2 y A3.

Como se puede observar en la Figura 4.7, no se aprecia tanta influencia de la longitud de la fibra sobre la absorción acústica en comparación con la finura de la fibra. Sí que se pueden apreciar pequeñas diferencias cuando se usa poca cantidad de fibra (1.3 g y 3.2 g), pero estas diferencias son inferiores al 10% y siempre dentro del margen del error del procedimiento experimental. Por tanto, con las muestras analizadas, no se pueden sacar conclusiones claras con respecto a la influencia de la longitud de la fibra sobre la absorción acústica.

4.3.3 Sección transversal de la fibra

En esta sección, se utilizaron dos fibras huecas que presentan una distribución de huecos distinta, tal y como se mostró en el esquema de la Figura 4.2. En la Figura 4.8 se comparan los valores de coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de la fibra P1 (10 huecos) y la fibra P2 (1 hueco), cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla 4.3.

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{P1_{1.3g}} &= 0.36 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P1_{3.2g}} &= 0.55 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P1_{6.4g}} &= 0.68 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P2_{1.3g}} &= 0.36 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P2_{3.2g}} &= 0.55 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P2_{6.4g}} &= 0.67 \pm 0.02 \end{aligned}$$

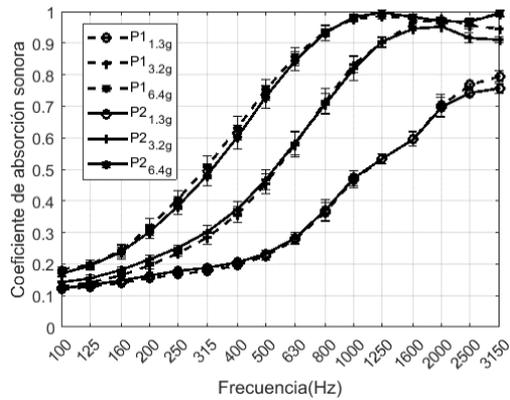
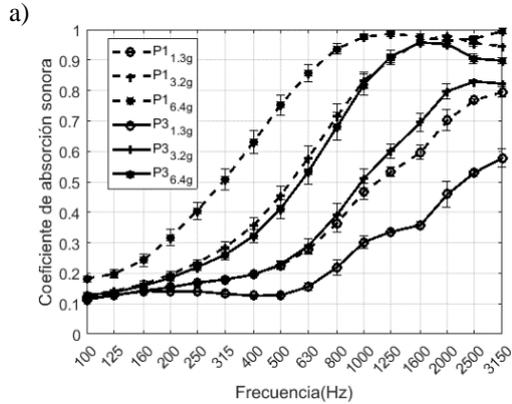


Figura 4.8. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras de poliéster, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la sección transversal de la fibra. En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles P1 y P2.

Aparentemente, no hay diferencias en los valores del coeficiente de absorción acústica promedio en incidencia normal, entre las dos fibras huecas analizadas. Esto puede deberse a que el área de los orificios de la sección transversal de las fibras huecas es similar. Por tanto, se decidió comparar los valores de absorción acústica en incidencia normal de las fibras de poliéster huecas (P1/10 huecos y P2/1 hueco) con respecto a los valores obtenidos para la fibra de poliéster sólida (P3/sin huecos). Esta comparación se puede observar en la Figura 4.9a,b.

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_{P1_{1.3g}} &= 0.36 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P1_{3.2g}} &= 0.55 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P1_{6.4g}} &= 0.68 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P3_{1.3g}} &= 0.25 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P3_{3.2g}} &= 0.39 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P3_{6.4g}} &= 0.53 \pm 0.02\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_{P2_{1.3g}} &= 0.36 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P2_{3.2g}} &= 0.55 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P2_{6.4g}} &= 0.67 \pm 0.02 \\ \bar{\alpha}_{P3_{1.3g}} &= 0.25 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P3_{3.2g}} &= 0.39 \pm 0.01 \\ \bar{\alpha}_{P3_{6.4g}} &= 0.53 \pm 0.02\end{aligned}$$

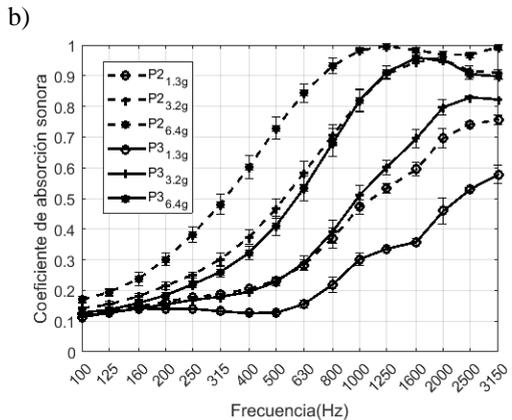


Figura 4.9. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de dos muestras de poliéster, con diferentes gramajes, a fin de analizar la influencia de la sección transversal de la fibra. En a) se compara la fibra P1 (10 huecos) con la fibra P3 (sin huecos) y en b) se compara la fibra P2 (1 hueco) con la fibra P3 (sin huecos). En la parte de la izquierda se muestran los coeficientes de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, para las fibras textiles P1, P2 y P3.

En la Figura 4.9 se puede observar que los gramajes 1.3 g o 3.2 g de las fibras huecas tienen un efecto similar en la absorción acústica que para los gramajes 3.2 g y 6.4 g de la fibra sólida, respectivamente. Por tanto, esto significa que se puede obtener el mismo efecto utilizando

la mitad de peso de la fibra hueca, en comparación con el poliéster sólido. En este caso, lo que es realmente significativo en la absorción acústica es la presencia de orificios en el interior de las fibras. En cambio, en [Campeau et al., 2019] se obtuvieron resultados similares para fibras huecas y sólidas, cosa que puede deberse al tipo de fibra utilizado y/o a la manera de organizar las muestras en el tubo de impedancia.

4.4 Conclusiones

Se ha analizado la influencia de la finura, longitud y sección transversal sólida/hueca de las fibras sobre la absorción acústica, a partir del coeficiente de absorción acústica promedio, $\bar{\alpha}$, en incidencia normal.

La finura de las fibras influye de manera significativa en el comportamiento acústico de las muestras. El efecto de la finura se puede observar para fibras con la misma longitud y composición, donde el uso de diferentes gramajes no es influyente. Se ha podido demostrar que, para las fibras evaluadas, a mayor finura de la fibra, se obtienen mejores propiedades acústicas en todo el margen de frecuencias de trabajo.

La longitud de las fibras no presenta cambios en la absorción acústica. Los resultados fueron analizados con muestras con la misma composición y finura de fibra, pero no se observa una influencia significativa de la longitud en la absorción acústica. Esto puede ser debido a que el efecto acústico provocado por la longitud de las fibras satura para una determinada longitud, por tanto, en este caso para observar algún efecto en la absorción acústica se tendría que haber empleado un mayor espectro de dimensiones en longitud, considerando longitudes de fibra menores. En la sección transversal hueca de la fibra no se aprecian diferencias significativas entre fibras que presentan diez huecos y fibras que solo presentan un único hueco

central en su estructura interna. Esto puede deberse a que el área de los orificios de la sección transversal de las fibras es similar. En cambio, si ambas fibras huecas son comparadas con fibras sólidas, es decir, sin huecos, sí que se pueden observar diferencias en la absorción acústica. Los resultados obtenidos difieren con los presentados en [Campeau et al., 2019]. Esto podría ser debido a que se han utilizado fibras de distinto origen y, en nuestro caso, las fibras fueron organizadas de forma cilíndrica en el porta-muestras del tubo de impedancia, en cambio, en [Campeau et al., 2019] las fibras de los materiales no tejidos se organizaron al azar en planos paralelos. Las fibras huecas tienen mayor absorción acústica que las fibras sólidas en todo el margen frecuencial y para todos los contenidos de fibra 1.3 g, 3.2 g y 6.4 g. Por tanto, se demuestra que, con menos cantidad de fibras huecas, el material presenta un comportamiento acústico similar al de las fibras sólidas.

Como resumen, se puede concluir que los parámetros de la fibra son realmente importantes desde el punto de vista acústico, porque se puede obtener un valor determinado de absorción acústica. Por tanto, éste es un aspecto significativo para soluciones basadas en textiles.

Referencias

[Hearle & Morton, 2008] Hearle JW, Morton WE. Physical properties of textile fibres. Elsevier; 2008.

[Wang & Wang, 2004] Wang HM, Wang X. Evaluation of the fineness of degummed bast fibers. *Fiber Polym*, 2004; 5(3):171–176. <https://doi.org/10.1007/BF02902995>.

[Yan & Yu, 2007] Yan G, Yu C. A joint influence of the distributions of fiber length and fineness on the strength efficiency of the fibers in yarn. *Fibers Polym*, 2007;8:309–312. <https://doi.org/10.1007/BF02877275>.

[Balakrishnan et al., 2019] Balakrishnan S, Wickramasinghe GLD, Wijayapala US. Investigation on improving banana fiber fineness for textile application. *Text Res J*, 2019; 89(21–22):4398–4409. <https://doi.org/10.1177/0040517519835758>.

[Hu et al., 2019] Hu M, Wang C, Lu C, Anuar NIS, Yousfani SHS, Jing M, Chen Z, Zakaria S, Zuo H. Investigation on the classified extraction of the bamboo fiber and its properties. *J Nat Fibers*, 2019;1–11. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1599311>.

[Palamutcu et al., 2019] Palamutcu S, Soydan AS, Avinc O, Günaydin GK, Yavas A, Kivılcım MN, Demirtaş M. Physical properties of different turkish organic cotton fiber types depending on the cultivation area. In book: *Organic cotton*, (pp. 25–39). Springer, Singapore;2019.

[Sitotaw et al., 2019] Sitotaw DB, Woldemariam AH, Tesema AF. Characterization of the wool fiber physical properties of Ethiopian indigenous sheep breeds. *J Text Inst*, 2019;1–8. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1689774>.

[Morales–Guzmán, 2019] Morales–Guzmán CC. Design and construction of a folding umbrella for architectural spaces. *Rev Arq*, 2019;21(1):76-89. <http://dx.doi.org/10.14718/revarq.2019.21.1.1623>.

[Eyupoglu et al., 2019] Eyupoglu C, Eyupoglu S, Merdan N. Improvement of thermal insulation properties of polyester nonwoven and estimation of thermal conductivity coefficients using artificial neural network. *J Test Eval*, 2019;47(2):1075–1086. <https://doi.org/10.1520/JTE20180129>.

[Broda & Baczek, 2019] Broda J, Baczek M. Acoustic properties of multi-layer wool nonwoven structures. *J Nat Fibers*, 2019:1–15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1584078>.

[Rubino et al., 2019] Rubino C, Bonet–Aracil M, Gisbert–Payá J, Liuzzi S, Stefanizzi P, Zamorano–Cantó M, Martellotta F. Composite eco-friendly sound absorbing materials made of recycled textile waste and biopolymers. *Materials*, 2019;12(23):4020. <https://doi.org/10.3390/ma12234020>.

[Padhye & Nayak, 2016] Padhye R, Nayak R. *Acoustic Textiles. Textile Science and Clothing Technology*. Melbourne, Victoria, Australia, Springer; 2016.

[Thilagavathi et al., 2019] Thilagavathi G, Muthukumar N, Neela –Krishnanan S, Senthilram T. Development and characterization of pineapple fibre nonwovens for thermal and sound insulation applications. *J Nat Fibers*, 2019; 1–10. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1569575>.

[Aso & Kinoshita, 1963] Aso K, Kinoshita R. Absorption of sound wave by fabrics, Part 1: Absorption mechanism. *Text Mach Soc Jpn*, 1963;8(1):32–39.

[Aso & Kinoshita, 1963] Aso K, Kinoshita R. Sound absorption characteristics of fiber assemblies. *Text Mach Soc Jpn*, 1963;10(5):209–217.

[Shoshani & Rosenhouse, 1990] Shoshani Y, Rosenhouse G. Noise absorption by woven fabrics. *Appl Acoust*, 1990;30(4):321–333. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(90\)90081-5](https://doi.org/10.1016/0003-682X(90)90081-5).

[Na et al., 2007] Na Y, Lancaster J, Casali J, Cho G. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Text Res J*, 2007;77(5):330–335. <https://doi.org/10.1177/0040517507078743>.

[Küçük & Korkmaz, 2012] Küçük M, Korkmaz Y. The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites. *Text Res J*, 2012;82(20):2043–2053. <https://doi.org/10.1177/0040517512441987>.

[Yang et al., 2009] Yang C, Qian C, Zhong W, Wang Y, Wang H. The design and manufacture of profiled multi-channeled hollow polyester fibers. *Fibers Polym*, 2009;10:657–661. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0657-9>.

[Khoddami & Gong, 2009] Khoddami A, Gong RH. Effect of hollow polyester fibres on mechanical properties of knitted wool/polyester fabrics. *Fibers Polym*, 2009;10(4):452–460. <https://doi.org/10.1007/s12221-009-0452-7>.

[Real Decreto 1371/2007] 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.

[Campeau et al., 2019] Campeau S, Panneton R, Elkoun S. Experimental validation of an acoustical micro-macro model for random hollow fibre structures. *Acta Acustica United with Acustica*, 2019;105(1):240–247. <https://doi.org/10.3813/aaa.919305>.

Capítulo 5

Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles

Registro bibliográfico

- **Autores (p. o. de firma).** R. Atiénzar–Navarro, M.Á. Bonet–Aracil, J. Gisbert–Payá, R. del Rey, R. Picó.
- **Título.** Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules.
- **Revista.** *Applied Acoustics*.
- **Volumen.** 164.
- **Páginas, Inicial:** 1; **Final:** 9.
- **Fecha.** 2020.
- **DOI:** 10.1016/j.apacoust.2020.107285.

El trabajo que aquí se presenta parte de dos estudios previos: 1) “Absorción acústica de nuevos tejidos textiles” (ver Anexo [A.5](#)) presentado en el “X Congreso Ibérico de Acústica. 49º Congreso Español de Acústica” (ver Anexo [B](#)), que tuvo lugar en Cádiz (2018); 2) “Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules” (ver Anexo [A.6](#)) presentado en el “48th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering” (ver Anexo [B](#)), que tuvo lugar en Madrid (2019). En ambos trabajos, relacionados con el estudio del efecto acústico de las microcápsulas adheridas a la superficie de los tejidos textiles, se obtuvo el “Premio Andrés Lara para Jóvenes Investigadores Acústicos” (ver Anexo [C](#)).

En este capítulo se analiza el comportamiento acústico de tejidos de calada dopados con microcápsulas. El contexto general de esta investigación se enmarca en la búsqueda de soluciones para aumentar la absorción acústica de materiales textiles. Se consideran diferentes posibilidades de diseño según el tipo de tejido base utilizado, la homogeneidad de los tejidos de base dopada y la concentración de microcápsulas. El objetivo es utilizar nuevos fenómenos físicos en la propagación de las ondas acústicas que puedan favorecer la eficiencia en la absorción de tejidos. Los contenidos de este capítulo están organizados en cuatro secciones. En la Sección 5.1 se presenta una introducción sobre los antecedentes de la microencapsulación en tejidos textiles. En la Sección 5.2 se detallan las características de los tejidos base utilizados y el proceso de adhesión de las microcápsulas en la superficie de las fibras. En la Sección 5.3 se plantean las hipótesis del estudio y se presentan los resultados, además se hace uso del modelo de membrana presentado en la Sección 2.3 del Capítulo 2- Modelos y métodos, a fin de predecir el efecto del dopaje en diferentes tejidos sobre la absorción acústica. Finalmente, como resultado de este trabajo, se incluyen las conclusiones más relevantes del capítulo en la Sección 5.4. Para mayor detalle se remite al lector al Anexo A.2.

5.1 Introducción

Las microcápsulas (MCCs) son partículas micrométricas compuestas por uno o más principios activos [Aggarwal et al., 1998]. Están constituidas por una membrana (capa externa) y un principio activo (núcleo) [Ghosh, 2006]. En la industria textil, las microcápsulas fueron estudiadas por primera vez por Nelson, G. [Nelson, 2001].

La microencapsulación presenta la ventaja de poder alterar las propiedades físicas de sustancias volátiles¹ a fin de hacerlas más manejables y protegerlas de factores externos como la luz solar, la

¹ Una sustancia volátil es una sustancia que tiene tendencia a vaporizarse.

alcalinidad, el rozamiento o una combinación de estos factores [Deasy, 1984]. Debido a ello, el uso de microcápsulas se ha incrementado en los últimos años y se utilizan en diferentes campos, como la cosmética, la farmacia, la agricultura, la fotografía, la biotecnología o la industria textil [Gao et al., 2017]. Concretamente, en el sector textil, se desarrollan microcápsulas de fragancia [Monllor et al., 2009], de resistencia al fuego [Golja et al., 2014] o de agentes bactericidas [Solomon et al., 2012] para su aplicación en textiles [Dubey et al., 2009].

Los métodos industriales más conocidos para adherir microcápsulas a la superficie de la fibra son la impregnación [Bonet–Aracil et al., 2015], el agotamiento convencional (baño) [Bonet–Aracil et al., 2012], la pulverización [Rocha et al., 2012] y el recubrimiento [Meirowitz, 2019]. Generalmente, se hace uso de una resina o ligante a fin de adherir las MCCs al tejido [Monllor et al., 2009]. Este ligante puede ser de varios tipos: acrílico, poliuretano, almidón o silicona.

En las últimas décadas, varios investigadores han estudiado el uso de las micropartículas con fines acústicos [Zhou et al., 2006a; Zhou et al., 2006b; Cheng et al., 2016; Zhi et al., 2016]. Sin embargo, el mecanismo físico involucrado en la absorción acústica relacionado con la adhesión de las MCCs es poco conocido. Una de las posibles razones se debe a la existencia de diferentes factores, de diferente naturaleza, que pueden influir en el coeficiente de absorción acústica, como la técnica de dopado, el tamaño de las MCCs o el tipo de principio activo escogido. Zhou et al. presentaron una espuma de poliuretano (PU) compuesta de micropartículas de polímero con diferentes estructuras, tamaños (0.1 μm a 1 mm) y distribuciones [Zhou et al., 2006]. Demostraron que el tamaño de las micropartículas tenía un efecto sobre la frecuencia de resonancia, donde la absorción es máxima. Los mismos autores estudiaron las características acústicas de microesferas poliméricas huecas con una estructura porosa múltiple. Determinaron que las microesferas tenían influencia

en la absorción acústica a altas frecuencias, y observaron que a medida que aumentaba la concentración de microesferas e incrementaba la porosidad, la absorción acústica aumentaba, en comparación con materiales granulares clásicos [Zhou et al., 2006b]. Posteriormente, Cheng et al. estudiaron en [Cheng et al., 2016] un nuevo material espumado híbrido formado por microesferas de celulosa y polímero. Observaron que este material híbrido era adecuado como absorbente en altas frecuencias. No obstante, es poco abundante la literatura científica consagrada en el estudio del efecto de las MCCs aplicadas a los tejidos como materiales acústicos. De entre todos, cabe destacar el trabajo de Zhi et al. que investigaron en [Zhi et al., 2016] la absorción acústica de una espuma sintética reforzada con tela espaciadora y analizaron el efecto de las microesferas adheridas a la espuma. Demostraron que el uso de microesferas tiene una gran influencia en la propagación de las ondas sonoras. La variación de la primera frecuencia de resonancia y el pico de absorción acústica depende de la cantidad y el tipo de microesferas.

El contexto general de esta investigación se enmarca en la búsqueda de soluciones para controlar la absorción acústica de materiales textiles. Se consideran diferentes posibilidades de diseño según el tipo de tejido base utilizado, la homogeneidad de los tejidos de base dopada y la concentración de microcápsulas. El objetivo de este trabajo consiste en investigar la influencia en las prestaciones acústicas de la adhesión de microcápsulas sobre diferentes tejidos textiles.

5.2 Materiales y métodos

En este apartado se presentan los materiales textiles utilizados como tejidos base y el proceso de preparación de los tejidos dopados.

5.2.1 Tejidos base

En este estudio se han utilizado tejidos textiles con propiedades distintas, con la finalidad de determinar la influencia de las microcápsulas adheridas a la superficie de estos tejidos y estimar sus propiedades como absorbente sonoro. Se han utilizado siete tejidos distintos, como tejidos base. A continuación, se procede a describir de forma detallada cada uno de estos tejidos.

El primer tejido, etiquetado como CO, corresponde a un tejido hecho 100% con fibras de algodón. Es un tejido ampliamente utilizado en la industria textil por su fibra natural biodegradable. Además, esta fibra presenta permeabilidad, suavidad y humectabilidad. Las muestras de algodón fueron obtenidas a partir de un blanqueamiento químico y óptico (véase Figura 5.1a).

El tejido textil referenciado como T1 se compone de hilos de poliéster y un hilo de trama de chenilla² azul, con una proporción de una chenilla por dos de poliéster, creando un efecto burbuja que aumenta su espesor (véase Figura 5.1b).

Los tejidos T2, T3 y T5 también están compuestos como el T1, de hilos de poliéster, pero sin chenilla. El efecto teñido para darle color al tejido se obtuvo a partir de la técnica de estampación³. En particular, el tejido T3, está impreso con diseños simples que emplean uno o más colores y tiene una textura rugosa (véase Figura 5.1c). Los tejidos T2 y T5 presentan una cara suave por un lado y una ligera textura por el otro. La diferencia entre ambos tejidos se encuentra en el teñido y el gramaje.

² La chenilla es un tejido compuesto por un hilo de pelo cortado. Entre sus principales características se destaca su suavidad al tacto, alta resistencia, de aspecto aterciopelado y voluminoso.

³ La técnica de estampación consiste en aplicar color al tejido para obtener el patrón o diseño deseado.

El siguiente tejido etiquetado como T4 también está compuesto 100% de fibras de poliéster. No presenta ningún hilo de chenilla ni otro tipo de diseños de impresión. Fue creado a través del telar de Jacquard⁴.

El último tejido, T6, se compone de hilos de poliéster y un hilo de chenilla de color rosa, que le proporciona grosor al tejido (véase Figura 5.1d).

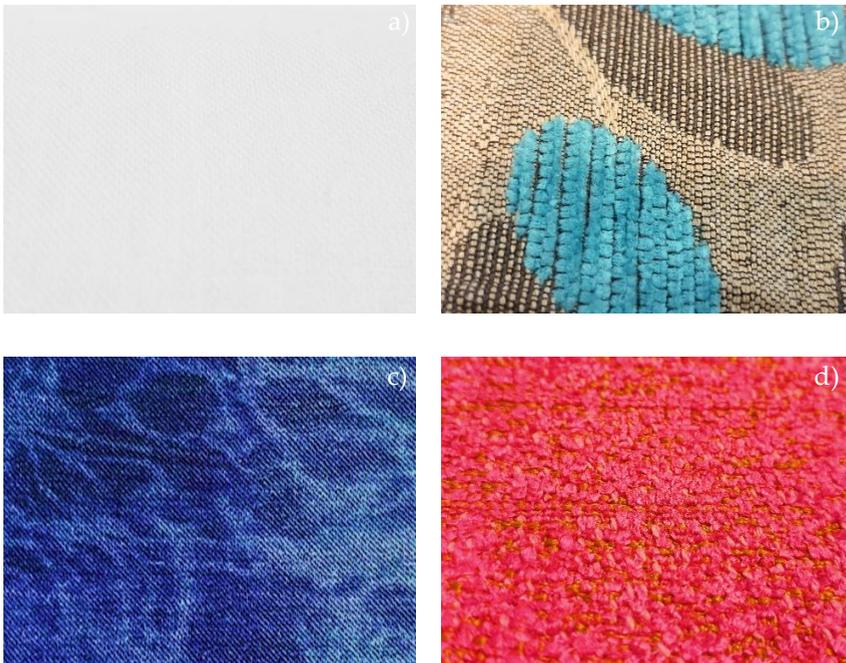


Figura 5.1. Algunos de los materiales textiles seleccionados para los ensayos. a) CO, b) T1, c) T3 y d) T6.

⁴ El telar de Jacquard permite crear el dibujo a la vez que se va fabricando la tela, permitiendo así combinar distintos colores o hilaturas con distinto gramaje en el tejido.

Los valores medidos experimentalmente de espesor, densidad superficial y resistividad al flujo (medido a través del método experimental descrito en la Sección 3.1.2 del Capítulo 3-Métodos experimentales) de los tejidos base estudiados se presentan en la Tabla 5.1. Para la resistividad al flujo se utiliza un rango de valores porque los tejidos utilizados no son homogéneos en todo su conjunto.

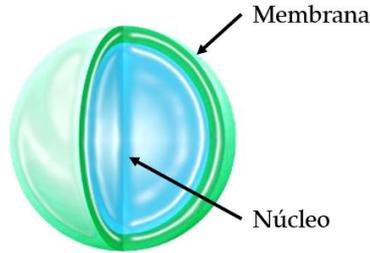
Tejidos	Espesor (mm)	Densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$)	$\sigma(\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
CO	0.3	183	1363–1370
T1	1.8	398	204–250
T2	0.5	159	786–842
T3	0.8	358	506–516
T4	0.7	245	571–579
T5	0.5	199	809–823
T6	1.4	478	270–274

Tabla 5.1. Espesor (mm), densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de tejidos base analizados.

5.2.2 Dopado de tejidos

Las microcápsulas son partículas compuestas por uno o más principios activos. Estas partículas también son conocidas por el nombre de microempaquetados o microcontenedores. En la Figura 5.2 se puede observar un esquema de una microcápsula compuesta por una membrana externa (color verde) que engloba y retiene el núcleo (color azul) que es el principio activo.

La membrana utilizada en este trabajo es de tipo polimérica sólida, resistente al agua e insoluble y protege al núcleo de múltiples factores externos. El núcleo puede ser de composición muy diversa ya que puede estar en estado líquido, sólido o gaseoso. De manera general, para los tejidos textiles se aplican encapsulados en formato líquido.



Fuente: www.agrolytix.com

Figura 5.2. Esquema de una microcápsula esférica.

Durante el proceso de microencapsulación se tienen en cuenta las propiedades de las MCCs, tales como la forma, el tamaño, la durabilidad o la permeabilidad. Esta última es la más importante y la que determina el propósito del uso de las MCCs.

En la Figura 5.3 se muestra un esquema general de la técnica de impregnación utilizada en este estudio a fin de adherir las MCCs a la superficie de los tejidos textiles de calada.

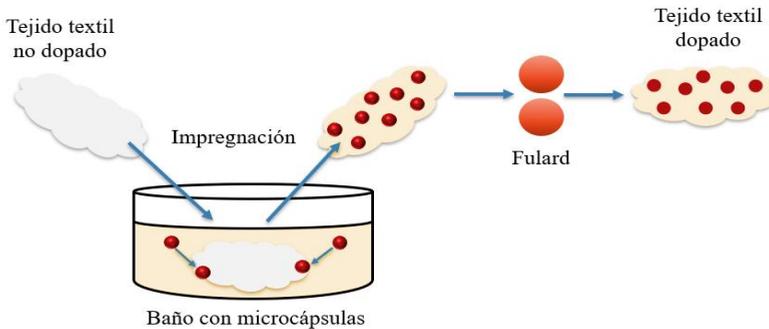


Figura 5.3. Esquema del proceso de aplicación de las microcápsulas sobre la superficie de los tejidos textiles de calada mediante la técnica de impregnación.

La técnica de impregnación consiste en un rápido proceso de inmersión de la muestra textil en un baño de microcápsulas. Tal y

como se muestra en la Figura 5.3, el tejido se introduce en un baño con agua destilada previamente preparado, que contiene una solución con una dispersión de microcápsulas de tamaño entre 1 μm y 8 μm . Posteriormente, en un periodo de tiempo relativamente corto, se extrae la muestra dopada para que pase a través de unos cilindros que actúan por acción mecánica, exprimiendo y obligando al baño, que ha absorbido la fibra textil, a que penetre y se introduzca dentro de la muestra textil. Esta última fase se realiza a través del Fulard horizontal modelo 2608 TEPA⁵. Tanto la velocidad como la presión de los cilindros se regularon para conseguir que el porcentaje de baño⁶ absorbido por el tejido textil fuera de, al menos, 80% [Atiénzar et al., 2019]. Para completar el proceso, las muestras dopadas fueron secadas en un secador horizontal infrarrojo durante 180 s a una temperatura de 105 °C.

El proceso de dopado de diferentes muestras de tejido se llevó a cabo con microcápsulas que tenían como principio activo aceite esencial de lavanda (*Lavandula Officinalis*)⁷. Estas MCCs fueron suministradas por InnovaTec S&C S.L. Durante el proceso no se añade ningún tipo de aglutinante. En este estudio, se utiliza una misma concentración de MCCs de 100 g/L para todos los tejidos con referencia T, mientras que para la fibra de algodón se usan diferentes concentraciones de MCCs: 25 g/L, 50 g/L y 100 g/L.

Las microcápsulas, debido a su tamaño micrométrico, son imperceptibles por el ojo humano. Por tanto, para poder observar la superficie de los tejidos con una resolución de hasta 100 μm , se utiliza la técnica de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) modelo ZEISS ULTRA55. Con esta técnica se puede observar

⁵ El Fulard horizontal modelo 2608 TEPA es el equipo escogido para llevar a cabo la aplicación de las microcápsulas sobre la superficie de los tejidos.

⁶ El porcentaje de baño que el tejido absorbe (mL/ 100 g) también se le conoce como pick-up (%).

⁷ El aceite esencial de lavanda es uno de los más utilizados por su agradable aroma, además tiene propiedades antimicóticas y antibacterianas.

el tamaño, la estructura y la posición de cada microcápsula, así como la forma de la membrana (suave o rugosa) [Hong & Park, 1990; Ré & Biscans, 1999]. En este estudio, las muestras se exploraron a través de un voltaje de aceleración de 2 kV, un tamaño de abertura de lente de 10 μm y 2000X aumentos (véase la Figura 5.4a y la Figura 5.4b). Para la visualización de las MCCs a través de la técnica FESEM, previamente las muestras se fijaron en un soporte estándar a fin de ser recubiertas con una película delgada de metal dorado/platino en condiciones de vacío.

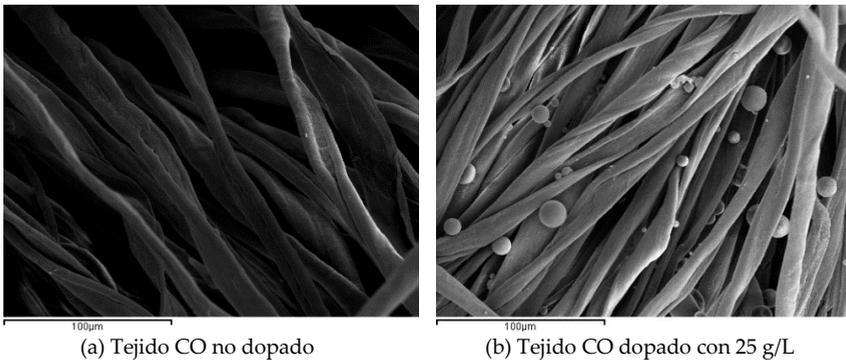


Figura 5.4. Micrografías FESEM del tejido de algodón. (a) Superficie de la muestra del tejido CO no dopado; (b) Tejido CO dopado con una concentración de microcápsulas de 25 g/L.

5.3 Resultados y discusión

En primer lugar, se presenta un estudio sobre la homogeneidad del proceso de dopado y la concentración de microcápsulas en los tejidos textiles. A continuación, se muestra como influye el dopado de tejidos en la absorción acústica. Para el análisis se emplea una cavidad de aire con una profundidad de 10 cm. Este tipo de cavidades de aire se utilizan para el estudio de las propiedades acústicas de tejidos textiles [Del Rey et al., 2013]. Finalmente, se procede a aplicar el modelo de membrana descrito en la Sección 2.3 del Capítulo 2-Modelos y métodos, para los tejidos referenciados como tipo T.

5.3.1 Homogeneidad del proceso de dopado

En el proceso de dopado intervienen diferentes factores como son la concentración de microcápsulas, el tipo de dopado, el tamaño de las MCCs o el tipo de tejido base empleado. Debido a la complejidad del problema y del gran número de variables que intervienen en el proceso, se han asumido las siguientes hipótesis de trabajo:

- Para el dopado de los tejidos se ha utilizado la técnica de impregnación presentada en la Sección 5.2.2. El tamaño de las MCCs varía de 1 μm a 8 μm . Se asume que la distribución de los distintos tamaños de MCCs es idéntico en todos los dopajes [Azizi et al., 2011].
- Durante el proceso de caracterización acústica de las muestras dopadas, se pudo asumir que la cantidad de MCCs adheridas a los tejidos de calada no cambia significativamente. Sin embargo, es conocido que el lavado [Bonet–Aracil et al., 2016], el frotamiento y la vibración [Selda–Tözüm et al., 2015, Monllor et al., 2007] de las muestras textiles puede reducir la concentración de MCCs. Por todo ello, en el laboratorio, se ha tenido mucho cuidado con el manejo de las muestras dopadas a fin de conservar sus propiedades acústicas y así no reducir el número de MCCs adheridas al textil durante todo el proceso de medición.

Tal y como se comentó en la Sección 5.2.2, en el proceso de dopado del tejido base, toda la muestra es sometida a un baño de MCCs de inmersión rápida y, posteriormente, pasa por unos cilindros donde se exprime la muestra, obligando al baño, que ha absorbido la muestra, a que se introduzca en el textil. La calidad del tratamiento de este proceso debe garantizar que la muestra, en todo su conjunto, se dopa de manera homogénea. Esto implica que tanto la proporción como el tamaño de las MCCs adheridas al material textil dopado deben distribuirse espacialmente.

En esta sección se ha comprobado la homogeneidad de las muestras dopadas a partir del análisis de las propiedades acústicas de diferentes muestras del mismo tejido de algodón dopado. Para este ensayo, se ha considerado conveniente el uso de esta fibra natural porque es ampliamente usada en la industria textil. Las pruebas se realizaron con un baño que contiene una concentración de MCCs de 25 g/L. Una vez dopada la muestra, esta fue cortada en forma circular con el mismo diámetro que el tubo de impedancia, descrito en la Sección 3.1 del Capítulo 3-Métodos experimentales.

La Figura 5.5 muestra el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tres muestras de algodón dopadas con la misma técnica y concentración de MCCs (25 g/L). Como se puede apreciar, las diferencias en la absorción acústica entre diferentes muestras son inferiores al 10%, y siempre se sitúan por debajo del margen de error del procedimiento experimental. Por tanto, con estos resultados se puede asegurar, con gran fiabilidad, la homogeneidad del proceso de dopado.

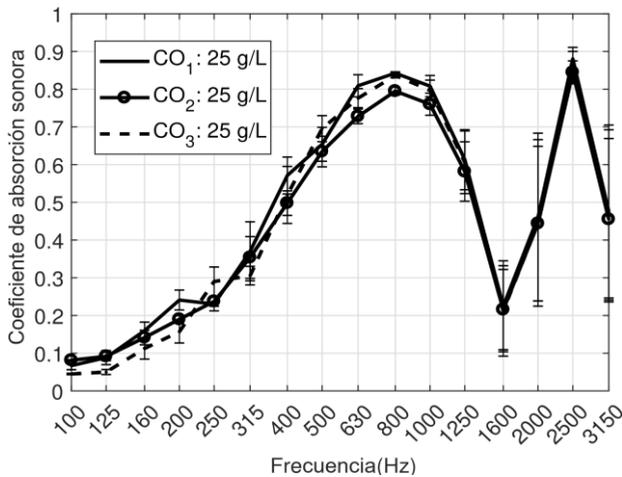


Figura 5.5. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tres muestras de algodón medidas en un tubo de impedancia con una cavidad de aire de 10 cm. Las muestras fueron cortadas del mismo tejido textil dopado con la misma concentración de MCCs (25 g/L) a fin de probar la repetibilidad y la homogeneidad del proceso de dopado.

5.3.2 Influencia del dopado en la absorción acústica

Como se ha comentado en la sección anterior, para evaluar la influencia del dopado en la absorción acústica se toma como referencia la fibra de algodón. Por tanto, para el estudio se consideraron cuatro muestras CO con un espesor inferior a 1.00 ± 0.01 mm. Una de las muestras no fue dopada. Las otras muestras se doparon con distinta concentración de MCCs: 25 g/L, 50 g/L y 100 g/L. En la Figura 5.6 se muestra el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de la muestra no dopada comparada con las otras tres, dopadas con diferentes concentraciones de MCCs. Como se puede apreciar, la frecuencia para la cual la absorción es máxima se sitúa en 800 Hz, para todas las configuraciones estudiadas. Por tanto, se puede decir que la concentración de MCCs no cambia las propiedades resonantes del material. Esto es esperable ya que el primer pico de resonancia está asociado con $f_0 = c_0/4d$. Con $d = 10$ cm y en condiciones normales, la frecuencia f_0 es del orden de 800 Hz. En el rango de frecuencias de 400 Hz a 1250 Hz, se produce un incremento en la absorción acústica de todas las configuraciones dopadas, comparadas con la muestra no dopada. La máxima diferencia entre las muestras dopadas y no dopadas se alcanza en la frecuencia de resonancia. Además, se puede observar que una concentración de MCCs de 25 g/L es suficiente para apreciar un notable efecto acústico. Aparentemente, no hay diferencias significativas en la absorción acústica para valores superiores a 25 g/L. Por tanto, se puede concluir que, al variar las propiedades mecánicas y acústicas de un material textil al doparlo, se produce un cambio en la absorción acústica, pero el efecto de las MCCs satura con una determinada concentración.

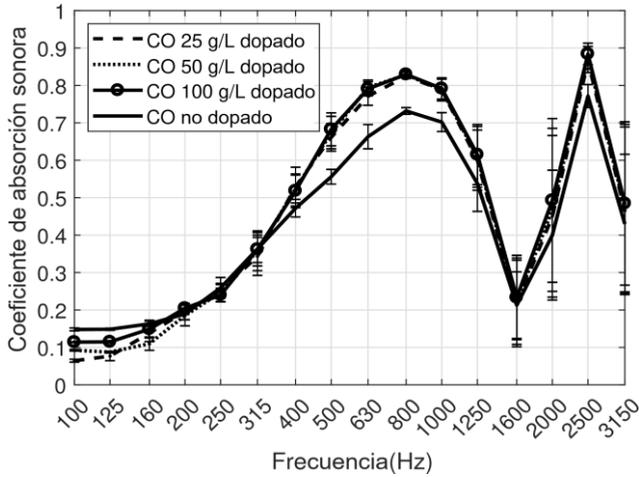


Figura 5.6. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de muestras de algodón dopadas con distintas concentraciones de microcápsulas con una cavidad de aire de 10 cm.

Tomando como referencia la Tabla 5.1, se puede deducir que la variación en la absorción acústica de los tejidos dopados no está ligada ni a la densidad de masa superficial, ya que el peso de las microcápsulas es muy pequeño comparado con el tejido, ni a la resistividad al flujo de aire, porque las MCCs no cambian significativamente la resistividad de las fibras, como se muestra en la Tabla 5.2. Por tanto, el mecanismo de absorción acústica ha de estar relacionado con alguna otra característica del material.

Tejido CO	Densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$)	$\sigma(\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
No dopado	183	1363–1370
25 g/L	191	1344–1380
50 g/L	199	1350–1383
100 g/L	187	1342–1360

Tabla 5.2. Valores de densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de las muestras de algodón, de espesor 0.3 mm, no dopadas y dopadas.

5.3.3 Comportamiento de membrana del tejido dopado

Tal y como se explicó en la Sección 4.2.1 del Capítulo 4- Estructura de la fibra textil, un tejido textil de calada es el resultado de entrelazar dos hilos o fibras: uno longitudinal (urdimbre) y otro transversal (trama). En el proceso de dopado, la adhesión de las MCCs al textil depende del tipo de hilo y su entretejido⁸. Aquí se pretende, por una parte, determinar el efecto de dopado (probado ya en la Sección 5.3.2) en diferentes tejidos referenciados como tipo T y, por otra parte, aplicar el modelo de membrana que se ha presentado en la Sección 2.3 del Capítulo 2- Modelos y métodos. Para ello, seis tejidos diferentes fueron dopados mediante la técnica de impregnación en un baño con agua destilada con una misma concentración de MCCs de 100 g/L. Los valores de espesor, densidad superficial y resistividad al flujo de estos tejidos dopados pueden observarse en la Tabla 5.3.

Tejidos T	Espesor (mm)	Densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$)	σ ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) dopado
T1	1.8	398	230–232
T2	0.5	159	815–819
T3	0.8	358	509–510
T4	0.7	245	577–581
T5	0.5	199	820–839
T6	1.4	478	286–292

Tabla 5.3. Valores de espesor (mm), densidad superficial ($\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$) y resistividad al flujo ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) de las muestras tipo T dopadas con 100 g/L.

⁸ Entretejer hace referencia a insertar en la tela que se está tejiendo hilos diferentes a fin de realizar un dibujo distinto.

La Figura 5.7 muestra los resultados del coeficiente de absorción acústica en incidencia normal usando una cavidad de aire de 10 cm para los tejidos referenciados como tipo T.

Como se observa en la Figura 5.7, dependiendo del efecto causado por el dopado de tejidos sobre la absorción acústica en incidencia normal, éstos pueden agruparse en tres categorías:

- a) Tejidos que mejoran la absorción acústica por dopaje (T5 y T6).
- b) Tejidos que no muestran ningún efecto por dopaje (T1 y T3).
- c) Tejidos que empeoran la absorción acústica por dopaje (T2 y T4).

Por tanto, el comportamiento acústico de los tejidos después del proceso de dopado es diverso (aumenta, disminuye o no produce ningún cambio en la absorción acústica) y depende significativamente del tipo de tejido base que se considera.

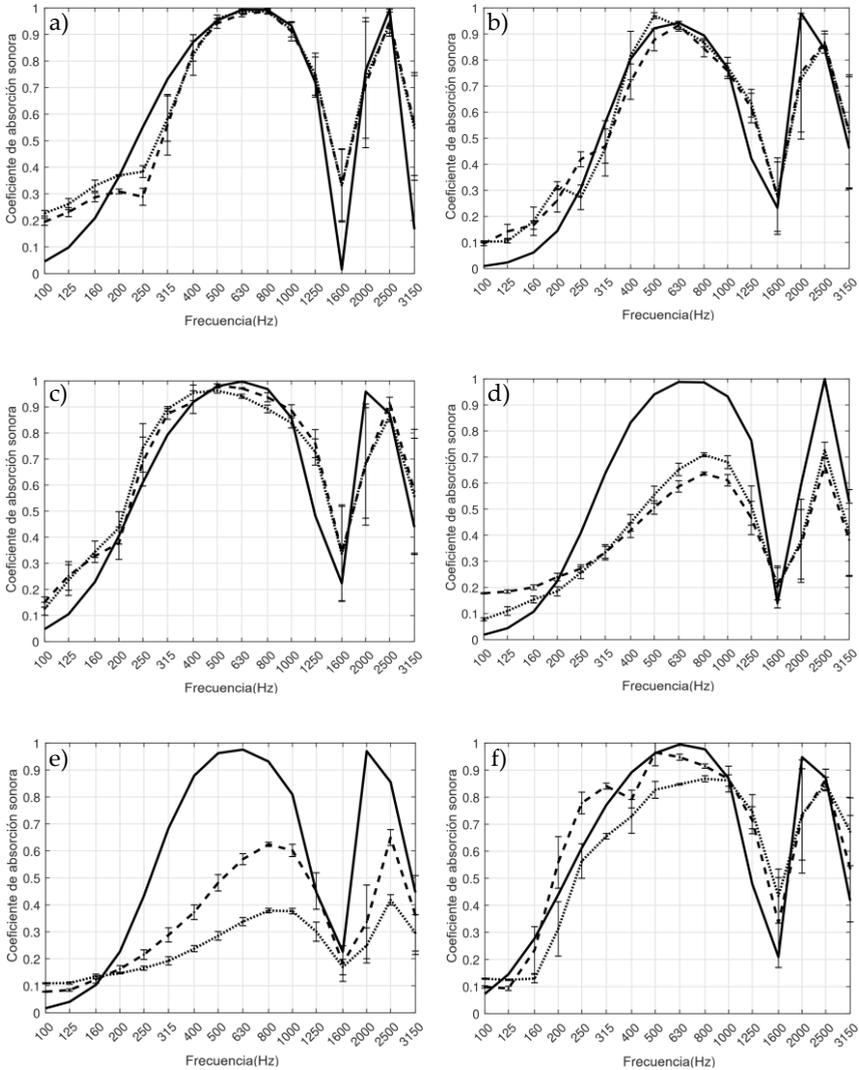


Figura 5.7. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tejidos textiles no dopados (línea de puntos) y dopados (línea discontinua) usando una cavidad de aire de 10 cm. Los resultados experimentales se comparan con la estimación del modelo teórico de membrana (línea sólida). Las diferencias en el modelo teórico entre tejidos dopados y no dopados son despreciables y han sido representadas con la misma curva. a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5 y f) T6.

Como se puede ver en la Figura 5.7, el modelo de membrana [Pieren et al., 2012] presenta una buena aproximación para tejidos con un coeficiente de absorción acústica alto (T1, T2, T3 y T6), pero no es preciso para tejidos menos absorbentes (T4 y T5). La razón principal puede deberse a que las pérdidas de la cavidad de aire en tejidos menos absorbentes son comparables a las de la muestra textil, de forma que se incumple una de las hipótesis del modelo.

5.4 Conclusiones

En este estudio, se ha medido el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal en el rango de frecuencias de 100 Hz a 3150 Hz con la finalidad de determinar la influencia de las MCCs adheridas al tejido textil. Se ha realizado un análisis comparativo con muestras de algodón dopadas con distintas concentraciones de MCCs. Los resultados han sido analizados bajo las hipótesis de: 1) homogeneidad en la distribución de MCCs, 2) homogeneidad en cantidad de MCCs adheridas al tejido y 3) una distribución idéntica de los distintos tamaños de MCCs en todas las muestras dopadas.

El resultado de dopar un tejido con MCCs no produce un cambio en la frecuencia de la primera resonancia acústica. En cambio, sí que se observa un incremento en la absorción acústica a medias frecuencias. Se observa que es necesaria una concentración mínima de MCCs a fin de producir algún efecto significativo en el comportamiento acústico del tejido base, pero este efecto satura con una determinada concentración de MCCs. Se ha analizado la influencia en la absorción acústica de las MCCs en seis tejidos textiles de propiedades distintas. El dopaje tiene un efecto diferente (aumenta, disminuye o no tiene ninguna influencia en la absorción sonora) dependiendo del tipo de tejido base.

Se ha utilizado un modelo de membrana en combinación con el método de la matriz de transferencia con el fin de predecir el

coeficiente de absorción acústica en incidencia normal del tejido textil dopado y no dopado respaldado con una cavidad de aire de 10 cm y terminación rígida. Este modelo tiene limitaciones cuando las pérdidas en la cavidad de aire son comparables con las del tejido textil. La descripción del comportamiento acústico por presencia de MCCs en el tejido resulta compleja debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el análisis. Por tanto, se necesitan nuevos modelos teóricos para comprender los mecanismos físicos subyacentes en el efecto de las MCCs adheridas a las fibras textiles.

Este trabajo supone un primer paso para la creación de nuevas soluciones funcionales basadas en la mejora y el control de la absorción acústica con el uso de MCCs. Los resultados presentados en este capítulo evidencian que se puede controlar la absorción acústica de tejidos dopados con diferente concentración de microcápsulas.

Referencias

[Aggarwal et al., 1998] Aggarwal AK, Dayal A, Kumar N. Microencapsulation processes and applications in textile processing. *Colourage*, 1998; 45(8):15–24.

[Nelson, 2001] Nelson G. Microencapsulation in textile finishing. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, 2001;31(1):57–64.

[Ghosh, 2006] Ghosh SK. Functional coatings and microencapsulation: A general perspective. *Functional Coatings*, 2006; 1–28. <https://doi.org/10.1002/3527608478.ch1>.

[Deasy, 1984] Deasy PB. Microencapsulation and related drug processes. United States, New York: Marcel Dekker, 1984;20:234–237.

[Gao et al., 2017] Gao D, Lyu L, Lyu B, Ma J, Yang L, Zhang J. Multifunctional cotton fabric loaded with Ce doped ZnO nanorods. *Mater Res Bull*, 2017;89:102–107. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.01.030>.

[Monllor et al., 2009] Monllor P, Sánchez L, Cases F, Bonet–Aracil MÁ. Thermal behavior of microcapsulated fragrances on cotton fabrics. *Text Res J*, 2009;79(4):365–380. <https://doi.org/10.1177/0040517508097520>.

[Golja et al., 2014] Golja B, Sumiga B, Podgornik BB, Medved J, Pusic T, Tavcer PF. Application of flame-retardant microcapsules to polyester and cotton fabrics. *Mater Technol*, 2014;48(1):105–111. ISSN 1580–2949.

[Solomon et al., 2012] Solomon B, Sahle FF, Gebre–Mariam T, Asres K, Neubert RHH. Microencapsulation of citronella oil for mosquito-repellent application: Formulation and in vitro permeation studies. *Eur J Pharm Biopharm*, 2012;80:61–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2011.08.003>.

[Dubey et al., 2009] Dubey R, Shami TC, Bhasker–Rao KU. Microencapsulation technology and applications. *Defence Sci J*, 2009;59(1):82–95. <https://doi.org/10.14429/dsj.59.1489>.

[Bonet–Aracil et al., 2015] Bonet–Aracil MÁ, Monllor P, Capablanca L, Gisbert–Payá J, Díaz P, Montava I. A comparison between padding and bath exhaustion to apply microcapsules onto cotton. *Cellulose*, 2015;22(3): 2117–2127. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0600-8>.

[Bonet–Aracil et al., 2012] Bonet–Aracil MÁ, Capablanca L, Monllor P, Díaz P, Montava I. Studying bath exhaustion as a method to apply microcapsules on fabrics. *J Text I*, 2012;103(6):629–635. <https://doi.org/10.1080/00405000.2011.596665>.

[Rocha et al., 2012] Rocha GA, Fávoro–Trindade CS, Grosso CRF. Microencapsulation of lycopene by spray drying: Characterization, stability and application of microcapsules. *Food and Bioproducts Processing*, 2012;90(1):37–42. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.01.001>.

[Meirowitz, 2019] Meirowitz R. Microencapsulation technology for coating and laminating. *Smart Textile Coatings and Laminates*, 2019;117–154. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102428-7.00005-5>.

[Monllor et al., 2009] Monllor P, Capablanca L, Gisbert–Payá J, Díaz P, Montava I, Bonet–Aracil MÁ. Improvement of microcapsule adhesion to fabrics. *Text Res J*, 2009;80(7):631–635. <https://doi.org/10.1177/0040517509346444>.

[Zhou et al., 2006a] Zhou H, Li B, Huang G. Sound absorption characteristics of polymer microparticles. *J Appl Polym Sci*, 2006; 101(4):2675–2679. <https://doi.org/10.1002/app.23911>.

[Zhou et al., 2006b] Zhou H, Li B, Huang G. Sound absorption behavior of multiporous hollow polymer micro-spheres. *Mater Lett*, 2006;60(29–30):3451–3456. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.030>.

[Cheng et al., 2016] Cheng F, Lu P, Ren P, Chen J, Ou Y, Lin M, Liu D. Preparation and properties of foamed cellulose–polymer microsphere hybrid materials for sound absorption. *BioResources*, 2016;11(3):7394–7405.

<https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7394-7405>.

[Zhi et al., 2016] Zhi C, Long H. Sound absorption properties of syntactic foam reinforced by warpknitted spacer fabric. *Cell Polym*, 2016;35(5):271–286.

<https://doi.org/10.1177/026248931603500503>.

[Atiénzar et al., 2019] Atiénzar–Navarro R, Bonet–Aracil MÁ, Gisbert–Payá J, del Rey R, Picó R. Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules. *Revista de Acústica*, 2019;50(3 y 4):13–21. ISSN: 2254-2396.

[Hong & Park, 1990] Hong K, Park S. Melamine resin microcapsules containing fragrant oil: synthesis and characterization. *Mater Chem and Phys*, 1990;58(2):128–131.

[https://doi.org/10.1016/s0254-0584\(98\)00263-6](https://doi.org/10.1016/s0254-0584(98)00263-6).

[Ré & Biscans, 1999] Ré MI, Biscans B. Preparation of microspheres of ketoprofen with acrylic polymers by a quasi–emulsion solvent diffusion method. *Powder Technol*, 1999;101(2):120–133. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(98\)00163-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00163-6).

[Azizi et al., 2011] Azizi N, Ladhari N, Majdoub M. Elaboration and characterization of polyurethane-based microcapsules: application in textile. *Asian J Text*, 2011;1(3):130–137. <https://doi.org/10.3923/ajt.2011.130.137>.

[Bonet–Aracil et al., 2016] Bonet–Aracil MÁ, Bou–Belda E, Monllor P, Gisbert–Payá J. Binder effectiveness of microcapsules applied onto cotton fabrics during laundry. *J Text I*, 2016;107(3):300–306. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1029808>.

[Selda–Tözüm et al., 2015] Selda–Tözüm M, Alay–Aksoy S. Investigation of tactile comfort properties of the fabrics treated with microcapsules containing phase change materials (PCMs microcapsules). *J Text I*, 2015;107(9):1203–1212.

<https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1099374>.

[Monllor et al., 2007] Monllor P, Bonet–Aracil MÁ, Cases F. Characterization of the behaviour of flavour microcapsules in cotton fabrics. *Eur Polym J*, 2007; 43(6):2481–2490. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.04.004>.

[Pieren, 2012] Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text Res J*, 2012;82(9):864–874. <https://doi.org/10.1177/0040517511429604>.

[Del Rey et al., 2013] Del Rey R, Alba J, Blanes M, Marco B. Absorción acústica de cortinas textiles en función del vuelo. *Materiales de Construcción*, 2013;63(312):569-580. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.05512>.

Capítulo 6

Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles

Registro bibliográfico

- **Autores (p. o. de firma).** R. Atiénzar–Navarro, R. del Rey, J. Alba, V.J. Sánchez–Morcillo and R. Picó.
- **Título.** Sound absorption properties of perforated polyurethane foams reinforced with woven fabric.
- **Revista.** *Polymers*.
- **Volumen** 12.
- **Páginas, Inicial:** 401; **Final:** 419.
- **Fecha.** 2020.
- **DOI:** 10.3390/polym12020401.
- **I.S.S.N:** 2073-4360.

En este capítulo se propone modificar las prestaciones como absorbentes acústicos de espumas de poliuretano recicladas. Para ello, se propone combinar las espumas recicladas con tejidos textiles a fin de disponer de absorción selectiva. El contexto de esta investigación se enmarca en el análisis de las propiedades de absorción acústica de materiales perforados con distintas técnicas y su combinación con tejidos textiles a fin de cambiar las propiedades acústicas del conjunto. Los contenidos de este capítulo están organizados en cuatro secciones. En la Sección 6.1 se presentan los antecedentes que motivan esta

investigación. La Sección 6.2 desarrolla los materiales y métodos utilizados. En la Sección 6.3 se recogen los resultados más relevantes de este estudio. Por último, en la Sección 6.4, se reflexiona sobre las conclusiones de este trabajo. Para mayor detalle se remite al lector al Anexo A.3.

6.1 Introducción

La espuma de poliuretano reciclada (se utiliza el acrónimo RPU, del inglés *recycled polyurethane*) se obtiene a partir del reciclaje de residuos textiles procedentes de diferentes industrias, como la industria del textil [Yang et al., 2012] o la del automóvil. Este material poroso es ampliamente utilizado como material absorbente sonoro debido a su alta eficiencia en la absorción acústica a medias y altas frecuencias [Del Rey et al., 2012; Gama et al., 2017]. En [Del Rey et al., 2012] se presenta un modelo de predicción del comportamiento acústico de las espumas RPU a partir de dos modelos empíricos distintos [Delany & Bazley, 1970; Voronina, 1994]. Recientemente, se presentó en [Chen & Jiang, 2016] un material novedoso compuesto a partir de la combinación de una espuma de poliuretano y diferentes concentraciones de partículas procedentes de hojas de bambú con la finalidad de aumentar las propiedades acústicas del conjunto.

La técnica de perforación de espumas permite cambiar y mejorar la absorción acústica. Entre las contribuciones de la última década en este campo, cabe destacar a Zhang et al. [Zhang et al., 2012] que investigaron la influencia del tamaño de la célula de poro y la porosidad abierta de espumas RPU en la absorción acústica. Tiuc et al. examinaron en [Tiuc et al., 2013] la influencia de la perforación en el coeficiente de absorción acústica y mostraron un incremento en la absorción acústica para frecuencias superiores a 1.2 kHz, comparado con muestras no perforadas.

La tecnología de perforación se utiliza también en otros materiales con propósitos acústicos, como es el caso de los paneles microperforados (MPP). En este contexto, Chevillotte investiga en [Chevillotte, 2012] la influencia de los parámetros microestructurales como el diámetro de perforación, la distribución y el diámetro del poro en el coeficiente de absorción acústica de una muestra de espuma de aluminio perforada. Lou et al. demostraron en [Lou et al., 2015] la influencia del tamaño de la perforación, la tasa de perforación, la profundidad de perforación y el uso de una cavidad de aire en una placa perforada flexible. En los estudios realizados se muestra que al incrementar la profundidad de perforación y el tamaño de la cavidad de aire se produce un desplazamiento del máximo de absorción acústica hacia las bajas frecuencias, mientras que un incremento de la tasa y tamaño de perforación produce un desplazamiento del pico de absorción acústica hacia altas frecuencias. Lin et al. [Lin et al., 2016] estudiaron placas rígidas de espuma de poliuretano perforadas y los resultados mostraron un ligero incremento en la absorción acústica cuando la tasa de perforación disminuía. Recientemente, Xia et al. [Xia et al., 2017] presentaron su trabajo basado en macroestructuras de espuma. Los autores investigaron los efectos de diferentes tipos de perforación y cavidades de aire en el coeficiente de absorción acústica, mostrando que las espumas huecas presentaban un buen comportamiento acústico para frecuencias superiores a 2.5 kHz.

Actualmente, se están investigando nuevas soluciones acústicas que utilizan fibras textiles (membranas delgadas) en combinación con materiales porosos con la finalidad de modificar la absorción acústica del nuevo sistema textil–espuma. En 2012, Ekici et al. presentaron en [Ekici et al., 2012] un material absorbente del sonido hecho a partir de fibras de hojas de té y luffa cilíndrica en combinación con la espuma RPU. Mostraron que a mayor cantidad de fibras de té y luffa, depositadas en la superficie de la espuma, se obtiene una mejora en la absorción acústica en todo el rango frecuencial. En 2014, Del Rey et al. estudiaron en [Del Rey et al., 2014] las mejoras de absorción acústica

por medio de la combinación del nanopapel con diferentes tipos de sustrato base. Los resultados mostraron que el nanopapel mejora las propiedades de absorción acústica de materiales porosos y fibrosos a medias y altas frecuencias. En 2017, Segura–Alcaraz et al. demostraron en [Segura–Alcaraz et al., 2017] la influencia que tiene un tejido de microfibra colocado en la parte superior de una estructura no tejida en la absorción acústica. Los resultados revelaron que la selectividad de la absorción depende del tipo de tejido utilizado. Recientemente, Hajizadeh et al. [Hajizadeh et al., 2019] estudiaron las propiedades acústicas de una espuma de poliuretano flexible combinada con nanopartículas y nanofibras.

El objetivo de este trabajo se centra en investigar la influencia en la absorción acústica de la adhesión de diferentes tejidos textiles (membranas) sobre la superficie de espumas de poliuretano perforadas y no perforadas con el fin de poder modificar y controlar las propiedades acústicas del sistema membrana–espuma.

6.2 Materiales y métodos

En este apartado se presentan las características de los materiales utilizados en este trabajo, como son la espuma de poliuretano reciclada (RPU) y dos tejidos textiles distintos. También se detalla el proceso de preparación de las espumas perforadas y las configuraciones de medida.

6.2.1 Tejidos textiles y RPU

La espuma RPU es un material absorbente celular poroso (véase la Figura 6.1) que procede de la reutilización de residuos producidos por diferentes procesos industriales, como la industria textil, sin utilizar ningún tratamiento químico que provoque algún efecto adverso para el medio ambiente. La espuma RPU utilizada en este estudio tiene un espesor de 2.00 ± 0.15 cm y una densidad de $182 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Esta

espuma reciclada presenta buenas propiedades de absorción acústica y, por ello, es ampliamente utilizada en múltiples aplicaciones, como material absorbente [Verdejo et al., 2009; Tiuc et al., 2016].



Figura 6.1. Espuma de poliuretano reciclada (RPU). A la izquierda se muestra un ejemplo de una muestra preparada para ensayo del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia y a la derecha se observa la superficie de la muestra a través de microscopía con 16X aumentos.

Las muestras de RPU son revestidas por dos tejidos textiles con diferente densidad (T1 y T2, véase la Figura 6.2) con la finalidad de determinar las propiedades acústicas del conjunto tejido–espuma. Ambos textiles son materiales tejidos flexibles que consisten en una red de fibras sintéticas formadas a partir de hilos de poliéster texturizado que aumentan el factor de cobertura. Este tipo de tejidos poseen determinadas propiedades, tales como baja densidad superficial de hilo, bajo costo de producción y una superficie no homogénea. El tejido T1 presenta un hilo de trama de chenilla azul y el tejido T2 de chenilla rosa. En la Tabla 6.1 se muestran algunas características físicas, como el espesor y la densidad, así como también los valores de la resistividad al flujo de ambos tejidos textiles. Para la resistividad al flujo se utiliza un rango de valores porque los tejidos utilizados no eran homogéneos en todo su conjunto.

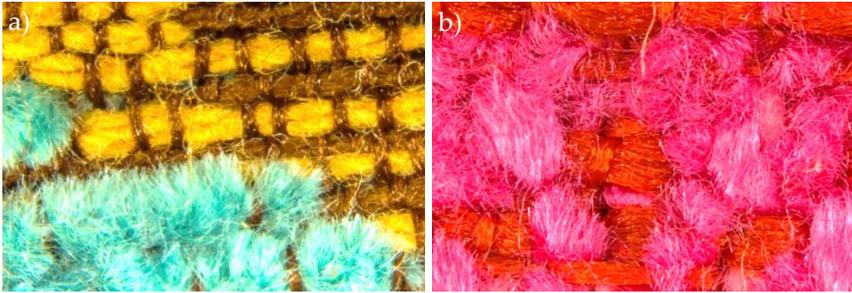


Figura 6.2. Superficie de los tejidos analizada con la técnica de microscopía usando 16X aumentos, donde se aprecia el relieve formado por los hilos de urdimbre y trama para el tejido a) T1 y el tejido b) T2.

Tipo de tejido	t (mm)	ρ (Kg·10 ⁻³ /m ²)	σ (kPa·s·m ⁻²)
T1	1.8	398	204–250
T2	1.4	478	270–274

Tabla 6.1. Espesor (mm), densidad superficial (Kg·10⁻³/m²) y resistividad al flujo (kPa·s·m⁻²) de los tejidos T1 y T2.

6.2.2 Tecnología de perforación de la espuma y configuraciones de medida

Las muestras RPU fueron perforadas por la empresa FabLab Océano Naranja (València, España). Para la perforación de las espumas se utilizaron dos tecnologías diferentes, ambas mediante control numérico por computadora (CNC): CNC fresadora y CNC láser. El CNC trabaja con un código programado con instrucciones para realizar movimientos de alta precisión (con una tolerancia de ± 0.01 mm en cada corte). La máquina CNC interactúa con un ordenador equipado con un software de dibujo transformando el código numérico en coordenadas cartesianas.

Las espumas RPU fueron perforadas con diferentes diámetros de perforación (D) y diferentes tasas de perforación (\emptyset_M), considerando una profundidad de perforación del 100% en todas las muestras. La

tecnología CNC láser concentra la luz en la superficie de la muestra quemándola, mientras que la tecnología CNC fresadora permite la extracción del material cuando se perfora (véase Figura 6.3).



Figura 6.3. Espuma perforada con láser (izquierda) y fresadora (derecha) con las mismas especificaciones: $D = 6 \text{ mm}$ y $\phi_M = 20\%$.

En la Figura 6.4 se muestran imágenes de microscopía de alta resolución (150X aumentos) de la superficie de los orificios de las espumas RPU perforadas. Se puede apreciar el estado de las muestras tras el proceso de perforación, obteniendo información sobre la rugosidad del interior del orificio. La tecnología de perforación CNC láser calienta la espuma focalizando toda la energía del láser en una pequeña zona, provocando que se vaporice el material, y dando lugar a una superficie suave y lisa en todos los orificios (véase la Figura 6.4a). La tecnología de perforación CNC fresadora se basa en un proceso de sustracción, mostrando una mayor rugosidad en los orificios perforados, comparada con el método CNC láser (véase la Figura 6.4b).

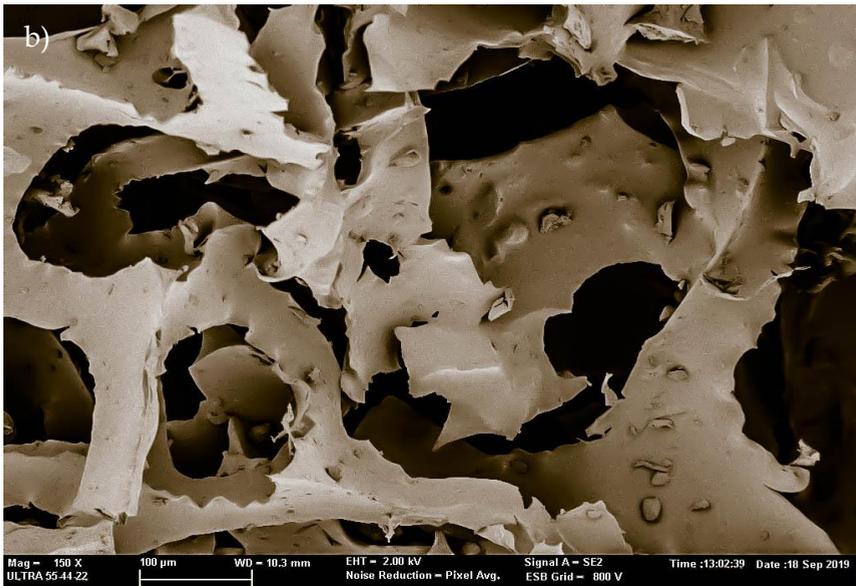
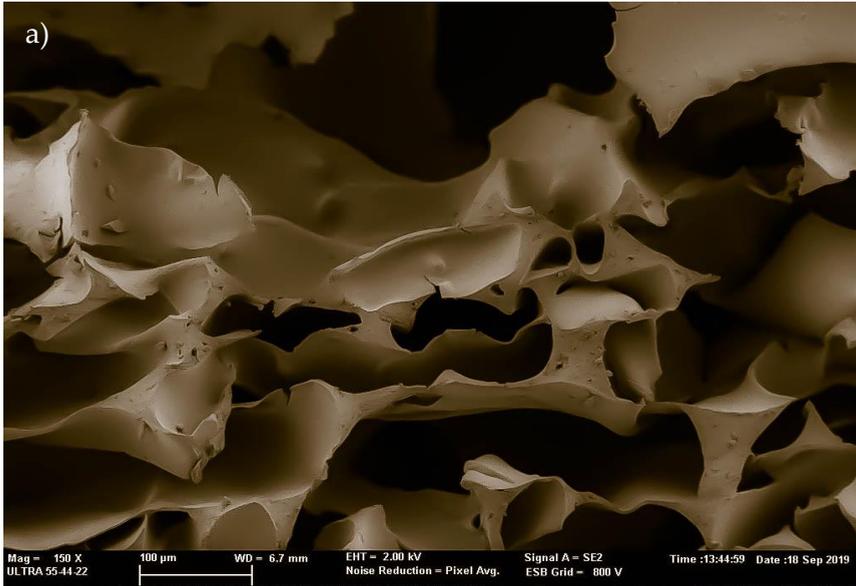


Figura 6.4. Imagen de microscopía electrónica de la superficie de la espuma de poliuretano perforada con diferentes técnicas: a) láser, b) fresado.

Distintas configuraciones de perforación, en distribución de red periódica, se utilizaron con la finalidad de perforar las espumas RPU. Todas las muestras fueron talladas en forma circular (con un radio $R = 2$ cm) y perforadas con un diámetro D , formando una red cuadrada de constante a , que se define como la distancia entre dos celdas unidad adyacentes (véase la Figura 6.5).

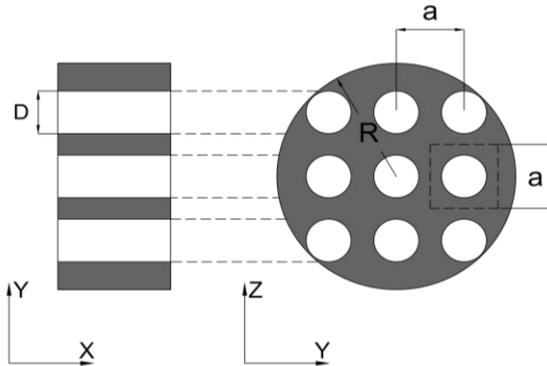


Figura 6.5. Configuración en 2D de una muestra RPU. Perforaciones en red cuadrada de constante a , D : diámetro del orificio perforado y R : radio de la espuma.

La tasa de perforación (\emptyset_M) se define como la relación entre el volumen ocupado por los orificios y el volumen total de la muestra,

$$\emptyset_M = \frac{n}{4} \left(\frac{D}{R} \right)^2 \cdot 100, \quad (6.1)$$

donde n es el número de orificios, D es el diámetro del orificio y R es el radio de la muestra.

La Tabla 6.2 muestra las cuatro configuraciones utilizadas en este estudio. Se utilizaron dos valores de \emptyset_M (5% y 20%) y dos valores de D (4 mm y 6 mm), respectivamente. En la Figura 6.6 se muestra un esquema (a escala real) de la vista superior de las muestras perforadas.

Configuración	\varnothing_M teórico (%)	\varnothing_M experimental (%)	D (mm)	a (mm)	No. de orificios
a)	5	5	4	15.8	5
b)	4,5	5	6	23.8	2
c)	21	20	4	7.9	21
d)	20,3	20	6	11.9	9

Tabla 6.2. Parámetros físicos correspondientes a las cuatro configuraciones de perforación analizadas.

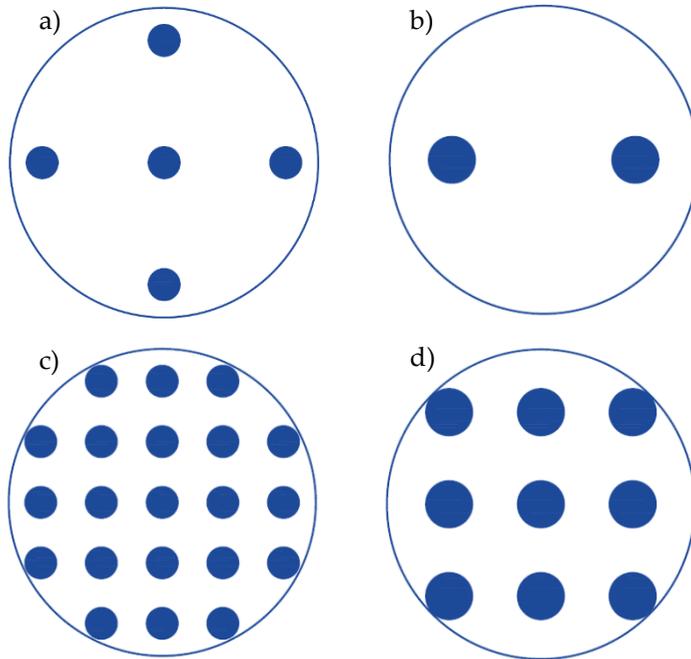


Figura 6.6. Esquema de las cuatro configuraciones consideradas y descritas en la Tabla 6.2.

En la Figura 6.7 se muestra como se refuerza la espuma de poliuretano con un tejido textil de bajo espesor formando el sistema

tejido–espuma¹ con la finalidad de mejorar las prestaciones acústicas de la muestra. Además, se presentan dos imágenes FESEM donde se puede observar, con detalle, la diferencia en la estructura interna de ambas muestras.



Figura 6.7. Muestra el sistema formado por la combinación tejido-espuma y detalle, a nivel microscópico, de los dos materiales.

6.3 Resultados y discusión

A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos en este capítulo. Se determinará la influencia de la tasa de perforación y del diámetro de los orificios en la absorción acústica de las muestras. A fin de mejorar las propiedades acústicas de las espumas perforadas, se propone recubrirlas por dos tejidos textiles. Finalmente, se predice el coeficiente de absorción acústica de la espuma perforada y del sistema tejido–espuma. Para ello, por una parte, se hace uso del modelo Johnson–Champoux–Allard (JCA) de la Sección 2.2.2 y del modelo para materiales de doble porosidad (DP) de la Sección 2.2.3 del Capítulo 2-Modelos y métodos, a fin de modelar la espuma RPU perforada y, por otra, del modelo Delany–Bazley (DB) de la Sección 2.2.1 del Capítulo 2-Modelos y métodos, con la finalidad de modelar los dos tejidos textiles.

¹ En la configuración tejido-espuma, el tejido se fija a la espuma mediante agujas de coser colocadas en los cuatro extremos de la muestra. El grosor de estas agujas es inferior a 1 mm y no afectan significativamente a las medidas acústicas.

6.3.1 Influencia de la tasa y diámetro de perforación

Tal y como vimos en la Sección 6.2.2, existen diferentes tecnologías para perforar materiales dependiendo de su dureza, composición y fabricación. Para el caso particular de las espumas de poliuretano, se utilizaron técnicas de corte eficiente como el láser y la fresadora.

Los efectos producidos en la rugosidad de las paredes perforadas de las muestras dependen de la técnica de perforación escogida. La rugosidad o textura está formada a partir de las marcas que dejan los agentes que modifican la superficie de la muestra en el proceso de mecanizado, proporcionando información sobre la geometría de la superficie mecanizada.

El método de fresado es un método tradicional de contacto con la muestra, que realiza perforaciones a partir de fresas rotativas CNC con el fin de eliminar el material. La calidad de los orificios perforados mejora cuando se realiza una segunda perforación en el mismo orificio [Jayabal & Natarajan, 2011]. El método láser es uno de los métodos sin contacto más extendidos para su uso en aplicaciones industriales y presenta un alto grado de precisión [Radovanović & Dašić, 2006].

En un primer paso se estudia el efecto producido mediante el uso de las dos técnicas de perforado utilizadas en la absorción acústica. En este trabajo, la técnica de fresado se etiqueta como M y la técnica láser como L. Las muestras de espuma perforadas con la técnica de fresado presentan un coeficiente de absorción acústica en incidencia normal ligeramente superior a las muestras perforadas con la técnica láser. En la Figura 6.8 se muestra la diferencia en la absorción acústica entre ambos métodos para la configuración c) de la Tabla 6.2. Analizados ambos métodos, se decide, por simplicidad, utilizar muestras RPU perforadas con el método de fresado (M).

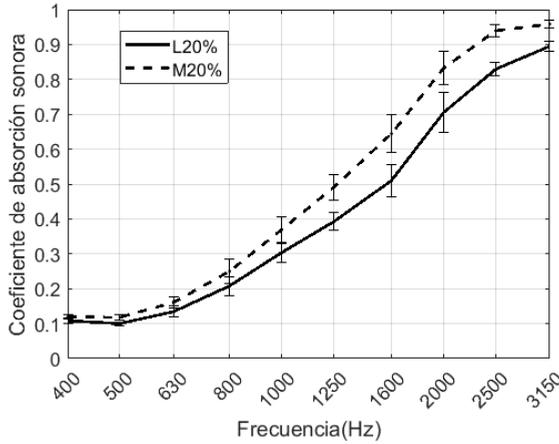


Figura 6.8. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de muestras RPU perforadas con dos técnicas distintas (M: CNC fresadora y L: CNC láser) para $D = 4$ mm y $\varnothing_M = 20\%$.

Una vez determinado el método de perforación de trabajo para la espuma, se lleva a cabo un estudio en el que se utilizan distintas tasas de perforación, \varnothing_M , para un mismo diámetro de abertura $D = 4$ mm. Se corresponden con las configuraciones a) y c) de la Tabla 6.2. Como se puede apreciar en la Figura 6.9, de 400 Hz a 2000 Hz, la espuma no perforada presenta un coeficiente de absorción acústica en incidencia normal ligeramente mayor que las muestras perforadas. Además, se puede ver cómo el máximo de absorción se desplaza hacia altas frecuencias cuando la tasa de perforación se incrementa. La configuración M5% presenta el máximo de absorción a la frecuencia de 2500 Hz, mientras que la configuración M20% presenta su máximo a la frecuencia de 3150 Hz. Las diferencias en el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, comparadas con la espuma no perforada, son mayores para la configuración $\varnothing_M = 20\%$. Con las configuraciones estudiadas, se puede concluir que cuanto mayor sea la tasa de perforación, la frecuencia de resonancia donde la absorción es máxima se desplaza hacia altas frecuencias.

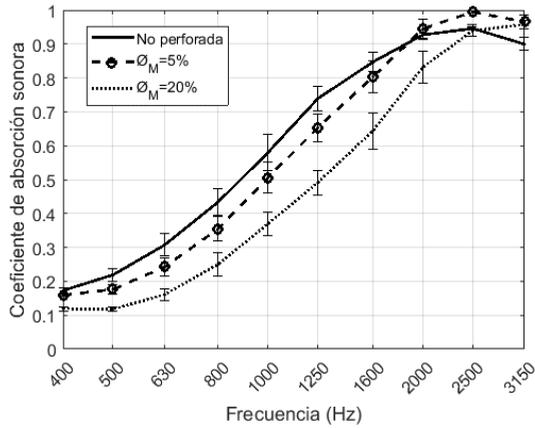


Figura 6.9. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las muestras RPU perforadas para $D = 4$ mm ($\varnothing_M = 5\%$ y $\varnothing_M = 20\%$).

6.3.2 Influencia del tejido textil sobre la espuma perforada

Con el objetivo de mejorar la absorción acústica presentada por las espumas RPU perforadas se pretende, en esta sección, combinarlas con tejidos textiles con el fin de analizar acústicamente el sistema tejido–espuma. Las características de los tejidos T1 y T2 utilizados se pueden consultar en la Tabla 6.1 de la Sección 6.2.1. El coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de ambos tejidos se puede observar en la Figura 6.10. Como se muestra, la absorción acústica de ambos tejidos es pequeña, por debajo de 0.3 en todo el margen frecuencial.

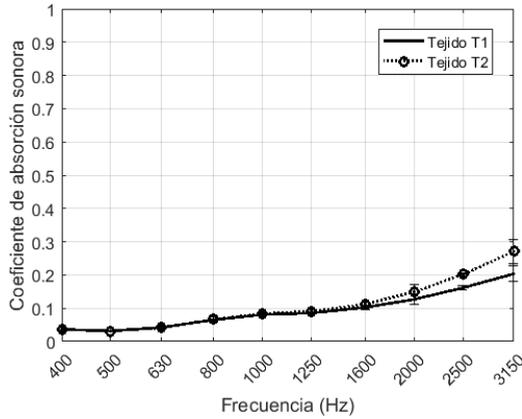


Figura 6.10. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de los tejidos T1 y T2.

En la Figura 6.7 de la Sección 6.2.2 se mostró la colocación del tejido textil en la superficie de la espuma RPU. Se pretende aquí lograr una configuración que proporcione un aumento en la resistencia al flujo de aire del conjunto, ya que este parámetro acústico puede considerarse aditivo en esta unión de materiales. Para materiales de baja densidad, si la resistencia al flujo del sistema tejido–RPU aumenta, se produce un incremento en la impedancia acústica generando un incremento en la absorción sonora (véase la Figura 6.11) [Allard & Atalla, 2009]. Ejemplos de este fenómeno se pueden observar en las referencias [Pieren & Heutschi, 2015; Prasetyo et al., 2020], donde la absorción acústica del tejido en combinación con una cavidad de aire es mucho mayor que la absorción del propio tejido tal y como vimos en el Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles. Esto se consigue a través de un incremento de la parte real de la impedancia de todo el conjunto. En la Figura 6.11 se analiza la influencia que tienen los tejidos textiles sobre las espumas perforadas en el coeficiente de absorción acústica. Como se puede apreciar, cuando se coloca un tejido sobre la superficie de una espuma, el pico de absorción disminuye. La masa adicional introducida por el tejido explica el por qué la frecuencia de resonancia del sistema tejido–RPU se reduce. En las Figuras 6.11a y 6.11b se observa la misma tendencia: el coeficiente de absorción acústica aumenta gracias a la colocación de

un tejido en la superficie de las muestras RPU perforadas y no perforadas. De hecho, se produce un aumento en la absorción acústica a medias frecuencias en el sistema tejido–espuma, comparado con la espuma sin tejido. La presencia de un tejido en la espuma RPU supone un desplazamiento de la absorción acústica máxima hacia bajas frecuencias. En la Figura 6.11a, la combinación T1 – RPU perforada presenta una mayor absorción acústica que la combinación T1 – RPU no perforada a altas frecuencias, de 1350 Hz a 3150 Hz. En la Figura 6.11b se evidencia una mayor diferencia en la absorción acústica cuando se considera la perforación. En ambos casos, se alcanza una absorción casi perfecta a la frecuencia de resonancia.

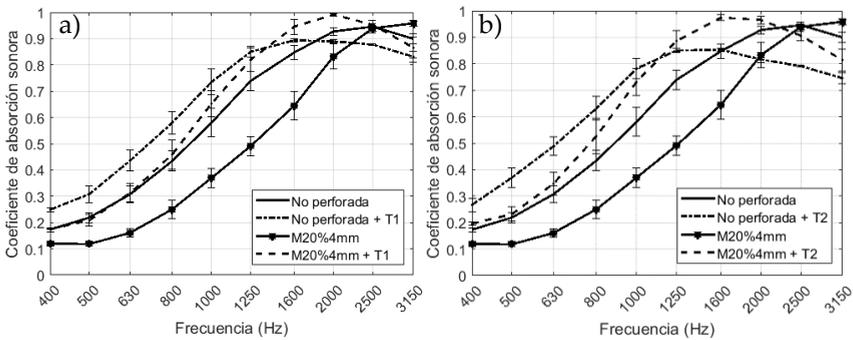


Figura 6.11. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las diferentes combinaciones entre espumas RPU perforadas y no perforadas y los tejidos textiles (T1 y T2): (a) $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm, T1; (b) $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4$ mm, T2.

6.3.3 Validación numérica y teórica

El coeficiente de absorción acústica en incidencia normal fue experimentalmente medido para cuatro configuraciones distintas de espumas RPU perforadas. En la Figura 6.12 se comparan las curvas de absorción acústica predichas con las medidas, con el objetivo de aplicar los modelos teóricos propuestos en la Sección 2.2 (JCA y DP) y el método numérico (MEF) de la Sección 2.5 del Capítulo 2-Modelos y métodos. Como se puede ver en la Figura 6.12, no existen prácticamente diferencias significativas entre los valores predichos y los experimentales. Una coincidencia similar se observó en las otras

dos configuraciones estudiadas. Tanto en los modelos teóricos como en el método numérico se utilizaron los parámetros acústicos de las espumas RPU perforadas y no perforadas presentadas en la Tabla 6.3, con la finalidad de describir el comportamiento acústico de las espumas perforadas. Las ligeras desviaciones producidas a medias frecuencias están asociadas a la incertidumbre del método experimental.

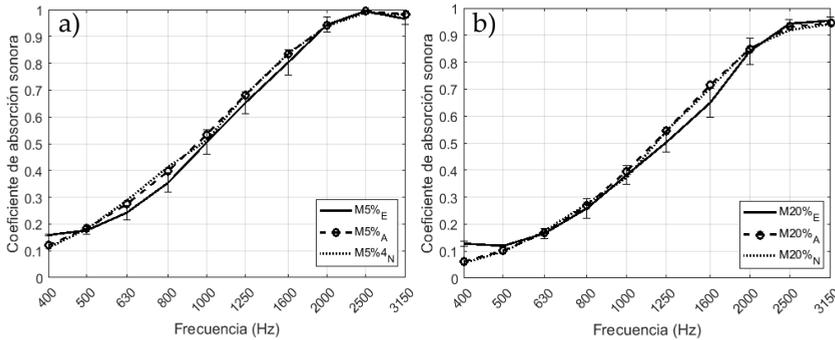


Figura 6.12. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las espumas RPU perforadas con $D = 4$ mm. Comparación entre las medidas experimentales (línea continua), el modelo teórico (línea discontinua) y el método numérico (línea punteada). a) $\varnothing_M = 5\%$, $D = 4$ mm; b) $\varnothing_M = 20\%$, $D = 4$ mm.

Dos configuraciones diferentes de espumas RPU perforadas recubiertas por dos tejidos textiles diferentes fueron medidas experimentalmente. En la Figura 6.13a-d se compara el coeficiente de absorción acústica predicho y medido para cada configuración. En todas las figuras se puede observar una buena concordancia entre las medidas experimentales, los modelos teóricos y el método numérico. En la Tabla 6.4 se presentan, para el método numérico, los valores de los coeficientes de Delany–Bazley para ambos tejidos (T1 y T2). Es importante destacar que no se ha hecho uso del modelo de pérdidas visco-térmicas presentado en la Sección 2.2.4 del Capítulo 2-Modelos y métodos, para las cavidades de aire formadas por las perforaciones. Esto se debe a que este modelo es únicamente válido para perforaciones abiertas y, en esta configuración, la presencia del tejido evita la radiación sonora hacia el exterior de la perforación.

Capítulo 6. Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles

Tejido	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
T1	0.110	0.628	0.184	0.702	0.045	0.817	0.073	0.748
T2	0.098	0.722	0.219	0.671	0.043	1.000	0.089	0.233

Tabla 6.4. Valores de los ocho coeficientes para T1 y T2 obtenidos a partir del modelo Delany–Bazley.

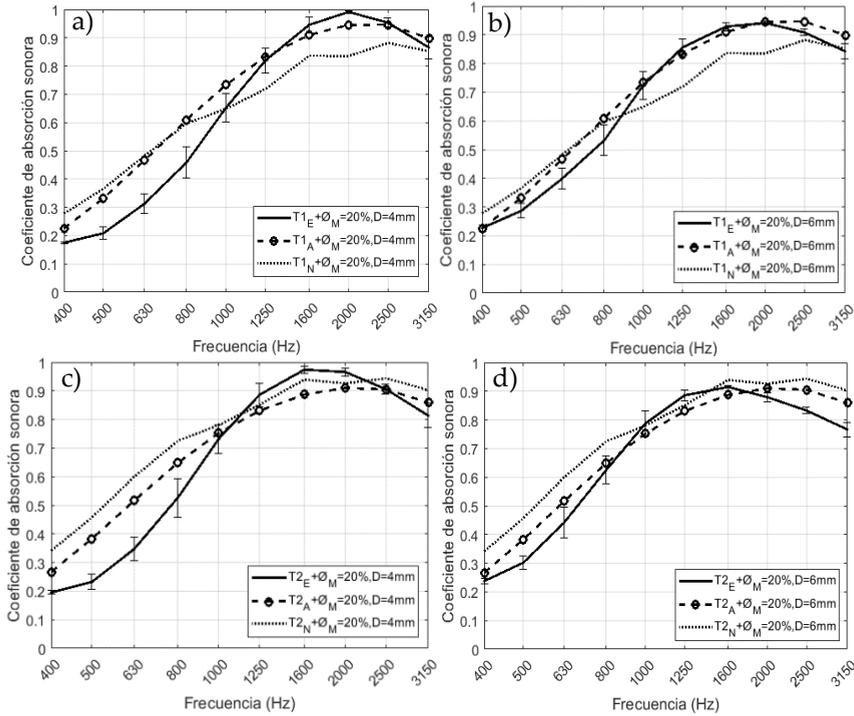


Figura 6.13. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las muestras RPU recubiertas por dos tejidos textiles. Comparación entre las medidas experimentales (línea continua), el modelo teórico (línea discontinua) y el método numérico (línea punteada). a) T1: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4\text{ mm}$; b) T1: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 6\text{ mm}$; c) T2: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 4\text{ mm}$; d) T2: $\emptyset_M = 20\%$, $D = 6\text{ mm}$.

Configuración	No perforada	M5%4mm	M5%6mm	M20%4mm	M20%6mm
ρ_m (kg · m ⁻³)	182	153	165	130	132
\emptyset_M	0	0.05	0.05	0.2	0.2
d (μm)	25				
Λ (μm)	52.1				
Λ' (μm)	104.2				
\emptyset	0.88				
α_∞	1.07				
σ (kPa · s · m ⁻²)	20.4–20.5				
ρ_f (kg · m ⁻³)	1250				

Tabla 6.3. Parámetros acústicos de las configuraciones analizadas. Densidad del material (ρ_m), mesoporosidad (\emptyset_M), densidad de la fibra (ρ_f), longitud característica viscosa (Λ), longitud característica térmica (Λ'), porosidad (\emptyset), tortuosidad (α_∞), resistividad al flujo (σ) y densidad de la fibra (ρ_f).

En la Tabla 6.3, el valor de tortuosidad (α_∞) fue obtenido a partir de la ecuación (2.16), mientras que los valores de longitud característica viscosa (Λ) y térmica (Λ') fueron obtenidos a partir de

las ecuaciones (2.17, 2.18) de la Sección 2.2.2 del Capítulo 2-Modelos y métodos.

6.4 Conclusiones

En este capítulo se ha investigado la influencia de añadir un tejido textil en la superficie de la espuma de poliuretano reciclada con el fin de modificar las propiedades acústicas del conjunto. Se ha medido experimentalmente el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de las muestras con un tubo de impedancia. Para las espumas perforadas, se ha investigado la influencia de parámetros, como la tasa de perforación y el diámetro de la perforación. Se muestra que cuanto mayor sea la tasa de perforación, menor es el coeficiente de absorción acústica en medias frecuencias. Para el mismo diámetro de perforación, al aumentar la tasa de perforación, la frecuencia de resonancia, donde la absorción es máxima, se desplaza hacia altas frecuencias. Los resultados obtenidos son coherentes con los obtenidos en el trabajo [Atalla et al., 2001].

El sistema tejido–RPU perforado modifica e incrementa significativamente el coeficiente de absorción acústica a frecuencias cercanas a 2000 Hz, en comparación con el sistema RPU sin perforar. Los resultados experimentales evidencian que la absorción acústica depende ligeramente del tipo de tejido textil utilizado. Resultados similares se pueden encontrar en el trabajo de [Segura-Alcaraz et al., 2017]. Además, se ha aplicado un modelo teórico y un método numérico que presentan buena concordancia con los resultados experimentales. Como conclusión, se ha podido observar que los tejidos textiles pueden mejorar las prestaciones acústicas de materiales fibrosos y porosos. El sistema membrana–espuma ofrece amplias posibilidades que permiten disponer de absorción selectiva.

Referencias

- [Yang et al., 2012] Yang W, Dong Q, Liu S, Xie H, Liu L, Li J. Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *Procedia Environ Sci*, 2012;16:167–175. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.023>.
- [Del Rey et al., 2012] Del Rey R, Alba J, Arenas J, Sanchis VJ. An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Appl Acoust*, 2012; 73:604–609. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.009>.
- [Delany & Bazley, 1970] Delany ME, Bazley EN. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl Acoust*, 1970;3(2):105–116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9).
- [Voronina, 1994] Voronina N. Acoustical properties of fibrous materials. *Appl Acoust*, 1994;42:165–174. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0003-682X(94)90005-1).
- [Gama et al., 2017] Gama N, Silva R, Carvalho A, Ferreira A, Barros–Timmons A. Sound absorption properties of polyurethane foams derived from crude glycerol and liquefied coffee grounds polyol. *Polym Test*, 2017; 62:13–22. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.05.042>.
- [Zhang et al., 2012] Zhang CH, Li JQ, Hu Z, Zhu FL, Huang YD. Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: effect of interconnected porosity. *Materials and Design*, 2012;41:319–325. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.031>.
- [Tiuc et al., 2013] Tiuc AE, Rusu T, Vasile O. The influence of perforations on the surface of a sound absorbing material on the sound absorption coefficient. *Romanian J Acoust Vib*, 2013;10:59–62. ISSN 1584–7284.
- [Chevillotte, 2012] Chevillotte F. Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Appl Acoust*, 2012;73(1):56–60. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.07.005>.
- [Lou et al., 2015] Lou CW, Huang SY, Huang CH, Pan YJ, Yan R, Hsieh CT, Lin JH. Effects of structure design on resilience and acoustic absorption properties of porous flexible-foam based perforated composites. *Fibers Polym*, 2015;16(12):2652–2662. <https://doi.org/10.1007/s12221-015-5164-6>.
- [Lin et al., 2016] Lin JH, Chuang YC, Li TT, Huang CH, Huang CL, Chen YS, Lou CW. Effects of perforation on rigid PU foam plates: acoustic and mechanical properties. *Materials*, 2016;9(12):1000. <https://doi.org/10.3390/ma9121000>.
- [Xia et al., 2017] Xia X, Zhang Z, Zhao W, Li C, Ding J, Liu C, Liu Y. Acoustic properties of closed-cell aluminum foams with different macrostructures. *J Mater Sci Technol*, 2017;33(11):1227–1234. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.07.012>.

[Ekici et al., 2012] Ekici B, Kentli A, Küçük H. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. *Arch Acoust*, 2012;37(4):515–520. <https://doi.org/10.2478/v10168-012-0052-1>.

[Del Rey et al., 2014] Del Rey R, Alba J, Llopis A, Guillén I. Aplicación de nanopapel para la mejora de prestaciones acústicas. 45º Congreso español de acústica (2014), 8º Congreso ibérico de acústica – European symposium on smart cities and environmental acoustics.

[Chen & Jiang, 2016] Chen S, Jiang Y. The acoustic property study of polyurethane foam with addition of bamboo leaves particles. *Polym Compos*, 2016;39(4):1370–1381. <https://doi.org/10.1002/pc.24078>.

[Segura–Alcaraz et al., 2017] Segura–Alcaraz MP, Bonet–Aracil MÁ, Segura–Alcaraz JG, Montava–Seguí I. Sound absorption of textile material using a microfibras resistive layer. *IOP Conf. Ser: Mater Sci Eng*, 2017;254:072022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/254/7/072022>.

[Hajizadeh et al., 2019] Hajizadeh R, Khavanin A, Barmar M, Jonidi–Jafari A, Farhang–Dehghan S. Improving the sound absorption properties of flexible polyurethane (PU) foam using nanofibers and nanoparticles. *Sound Vib*, 2019;53:207–222. <https://doi.org/10.32604/sv.2019.06523>.

[Jayabal & Natarajan, 2011] Jayabal S, Natarajan U. Drilling analysis of coir-fibre-reinforced polyester composites. *B Mater Sci*, 2011;34(7):1563–1567. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y>.

[Radovanović & Dašić, 2006] Radovanović M, Dašić P. Research on surface roughness by laser cut. *The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați*, Fascicle VIII: ISSN 1221–4590 Tribology, 2006;12:84–88.

[Allard & Atalla, 2009] Allard JF, Atalla N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. Wiley, Chichester, 2009.

[Pieren & Heutschi, 2015] Pieren R, Heutschi K. Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method. *Appl Acoust*, 2015;92:27–41. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.003>.

[Prasetyo et al., 2020] Prasetyo I, Muqowi E, Putra A, Novenbrianty M, Desendra G, Adhika DR. Modelling sound absorption of tunable double layer woven fabrics. *Appl Acoust*, 2020;157:107008. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107008>.

[Atalla et al., 2001] Atalla N, Panneton R, Sgard FC, Olny X. Acoustic absorption of macro-perforated porous materials. *J Sound Vib*, 2001;243(4):659–678. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3435>.

Capítulo 6. Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles

[Tiuc et al., 2016] Tiuc AE, Vermeşan H, Gabor T, Vasile O. Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste. *Energy Procedia*, 2016;85:559–565. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.245>.

[Verdejo et al., 2009] Verdejo R, Stämpfli R, Alvarez-Lainez M, Mourad S, Rodriguez-Perez MA, Brühwiler PA, Shaffer M. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Compos Sci Technol*, 2009;69:1564–9. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.07.003>.

Capítulo 7

Tejidos textiles plegados

Registro bibliográfico

- **Autores (p. o. de firma).** R. Atiénzar–Navarro, R. Picó, R. del Rey, M. Bonet–Aracil and E. Bou–Belda.
- **Título.** Influence of fabric folding geometry on the sound absorption.
- **Revista.** *Journal of Natural Fibers*.
- **Fecha.** 2021.

En este capítulo se analizan las propiedades acústicas de tejidos textiles plegados. El proceso de plegado consiste en obtener múltiples pliegues de un tejido plano. En general, los pliegues se pueden realizar con cualquier tipo de tela y se pueden adaptar, de manera sencilla, a un diseño específico. Este estudio se centra en investigar el efecto de la geometría del tejido plegado en la absorción acústica de la muestra. Para la caracterización acústica de estas nuevas soluciones basadas en textiles se consideran dos métodos diferentes: el tubo de impedancia para medir el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal y la cámara reverberante de tamaño reducido a fin de medir el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria. Los contenidos de este capítulo están organizados en cinco secciones. En la Sección 7.1 se presenta una introducción sobre los antecedentes

del pliegue de tejidos. En la Sección 7.2 se detallan los materiales y métodos utilizados en este estudio. En la Sección 7.3 se presentan los resultados experimentales, así como la aplicación de los modelos de membrana utilizados. Por último, la Sección 7.5 recoge las conclusiones más relevantes de este trabajo. Para mayor detalle se remite al lector al Anexo A.4.

7.1 Introducción

Los tejidos textiles utilizados con fines acústicos son delgados en comparación con la longitud de onda, dentro del margen de frecuencias habitual. Por tanto, éstos se pueden modelar como una membrana permeable [Pierce, 1981; Sakagami et al., 1990; Moholkar et al., 2003; Pieren, 2012; Sakagami et al., 2014], que es un oscilador con dos grados de libertad.

Debido a su flexibilidad mecánica, los tejidos se utilizan generalmente en forma de plegado como, por ejemplo, las cortinas, que pueden plegarse de distintas maneras y pueden actuar como estructuras absorbentes, reduciendo los ecos y disminuyendo el tiempo de reverberación de los recintos [Hanna & Kandil, 1991; Demiryürek & Aydemir, 2016]. El proceso de plegado consiste en obtener múltiples pliegues de un tejido plano. Éstos se pueden obtener a partir de diferentes telas y se pueden ajustar a cualquier tipo de diseño.

En las últimas décadas se han utilizado distintas técnicas de plegado para crear estructuras textiles en 3D [Knittel et al., 2015] con la posibilidad de mejorar la absorción acústica de los tejidos [Pirn, 1992; Del Rey et al., 2013]. Pirn, R. estudia en [Pirn, 1992] las propiedades físicas y acústicas de tres salas equipadas con cortinas retráctiles para observar cómo se modificaba la acústica de la sala. Del Rey et al. investiga en [Del Rey et al., 2013] la absorción acústica de diferentes cortinas ensayadas en cámara reverberante, con diferentes

cavidades de aire y vuelos. Recientemente, con la finalidad de predecir el comportamiento acústico de cortinas plegadas y no plegadas en cámara reverberante, Pieren et al. [Pieren et al., 2016] ampliaron los modelos presentados en [Pieren & Heutschi, 2015]. En estos nuevos modelos se consideraron los efectos de la difracción de borde en la muestra textil [Thomasson, 1980] y la intensidad del sonido no uniforme [Jeong, 2010]. El plegado también es utilizado como una técnica para el diseño de barreras acústicas, que están basadas en el plegado de origami [Yu et al., 2018].

El objetivo de este trabajo se centra en evaluar cuantitativamente el efecto de la geometría del tejido plegado sobre la absorción acústica. Para ello, se consideran dos métodos diferentes a fin de caracterizar acústicamente el material textil sujeto a ensayo: el tubo de impedancia y la cámara reverberante de tamaño reducido.

7.2 Materiales y métodos

En esta sección se describe la fibra natural utilizada para este estudio. Además, se detalla todo el proceso de preparación de los tejidos plegados. Por último, se presenta un modelo para evaluar la absorción acústica en incidencia aleatoria para tejidos con y sin pliegues. El plegado del material textil se describe mediante tres parámetros geométricos, tales como la altura de plegado, la distancia entre pliegues consecutivos y la distancia media correspondiente a la distancia entre el centro de la muestra plegada y la superficie reflectante.

7.2.1 Tejido de algodón

El tejido textil utilizado está compuesto por fibras celulósicas (60 algodón/40 lino). El textil se tejió con un ligamento de sarga¹ 2x2 (véase el esquema 3D de la Figura 7.1) presentando una densidad de urdimbre de 35 hilos/cm, una densidad de trama de 20 hilos/cm, una densidad superficial de $210 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, una densidad de fibra de $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ y un diámetro de fibra de $30 \text{ }\mu\text{m}$. El tejido fue blanqueado química y ópticamente en un proceso industrial (véase la Figura 7.2). El textil tiene una sección de Jacquard que usa un logotipo como patrón de tejido.

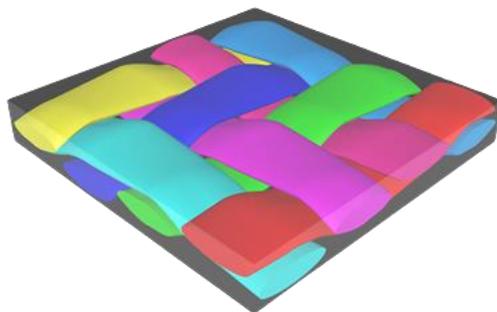


Figura 7.1. Vista tridimensional del tejido de sarga creado con el software TexGen².

¹ La sarga es una técnica de tejido conocida también por el nombre de tejido en diagonal ya que presenta como característica, que los puntos de ligadura se trasladan, por cada pasada de trama, un espacio hacia un lado, generando líneas diagonales.

² TexGen es un software de código abierto desarrollado por la Universidad de Nottingham para modelar estructuras textiles simples y tejidas.

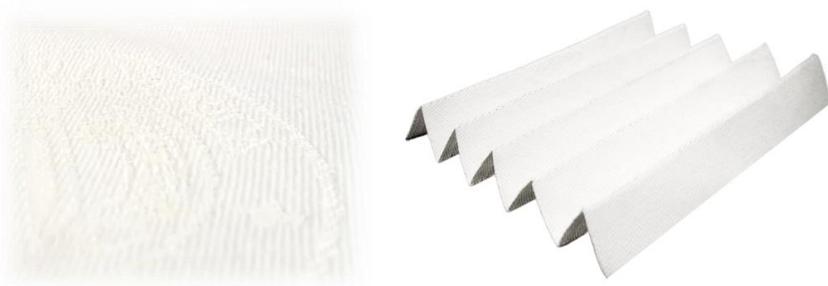


Figura 7.2. Diferentes muestras de algodón bajo estudio. En la izquierda se muestra una configuración no plegada y a la derecha una plegada.

Las Figuras 7.3 y 7.4 muestran imágenes de microscopía FESEM sobre la estructura y la sección transversal del tejido textil utilizado, respectivamente. Estas micrografías son de gran utilidad para obtener buenas aproximaciones de la densidad volumétrica de las fibras [Kostajnshek & Dimitrovski, 2013; Lei et al., 2020]. El método consiste en medir el diámetro de la fibra y la longitud de las fibras individuales estimando su masa, con la finalidad de obtener la masa por unidad de volumen.

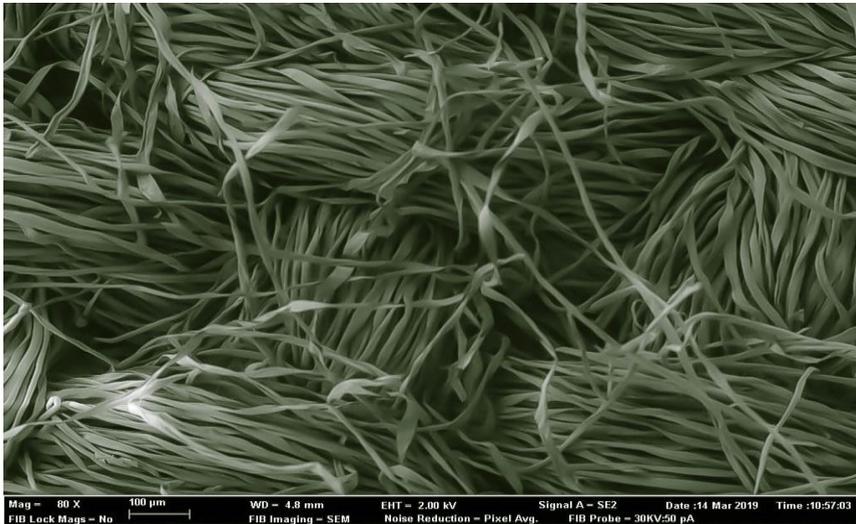


Figura 7.3. Imagen de microscopía electrónica de la estructura de la fibra textil.



Figura 7.4. Imagen de microscopía electrónica de la sección transversal de la fibra textil.

7.2.2 Técnica de plegamiento

Hay diferentes maneras de plegar un textil, dependiendo de la forma y el tamaño del pliegue. En cuanto a la geometría, los diseños más comunes son el pliegue ondulado y el pliegue en S. Para el diseño del tejido plegado se propuso realizar un modelo geométrico simple con el fin de dividir el tejido plano, de espesor t , en n pliegues idénticos periódicos. En la Figura 7.5 se muestra un esquema de un tejido con $n = 5$ pliegues.

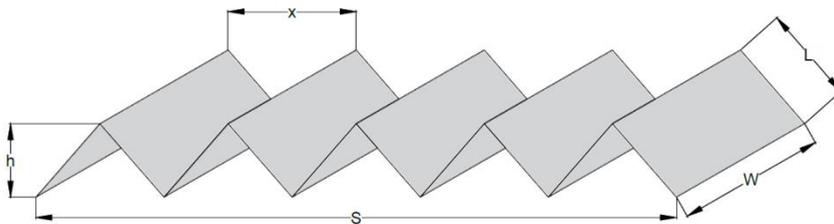


Figura 7.5. Parámetros de diseño para tejidos plegados. S es la longitud del tejido plegado; L es la longitud del pliegue; h es la altura del pliegue; x es la distancia entre pliegues consecutivos; w es la anchura del tejido plegado.

Por tanto, los pliegues del tejido, de anchura w , pueden definirse de manera única mediante un par de estos parámetros: la longitud del pliegue L , la altura del pliegue h , la distancia entre pliegues consecutivos x , la longitud del tejido S_i , la longitud del tejido plegado S y el número de pliegues n , de la siguiente manera,

$$h = \frac{1}{2n} \sqrt{S_i^2 - S^2} \quad , \quad (7.1)$$

$$L = \frac{S_i}{2n} \quad , \quad (7.2)$$

$$x = \frac{S}{n} \quad . \quad (7.3)$$

En este estudio, se caracterizaron doce muestras plegadas combinando diferentes parámetros geométricos, como se muestra en la Tabla 7.1.

Configuración	n	h(cm)	x(cm)	N(%)
T0	0	0	–	–
T1	5	1.4	0.8	98.3
T2	10	0.7	0.4	96.5
T3	15	0.5	0.3	95.2
T4	5	1.9	0.8	98.3
T5	10	0.9	0.4	96.4
T6	15	0.7	0.3	95.6
T7	20	0.6	0.2	94.6
T8	10	3.0	6.0	95.3
T9	20	1.5	3.0	91.0
T10	20	3.0	3.0	92.5

Tabla 7.1. Parámetros geométricos de los tejidos: n es el número de pliegues; h es la altura del pliegue; x es la distancia entre pliegues consecutivos; N es el factor de plegado.

El factor de plegado (N) se define como:

$$N(\%) = 1 - \frac{V_f}{V_t} \quad (7.4)$$

donde V_f es el volumen del tejido plegado correspondiente al volumen de un elipsoide ($(4\pi \cdot a \cdot b \cdot c)/3$), siendo a , b y c las longitudes de los semiejes del elipsoide respecto de los ejes x , y , z , respectivamente y V_t es el volumen del tejido no plegado que corresponde al volumen de un cilindro ($\pi \cdot r^2 \cdot h$), siendo h la altura del tejido plegado y r el radio de la muestra plegada.

Tal y como se muestra en la Tabla 7.1, la primera muestra, T0, corresponde con el tejido textil no plegado (plano). Solo se han considerado muestras de tejidos plegados con pliegues idénticos, distribuidos periódicamente. Todas las muestras a ensayo fueron diseñadas con una estructura rectangular, además presentan la misma orientación de urdimbre/trama y un espesor $t = 1.00 \pm 0.01$ mm.

En la Figura 7.6 se muestra el procedimiento seguido para introducir el tejido plegado en el tubo de impedancia, descrito en la Sección 3.1 del Capítulo 3-Métodos experimentales. Antes de introducir la muestra en el interior del tubo de impedancia, los tejidos textiles son plegados a partir de un tejido plano rectangular (tela desplegada), de acuerdo con los parámetros geométricos correspondientes. A continuación, las muestras son cortadas en forma elíptica y, posteriormente, se pliegan de acuerdo con el patrón de diseño especificado (véase la Figura 7.6a). Como resultado del plegado, el tejido se convierte en un material de espesor h y forma circular, con el mismo diámetro que el del tubo de impedancia, $D_i = 4$ cm (véase la Figura 7.6b). Finalmente, para completar el proceso, la muestra debe ajustarse perfectamente al porta-muestras sin aplicar ninguna compresión (véase la Figura 7.6c).

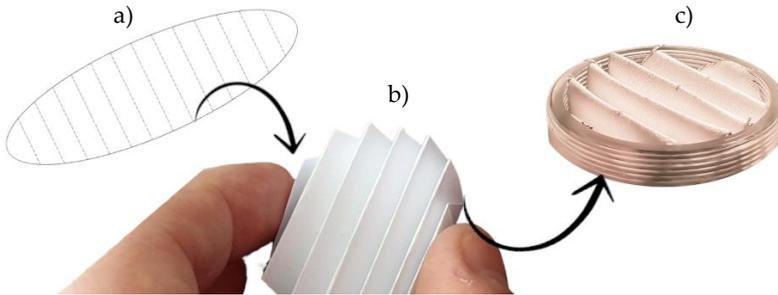


Figura 7.6. Procedimiento para introducir el textil plegado en el porta-muestras. a) El tejido se corta en forma elíptica; b) La muestra textil se pliega al patrón de diseño deseado; c) La muestra plegada se ajusta perfectamente al porta-muestras.

7.2.3 Campo difuso. Coeficiente de absorción acústica

A partir del método de medición especificado en la norma ISO 354:2004 [ISO 354:2004], se aborda el cálculo del coeficiente de absorción acústica (α) en cámara reverberante, para el caso general de membrana permeable. Para el cálculo de α se considera la impedancia acústica de la membrana permeable, Z_{mem} , descrita en la Sección 2.3 del Capítulo 2-Modelos y métodos y la impedancia acústica de la cavidad de aire, Z_{ac} , descrita en la Sección 2.4 del Capítulo 2-Modelos y métodos.

Tal y como se mostró en la Figura 2.8 de la Sección 2.4 del Capítulo 2-Modelos y métodos, la membrana permeable se monta en un porta-muestras formando una cavidad de aire entre la membrana y la superficie totalmente reflectante.

El coeficiente de absorción acústica, α , es utilizado en esta Tesis para caracterizar acústicamente membranas delgadas en campo sonoro difuso, y se define según varios autores [Thomasson, 1980; Jeong, 2010; Pieren et al., 2016] de la siguiente manera:

$$\alpha(\theta) = \frac{8 \cdot \Re\{Z_{mem}\}}{Z_0} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{w(\theta) \cdot \sin(\theta)}{\left| \frac{Z_{mem}}{Z_0} + \frac{Z_{ac}}{Z_0} + \bar{Z}_r(\theta) \right|^2} d\theta \quad , \quad (7.5)$$

donde θ es el ángulo en radianes y \bar{Z}_r es el promedio de la impedancia de radiación de la muestra sujeta a ensayo sobre el ángulo azimutal, en el rango de 0 a 2π rad. Para el campo acústico resultante en cámara reverberante se considera una función de ponderación, $w(\theta)$, que tiene en cuenta la distribución de intensidad no uniforme a través de la membrana, y viene dada por la siguiente expresión:

$$w(\theta) = \begin{cases} 1.64 - 0.3 \cdot \theta - 0.47 \cdot \theta^2, & f \geq f_1 \text{ kHz} \\ 1, & f < f_1 \text{ kHz} \end{cases}, \quad (7.6)$$

donde f_1 es la frecuencia de corte de la cámara reverberante, en nuestro trabajo, $f_1 = 0.485$ kHz [Del Rey et al., 2017].

La Figura 7.7 muestra los valores de la función de ponderación, $w(\theta)$, con el fin de compensar la sobreestimación del coeficiente de absorción acústica medido [Jeong, 2010].

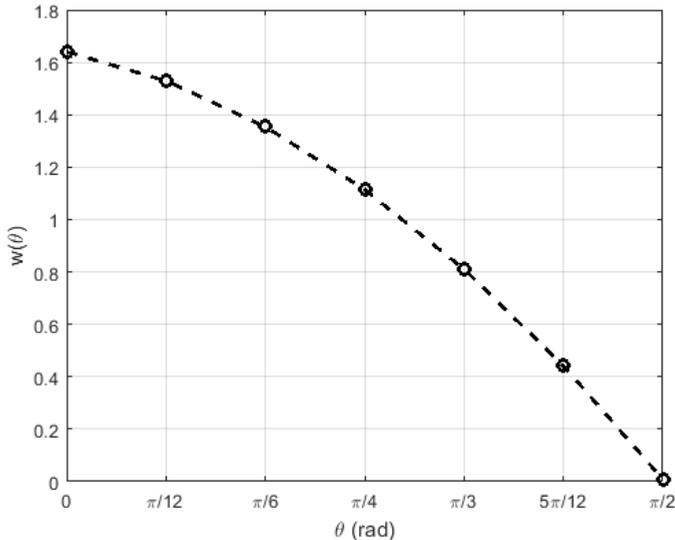


Figura 7.7. Valores de la función de ponderación $w(\theta)$ en ángulos de 0 a $\pi/2$ rad.

La impedancia de radiación, Z_r , depende tanto de la forma como del tamaño de la estructura absorbente, así como del ángulo azimutal,

ϕ , y del ángulo de incidencia, θ . De acuerdo con [Thomasson, 1980; Mechel, 2008; Jeong, 2010], si Z_r depende débilmente de ϕ , el promedio de la impedancia de radiación, \bar{Z}_r , es considerado en el cálculo del coeficiente de absorción acústica para membranas permeables, como

$$\bar{Z}_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} Z_r d\phi \quad , \quad (7.7)$$

donde Z_r es la impedancia de radiación (impedancia de campo) de la superficie.

Considerando la parte de la energía incidente que se refleja desde la superficie de la muestra, la relación entre la presión sonora y la componente normal de la velocidad de la partícula viene dada por Z_r en la ecuación (7.8). Asumiendo que la muestra de ensayo es infinita, la onda reflejada puede considerarse como una onda plana.

$$Z_r = \frac{p}{u_n} \rightarrow \frac{p}{u \cdot \cos(\theta)} = \frac{Z_0}{\cos(\theta)} \quad . \quad (7.8)$$

7.2.4 Absorción acústica de membranas permeables plegadas

En la Sección 7.2.3 se ha presentado un modelo para predecir el coeficiente de absorción acústica en campo sonoro difuso de membranas permeables delgadas, colocadas en el interior de la cámara reverberante. Este modelo semiempírico se extendió para tejidos plegados en [Pieren et al., 2016] con la finalidad de predecir el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria, α , de cortinas de bajo gramaje, plegadas y colocadas en una cámara reverberante, utilizando diferentes cavidades de aire. En este caso particular, el grado de plegamiento de las cortinas afecta al coeficiente de absorción acústica, porque la distancia entre el textil plegado y la superficie reflectante varía significativamente.

Por tanto, se considera aquí la configuración que se muestra en la Figura 7.8. Las variables para describir geoméricamente los tejidos plegados son la altura de plegado h , la distancia entre pliegues consecutivos x y la distancia media \bar{r} correspondiente a la distancia entre el centro de la muestra y la superficie reflectante. Se utiliza la distancia media \bar{r} porque la distancia a la muestra textil no es única, ya que no es un tejido plano. En la Figura 7.9 se muestra la configuración T8 de la Tabla 7.1, y su colocación en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido, cuyas características fueron detalladas en la Sección 3.2 del Capítulo 3-Métodos experimentales.

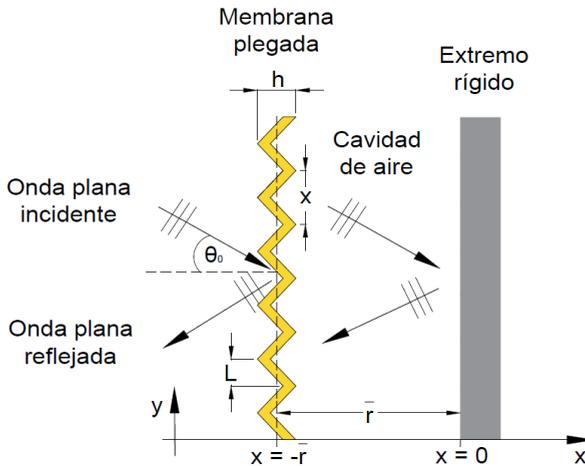


Figura 7.8. Configuración del sistema membrana permeable plegada-cavidad de aire. \bar{r} es la distancia promedio entre la superficie reflectante y el tejido plegado; x es la distancia entre dos pliegues consecutivos; L es la longitud del pliegue; h es la altura del pliegue; θ_0 es el ángulo de incidencia.

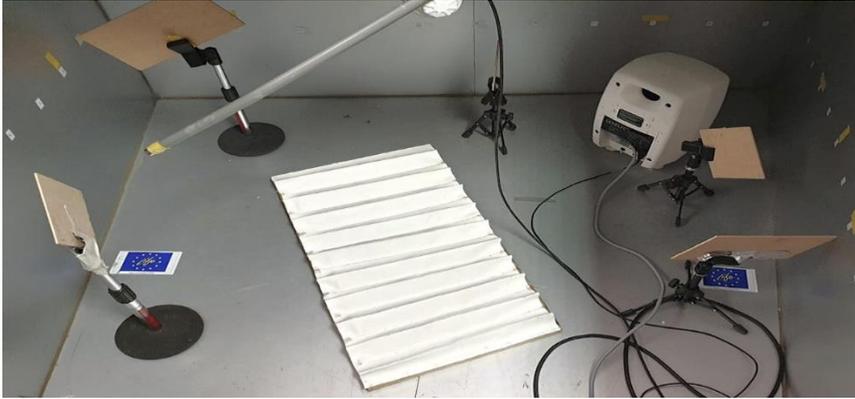


Figura 7.9. Detalle del interior de la cámara reverberante de tamaño reducido durante el ensayo de un material textil plegado (configuración T8). La muestra está colocada sobre un soporte de madera de 2 cm de altura. Las medidas fueron realizadas a una temperatura $T = 21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y con una humedad relativa de $HR = 56 \pm 5\%$.

Se ha considerado oportuno utilizar un modelo simplificado [Pieren et al., 2016] a fin de evaluar cuantitativamente el efecto de la geometría del tejido plegado sobre la absorción acústica y, para ello, se han asumido las siguientes hipótesis:

- 1) La distancia entre dos pliegues consecutivos se asume que es la misma en toda la estructura plegada.
- 2) La cavidad de aire influye directamente en el coeficiente de absorción acústica. El plegado supone una variación desigual de la profundidad de la cavidad de aire a lo largo de la muestra. Con objeto de tener en cuenta este efecto, se considera el coeficiente de absorción acústica de la muestra, $\bar{\alpha}$, como la siguiente media aritmética:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_s(r = \bar{r}-h/2) + \alpha_s(r = \bar{r}+h/2)}{2} , \quad (7.9)$$

donde $\bar{r} - h/2$ y $\bar{r} + h/2$ corresponden con las distancias máximas y mínimas de la cavidad de aire, respectivamente.

- 3) En el modelo de predicción, las reflexiones y transmisiones múltiples de la onda sonora incidente en las muestras plegadas solo ocurren para longitudes de onda inferiores a la quinta

parte de la altura del pliegue ($\lambda_c \approx h/5$) [Pieren et al., 2016]. Este efecto, que juega un papel importante en altas frecuencias con incidencia rasante ($\theta = \pi/2$ rad), es considerado en el modelo a partir de una función ξ dependiente de la frecuencia y de la geometría (altura del pliegue y distancia entre pliegues), como

$$\xi(f, h, x) = \begin{cases} 0.5, & \text{si } f > f_c = c_0/h \text{ y } h > x/2. \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (7.10)$$

Según las hipótesis dos y tres, el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria de los tejidos textiles plegados, α_s , puede expresarse de la siguiente manera,

$$\alpha_s = \bar{\alpha} + \xi \cdot (1 - \bar{\alpha}) \cdot \bar{\alpha} \quad , \quad (7.11)$$

donde $(1 - \bar{\alpha})$ determina la porción de energía sonora que no es absorbida por una sola capa de tejido.

7.3 Resultados experimentales y validación de los modelos de membrana propuestos

El coeficiente de absorción acústica en incidencia normal fue medido experimentalmente para las configuraciones T0–T7, presentadas en la Tabla 7.1. Tal y como se muestra en la Figura 7.10, la absorción acústica aumenta cuando disminuye el número de pliegues y aumenta la altura de plegado. En las Figuras 7.10a y 7.10b se analiza la influencia del plegado en la absorción acústica para $S_i = 15$ cm y $S_i = 20$ cm, respectivamente. Como se puede apreciar en ambas figuras, de 1000 Hz a 3150 Hz, se produce un aumento de la absorción acústica en todas las muestras plegadas, comparadas con la muestra no plegada T0. La máxima diferencia en el coeficiente de absorción

acústica entre muestras plegadas y no plegadas se produce cuando se utilizan tejidos plegados con un bajo número de pliegues. Este comportamiento se ha observado en todas las configuraciones analizadas. El factor de plegado N está directamente relacionado con el número de pliegues. A mayor número de pliegues, el factor de plegado se reduce de manera gradual, cosa que provoca una disminución de la absorción acústica en incidencia normal en medias y altas frecuencias.

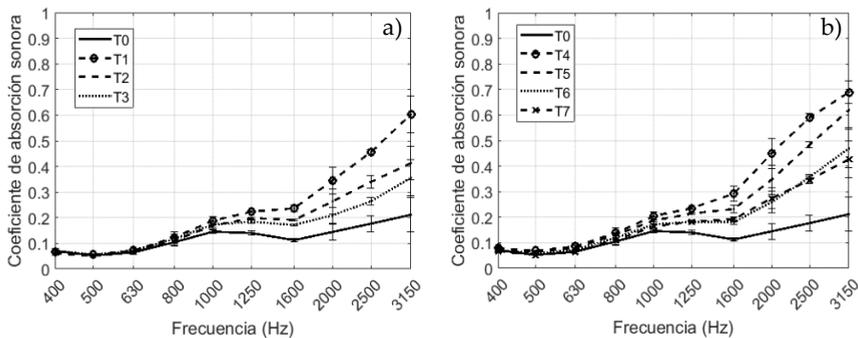


Figura 7.10. Coeficiente de absorción acústica en incidencia normal de tejidos textiles plegados con un número de pliegues distinto. a) $S_i = 15$ cm: T0($n=0$), T1($n=5$), T2($n=10$), T3($n=15$); b) $S_i = 20$ cm: T0($n=0$), T4 ($n=5$), T5($n=10$), T6($n=15$), T7($n=20$).

En la Figura 7.11 se compara el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria, que fue obtenido experimentalmente en una cámara reverberante de tamaño reducido, para las configuraciones T0, T8, T9 y T10 descritas en la Tabla 7.1. Estos tejidos se colocaron sobre un marco rectangular de madera de tamaño $60 \times 40 \times 2$ cm dentro de la cámara reverberante. Las mediciones de α se obtuvieron a partir de la diferencia entre los tiempos de reverberación de la cámara con y sin muestra. La variación que se produce en la estimación del tiempo de reverberación, entre ambos métodos (Sabine y Eyring), modifica el valor de la absorción acústica promedio. En condiciones de campo sonoro difuso se puede observar el mismo comportamiento que el mostrado para el caso de incidencia normal,

donde se produce un aumento en el coeficiente de absorción acústica para todas las muestras plegadas, a partir de 1000 Hz. El plegado contribuye al incremento de la absorción acústica con respecto al caso no plegado. En condiciones de campo sonoro difuso, las ondas con incidencia oblicua experimentan mayores pérdidas debido a que las ondas sonoras pasan a través del tejido plegado múltiples veces, tal y como se ha descrito en la Sección 7.2.4. La mayor diferencia en absorción acústica debido a los pliegues se produce a la frecuencia de 2500 Hz. Las caídas y subidas observadas en el coeficiente de absorción acústica se producen por las interferencias de múltiples ondas reflejadas dentro de la cavidad de aire. De esta forma, la longitud de onda correspondiente a la frecuencia para la que se observan mínimos (máximos) corresponde con la interferencia destructiva (constructiva) y depende del espesor de la cavidad de aire. No se observan diferencias significativas debido al pliegue de tejidos para frecuencias por debajo de 800 Hz ni para frecuencias por encima de 4000 Hz. Tampoco se aprecian diferencias entre los tejidos plegados T8, T9 y T10, por tanto, no se puede discernir el efecto de la geometría del pliegue del tejido sobre la absorción acústica en condiciones de campo difuso.

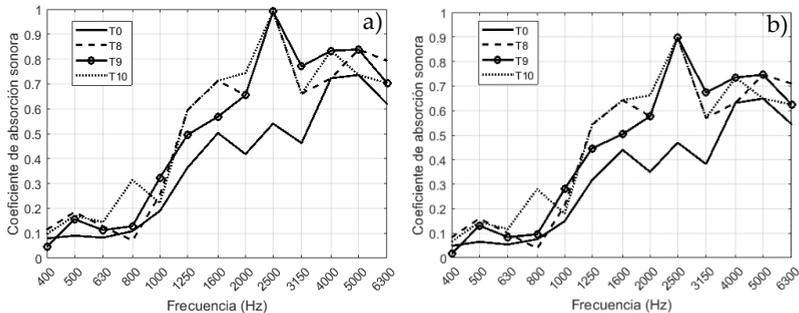


Figura 7.11. Coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria obtenido en la cámara reverberante de tamaño reducido y utilizando una cavidad de aire de 2 cm. a) Método de Sabine; b) Método de Eyring.

En la Figura 7.12, se comparan los valores del coeficiente de absorción acústica medidos y predichos, en cámara reverberante, para tejidos plegados y no plegados. En la Figura 7.12a se hace uso del

modelo de membrana sin pliegues, descrito en la Sección 2.3 y 2.4 del Capítulo 2-Modelos y métodos, y de las expresiones para el cálculo del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, detalladas en la Sección 7.2.3. En la Figura 7.12b se utiliza el modelo de membrana plegada, descrito en la Sección 7.2.3. Como se puede apreciar, se logra una buena concordancia entre los resultados medidos y calculados en el margen frecuencial de 400 Hz a 6300 Hz. Además, la frecuencia de resonancia, para la cual la absorción es máxima, se predice de manera correcta por el modelo, en todas las configuraciones analizadas. Las diferencias entre los valores predichos y medidos van aumentando de manera gradual a medida que aumenta la frecuencia. La razón de esta discrepancia entre los valores medidos y predichos se puede explicar a partir de las aproximaciones del modelo teórico [Pieren & Heutschi, 2015; Pieren et al. 2016]. La primera hipótesis se basa en el supuesto de que la distribución de intensidad es uniforme en la muestra [Jeong, 2010]. Aunque el campo acústico es muy difuso, no es perfecto durante la medición. Esto provoca una subestimación de los valores de absorción acústica medidos a altas frecuencias. La segunda hipótesis se centra en la inexactitud en el procedimiento experimental, como el corte de las muestras, la precisión del plegado, la homogeneidad del material u otros factores experimentales.

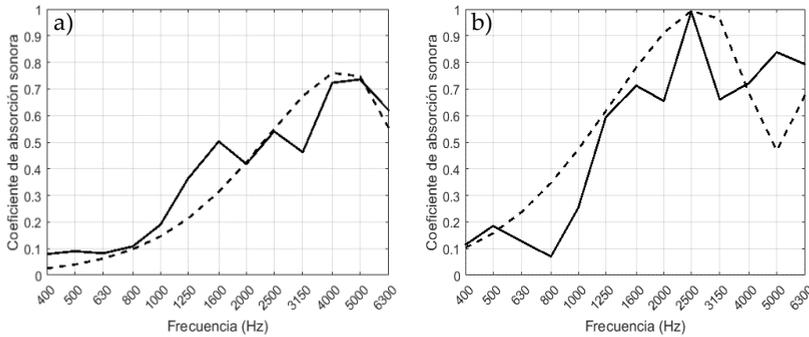


Figura 7.12. Coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria medido (línea continua) y predicho (línea discontinua) para las configuraciones de plegado y no plegado. a) Configuración T0 (no plegado); b) Configuración T8 (plegado).

7.4 Conclusiones

Por una parte, se ha medido el coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, en el margen frecuencial de 400 Hz a 3150 Hz, utilizando el tubo de impedancia y, por otra, se ha medido el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria, en el margen frecuencial de 400 Hz a 6300 Hz, utilizando la cámara reverberante de tamaño reducido, a fin de determinar la influencia de los parámetros geométricos del tejido plegado en la absorción acústica.

Se ha realizado un análisis comparativo de tejidos de algodón con diferente número de pliegues. Para ambos métodos utilizados, el pliegue de tejidos textiles aumenta la absorción acústica a medias y altas frecuencias en comparación con el tejido no plegado, pero el efecto de plegado en la absorción acústica satura con un determinado número de pliegues en el rango de frecuencias de trabajo.

Los resultados experimentales fueron validados a partir de un modelo teórico que predice la absorción acústica en campo sonoro difuso de muestras plegadas y no plegadas, respaldadas con una cavidad de aire. El modelo se desarrolló bajo los supuestos de campo

sonoro difuso ideal en cámara reverberante de tamaño reducido, una distribución uniforme de las estructuras plegadas y considerando que las ondas sonoras atraviesan la estructura textil plegada múltiples veces. Como conclusión, se ha podido observar que el plegado de tejidos textiles permite controlar la absorción acústica de un material textil poco absorbente y así proporcionar diversas soluciones acústicas con el mismo material de base.

Referencias

[Pierce, 1981] Pierce AD. Acoustics: an introduction to its physical principles and applications. New York: McGraw–Hill Book Co; 1981.

[Sakagami et al., 1990] Sakagami K, Kiyama M, Morimoto M, Takahasi D. Detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane. *Appl Acoust*, 1998;54(2):93–111. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00085-6).

[Kang & Fuchs, 1999] Kang J, Fuchs HV. Predicting the absorption of open wave textiles and micro perforated membranes backed by an air space. *J Sound Vib*, 1999; 220(5):905–920. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1977>.

[Moholkar & Warmoeskerken, 2003] Moholkar VS, Warmoeskerken MMCG. Acoustical Characteristics of Textile Materials. *Text Res J*, 2003;73(9):827–837. <https://doi.org/10.1177/004051750307300914>.

[Pieren, 2012] Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text Res J*, 2012;82(9):864–874. <https://doi.org/10.1177/0040517511429604>.

[Sakagami et al., 2014] Sakagami K, Fukutani Y, Yairi M, Morimoto M. A theoretical study on the effect of a permeable membrane in the air cavity of a double-leaf microperforated panel space sound absorber. *Appl Acoust*, 2014;79:104–109. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.12.015>.

[Hanna & Kandil, 1991] Hanna YI, Kandil MM. Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Appl Acoust*, 1991;34(4):281–291. [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(91\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0003-682x(91)90011-3).

[Demiryürek & Aydemir, 2016] Demiryürek O, Aydemir H. Sound absorption properties of roller blind curtain fabrics. *J Ind Text*, 2016;44(1):3–19. <https://doi.org/10.1177/1528083716631332>.

Capítulo 7. Tejidos textiles plegados

[Knittel et al., 2015] Knittel C, Nicholas D, Street R, Schauer C, Dion G. Self-Folding Textiles through Manipulation of Knit Stitch Architecture. *Fibers*, 2015;3(4):575–587. <https://doi.org/10.3390/fib3040575>.

[Pirn, 1992] Pirn R. Some objective and subjective aspects of three acoustically variable halls. *Appl Acoust*, 1992;35(3):221–231. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(92\)90041-P](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(92)90041-P).

[Del Rey et al., 2013] Del Rey R, Alba J, Blanes M, Marco B. The acoustic absorption of textile curtains on the function of the fullness. *Mater Constr*, 2013;63(312):569–580. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.05512>.

[Pieren et al., 2016] Pieren R, Schäffer B, Schoenwald S, Eggenschwiler K. Sound absorption of textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Text Res J*, 2016;88(1):36–48. <https://doi.org/10.1177/0040517516673337>.

[Pieren & Heutschi, 2015] Pieren R, Heutschi K. Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method. *Appl Acoust*, 2015;92:27–41. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.003>.

[Thomasson, 1980] Thomasson S–I. On the absorption coefficient. *Acustica*, 1980;44(4):265–273.

[Jeong, 2010] Jeong C–H. Non-uniform sound intensity distributions when measuring absorption coefficients in reverberation chambers using a phased beam tracing. *J Acoust Soc Am*, 2010; 127(6):3560–3568. <https://doi.org/10.1121/1.3397475>.

[Yu et al., 2018] Yu X, Fang H, Cui F, Cheng L, Lu Z. Origami-inspired foldable sound barrier designs. *J Sound Vib*, 2018;442:514–526. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.025>.

[Kostajnsšek & Dimitrovski, 2013] Kostajnsšek K, Dimitrovski K. Multilayer cotton fabrics porosity and its influence on permeability properties. *Tekstilec*, 2013;56:335–344. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2013.56.335-344>.

[Lei et al., 2020] Lei M, Li Y, Liu Y, Ma Y, Cheng L, Hu Y. Effect of weaving structures on the water wicking-evaporating behavior of woven fabrics. *Polymers*, 2020;12:422–435. <https://doi.org/10.3390/polym12020422>.

[Del Rey et al., 2017] Del Rey R, Alba J, Bertó L, Gregori A. Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Mater Constr*, 2017;67(328):e139. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07316>.

[ISO 354, 2004] ISO 354. Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. TC: ISO/TC 43/SC 2, *Building acoustics*, ICS: 91.120.20, 2003.

[Mechel, 2008] Mechel FP. Formulas of acoustics. Springer–Verlag, Berlín, Heidelberg, New York, 2008.

Capítulo 8

Conclusiones generales

El objetivo principal de esta Tesis radica en el estudio, modelado y caracterización acústica de nuevas soluciones basadas en tejidos textiles. En este contexto, se han explorado múltiples mecanismos a partir de las modificaciones estructurales y funcionales de los tejidos, a fin de poder controlar sus propiedades acústicas. Para alcanzar este objetivo, se han considerado cuatro líneas de investigación basadas en nuevas soluciones propuestas para mejorar las prestaciones acústicas de tejidos sostenibles de bajo espesor.

El primer estudio se ha centrado en el análisis de la influencia de la longitud, la finura y la sección transversal sólida/hueca de distintas fibras sintéticas (acrílica y poliéster), con distintos gramajes, en su coeficiente de absorción acústica. Con este trabajo se ha buscado determinar la cantidad de fibra óptima para obtener un determinado valor de absorción acústica a partir de los parámetros de la fibra. Se ha observado que la finura y la sección transversal hueca/sólida de la fibra tenían una mayor influencia en el comportamiento acústico de

las muestras en comparación con la longitud de las fibras. Además, se ha comprobado que en las fibras de poliéster huecas se tiene el mismo efecto acústico que en las fibras de poliéster sólidas, pero utilizando un 50% menos de cantidad de fibra.

Una vez analizada la estructura y composición de las fibras, se ha considerado otra propuesta consistente en alterar las propiedades de los tejidos textiles convencionales mediante el dopaje con microcápsulas. Este segundo estudio se ha focalizado en analizar la influencia de las microcápsulas adheridas a los tejidos (tipo algodón) sobre la absorción acústica. Por una parte, se ha podido comprobar que el simple hecho de dopar un tejido no cambia la primera frecuencia de resonancia del sistema, pero sí que se ha observado un aumento de la absorción acústica a medias frecuencias. Este aspecto puede ser tratado de forma más profunda y amplia en futuros trabajos que permitan estudiarlo con más detalle. Por otra parte, se han analizado otros tejidos con diferentes características con respecto al algodón, y se ha podido apreciar que el dopaje tiene un efecto acústico distinto en función de la concentración de microcápsulas y el tipo de tejido base. Además, se ha utilizado un modelo de membrana con el objetivo de predecir el comportamiento acústico en incidencia normal de tejidos textiles dopados y respaldados por una cavidad de aire. Este trabajo ha supuesto un primer paso en la creación de soluciones funcionales basadas en el control y aumento de la absorción acústica mediante el uso de microcápsulas. Los resultados que se han presentado demuestran que es posible controlar la absorción acústica de tejidos que han sido dopados con distintas cantidades de microcápsulas.

Los tejidos textiles presentados en este trabajo, por ellos mismos, no presentan una absorción típica de un material absorbente acústico. Por tanto, el tercer estudio se ha encaminado a mejorar las prestaciones acústicas de tejidos textiles a partir de la adhesión de espumas de poliuretano recicladas y perforadas. Se ha demostrado que el sistema tejido–espuma perforada presenta una mejora

significativa en la absorción acústica a frecuencias cercanas a 2000 Hz, por tanto, para los tejidos textiles estudiados se ha evidenciado que pueden mejorar las aplicaciones acústicas de materiales porosos y fibrosos. Se ha comprobado que la absorción acústica depende ligeramente del tipo de tejido utilizado. Además, se ha convertido un material textil poco absorbente a una solución absorbente. Por tanto, el sistema tejido–espuma perforada ofrece amplias posibilidades para poder disponer de absorción selectiva. En este estudio, también se han aplicado modelos teóricos y métodos numéricos con la finalidad de predecir el coeficiente de absorción acústica del sistema tejido–espuma. Se ha demostrado una buena concordancia entre los resultados experimentales, teóricos y numéricos.

Por último, y a raíz del trabajo anterior, este cuarto estudio se ha centrado en investigar el efecto producido por la geometría de tejidos textiles plegados sobre la absorción acústica. Por una parte, se ha comprobado que el pliegue de tejidos tiene un efecto significativo en el coeficiente de absorción acústica, a medias y altas frecuencias, en comparación con tejidos sin pliegues. Además, se ha observado que el efecto del plegado sobre la absorción acústica satura con un determinado número de pliegues, en el margen de frecuencias de trabajo. Este aspecto puede ser tratado de forma más profunda y amplia en futuros trabajos. Se ha podido evidenciar como la absorción acústica, en incidencia normal, aumenta cuando disminuye el número de pliegues y aumenta la altura del plegado. Por otra parte, se ha utilizado un modelo teórico capaz de predecir la absorción acústica en campo difuso de muestras plegadas y no plegadas, respaldadas con una cavidad de aire. Los resultados obtenidos presentan gran concordancia con las medidas experimentales. Por tanto, con este trabajo se ha podido analizar como el plegado de los tejidos permite controlar la absorción acústica de un tejido poco absorbente, además de proporcionar distintas soluciones acústicas a partir de una misma base de material textil.

Capítulo 9

Futuras líneas de investigación

En este capítulo se recogen las futuras líneas de investigación fruto de este trabajo de Tesis. Las futuras líneas de trabajo siguen dirigidas hacia la modelización y caracterización acústica de nuevas soluciones basadas en textiles.

El control del ruido es de suma importancia en distintas aplicaciones de la ingeniería ambiental, tales como el transporte, el diseño arquitectónico, o incluso un centro de convenciones. Tradicionalmente, se ha propuesto el uso de tejidos de punto convencionales, como materiales fonoabsorbentes. Sin embargo, estos tejidos presentan una pobre absorción acústica en todo el margen frecuencial debido a su bajo espesor [Días & Monaragala, 2016].

En la última década, las telas espaciadoras de punto 3D han recibido una mayor atención por parte de los investigadores para aplicaciones acústicas debido a su alta rentabilidad y bajo costo e impacto ambiental. Además, estos materiales son suaves al tacto, voluminosos y muy porosos y, por tanto, se espera que sean

adecuados para aplicaciones acústicas. Estas nuevas telas presentan patrones especiales, de doble cara, unidas entre sí mediante hilos espaciadores (véase Figura 9.1a). Estos hilos espaciadores pueden ser verticales o inclinados a fin de conectar dos capas superficiales de tejido, de diferente espesor (véase el esquema de la Figura 9.2).

Los tejidos espaciadores desempeñan un papel cada vez más importante debido a la relación rigidez/peso, en comparación con otras soluciones acústicas. Dada esta importancia, las propiedades acústicas de este tipo de tejidos fueron experimental y analíticamente investigadas por primera vez por Dias & Monaragala en [Dias & Monaragala, 2006]. Los resultados mostraron que la estructura espaciadora, con tamaños de poro pequeños y porosidad reducida presentaba una absorción acústica menor a 0.15 en todo el rango de frecuencias, de 100 Hz a 4000 Hz. En 2010, Ozturk et al. [Ozturk et al., 2010] estudiaron las propiedades acústicas de diferentes diseños de tejidos espaciadores y mostraron que la absorción acústica dependía de la estructura de la malla espaciadora y de la densidad de la capa intermedia. En 2016, Zhi & Longa investigaron en [Zhi & Longa, 2016] los parámetros que influían en la absorción acústica de una espuma sintética reforzada con tela espaciadora, como la estructura de la superficie del tejido, el hilado del espaciador (fino o grueso), el ángulo de inclinación, la profundidad de la cavidad de aire y el diámetro de los hilos espaciadores. Recientemente, Abedkarimi et al. en [Abedkarimi et al., 2019] investigaron y predijeron los efectos de la estructura de la tela espaciadora 3D sobre la absorción acústica.

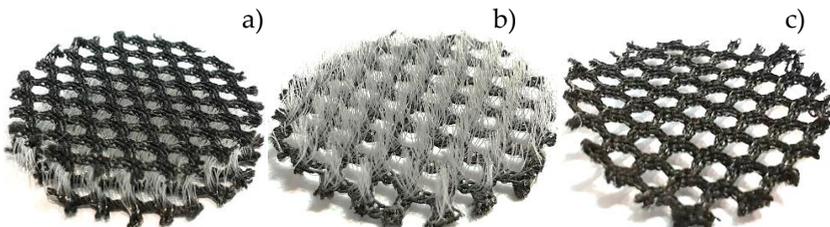


Figura 9.1. Muestra las tres configuraciones del tejido espaciador. a) Espaciador completo; b) Hilos espaciadores y una capa tejida (superior o inferior); c) Una sola capa tejida.

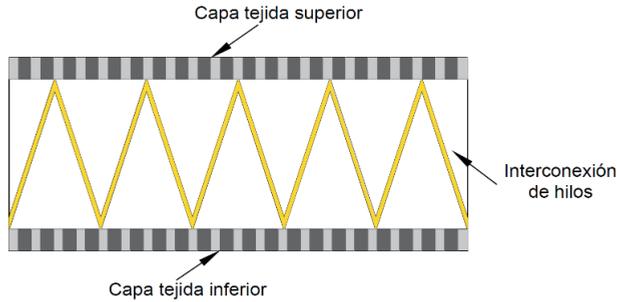


Figura 9.2. Esquema de un tejido espaciador formado por dos telas tejidas (capa superior e inferior) unidas por hilos inclinados (capa intermedia).

Por tanto, como trabajo futuro, se plantea estudiar las propiedades acústicas del tejido espaciador en tres fases [Allard & Atalla, 2009]: a) Espaciador completo (véase Figura 9.1a); b) Hilos espaciadores y una capa límite superior o inferior (véase Figura 9.1b); c) Capa tejida superior o inferior, con la distribución de orificios (véase Figura 9.1c).

Finalmente, en esta línea de investigación se propone modelar el tejido espaciador 3D mediante el uso del método de elementos finitos descrito en la Sección 2.5 del Capítulo 2-Modelos y métodos. Para ello, se considerará el efecto de la variación geométrica y la cantidad y orientación de los hilos espaciadores [Zhang et al., 2020]. Esta propuesta supone una mejora para predecir el comportamiento acústico de telas espaciadoras en la etapa de diseño.

Además del estudio basado en telas espaciadoras, se abren otras líneas de trabajo relacionadas con soluciones basadas en textiles. Durante el trabajo de Tesis se habla de la importancia de controlar las propiedades acústicas de los tejidos textiles a partir de modificaciones estructurales del mismo. Por tanto, se propone estudiar los parámetros acústicos óptimos (resistividad al flujo, porosidad, tortuosidad, longitud característica térmica y viscosa) del tejido plegado a fin de modelar su comportamiento acústico, cuando éste se encuentra respaldado por una cavidad de aire. Actualmente, ya se ha empezado a trabajar en esta línea de investigación prediciendo el efecto acústico de tejidos de algodón con un número de pliegues

distinto. No obstante, se requiere ampliar el número de materiales textiles y configuraciones para poder diseñar “a la carta” cualquier tejido y así poder obtener una absorción acústica determinada.

Otra línea en la que se empezó a trabajar se centra en el modelado 3D de un tejido textil (véase la Figura 9.3) [Green et al., 2014; Zenong et al., 2019]. Los tejidos textiles están hechos a partir de hilos entrelazados que constituyen el elemento básico de todo producto textil: las fibras. El trabajo que se propone consiste en investigar la influencia los parámetros geométricos del textil, tales como el número de hilos de trama y urdimbre, el diámetro y el espaciado de los hilos, entre otros factores, sobre la absorción acústica. El objetivo que se persigue es producir un tipo de tejido optimizado con buenas propiedades de absorción acústica a partir de parámetros básicos, como la densidad de urdimbre y trama, la densidad del hilo o el material de las fibras. Para el modelado se recomienda utilizar las simetrías/anti-simetrías de la geometría a fin de resolver los problemas de valor en la frontera que permitan calcular los parámetros de entrada del modelo JCA, como la porosidad, tortuosidad, longitud característica viscosa y térmica [Zieliński et al., 2020].

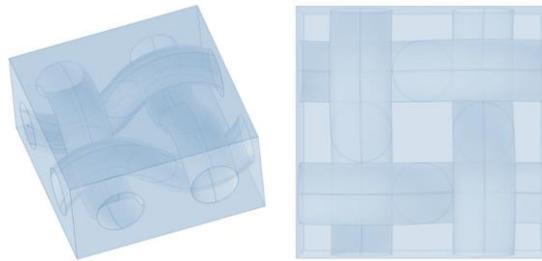


Figura 9.3. Diferentes vistas del modelo geométrico 3D del tejido textil.

Finalmente, se propone desarrollar una nueva teoría que pueda describir el comportamiento acústico de tejidos textiles dopados.

Este trabajo de Tesis ha permitido poner las bases de caracterización de nuevas soluciones basadas en tejidos. En este sentido, abre todo un abanico de posibilidades para caracterizar nuevas soluciones no solamente en el ámbito de la acústica, sino también en la búsqueda de soluciones textiles electromagnéticas, térmicas, o en otros muchos campos ya que la gran versatilidad de los tejidos, los proponen como candidatos idóneos para múltiples soluciones innovadoras y sostenibles.

Referencias

[Dias & Monaragala, 2006] Dias T, Monaragala R. Sound absorption in knitted structures for interior noise reduction in automobiles. *Meas Sci Tech*, 2006;17:2499–2505. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/9/018>.

[Ozturk et al., 2010] Ozturk M, Nergis B, Candan C. A study on the influence of fabric structure on sound absorption behavior of spacer knitted structures. *Proceedings of the 7th International Conference – TEXSCI 2010*, Czech Republic, September 2010, Liberec.

[Zhi & Longa, 2016] Zhi C, Longa H. Sound absorption properties of syntactic foam reinforced by warp-knitted spacer fabric. *Cell Polym*, 2016;35(5):271–286. <https://doi.org/10.1177/026248931603500503>.

[Allard & Atalla, 2009] Allard JF, Atalla N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2009. ISBN: 978-0-470-74661-5.

[Abedkarimi et al., 2019] Abedkarimi R, Hasani H, Soltani P, Talebi Z. Experimental and computational analysis of acoustic characteristics of warp-knitted spacer fabrics. *J Text Inst*, 2019;111(6). <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1648140>.

[Zhang et al., 2020] Zhang Y, Hu H, Kyosev Y, Liu Y. Finite element modelling of 3D spacer fabric: Effect of the geometric variation and amounts of spacer yarns. *Compos Struct*, 2020;236:111846. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111846>.

[Green et al., 2014] Green SD, Long AC, El Said BSF, Hallett SR. Numerical modelling of 3D woven preform deformations. *Compos Struct*, 2014;108:747-756. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.015>.

[Zenong et al., 2019] Zenong C, Xianhui L, Xiaoling G, Bin Z, Tuo X. Optimization of sound absorption performance of woven fabric. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Madrid, Spain, 16–19 June, 2019;2916–2923(8).

[Zieliński et al., 2020] Zieliński TG, Venegas R, Perrot C, Červenka M, Chevillotte F, Attenborough K. Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media. *J Sound Vib*, 2020;115441.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115441>.

Anexo A

Compendio de artículos

En este Anexo se recogen las publicaciones relacionadas con esta tesis doctoral. El Anexo [A.1](#) presenta la versión de autor del artículo que lleva por título “Influence of fineness, length and hollow section of fibers on the acoustical absorption”, relacionado con los contenidos descritos en el **Capítulo 4-Estructura de la fibra textil**. El Anexo [A.2](#) recoge la versión editorial del artículo titulado “Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules”. Este trabajo constituye una gran parte de los contenidos detallados en el **Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles**. El Anexo [A.3](#), la versión editorial del artículo “Sound absorption properties of perforated recycled polyurethane foams reinforced with woven fabric”, forma parte del tema tratado en el **Capítulo 6-Espuma perforada y reforzada con tejidos textiles**. El Anexo [A.4](#) recoge la versión de autor relacionada con los tejidos plegados del **Capítulo 7-Tejidos textiles plegados** y que lleva por título “Influence of fabric folding geometry on the sound absorption”. Finalmente, en el Anexo [A.5](#) y en el Anexo [A.6](#) se recogen las versiones editoriales de los artículos relacionados con el **Capítulo 5-Microcápsulas aplicadas a tejidos textiles**, tales como “Absorción acústica de nuevos tejidos textiles” y “Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules”, respectivamente.

Article

Influence of fineness, length and hollow section of fibres on the acoustic absorption

Abstract:

Fibrous materials are characterized by being relatively flexible and they are used to reduce noise in indoor rooms due to their porous structures. This study focuses on investigating the influence on the acoustic absorption of the macrostructural parameters of the different fibres used in fibrous acoustic materials. The sound absorption coefficient of fibre samples is measured at normal incidence in the impedance tube. The fibre parameters studied are fineness, length, fibre content and the type of cross sections (solid or hollow). Two different types of fibres (acrylic and polyester) were used. Different fibre content, i.e., 1.3 g, 3.2 g and 6.4 g for each fibre were used with a variable thickness.

Keywords: fibres; fineness; length; cross-section; sound absorption coefficient

1. Introduction

Fibres are raw materials that can be classified under different criteria such as the origin (natural, chemical) or their properties (conventional, technical). There are many definitions for fibre, but the most commonly accepted by the members of all sectors of fibre-based industries worldwide is the one offered by the Textile Institute [1]: fibres are units of matter characterized by flexibility, fineness and high ratio of length to thickness, and they are used for general textile purposes. The fibres properties can be analyzed according to the their macrostructure or their microstructure. The macrostructure is directly related to the geometric parameters of the fibre. The microstructure is related to the internal structure of the fibre and it studies how the atoms are bonded and the macromolecules are arranged into crystalline or amorphous structure.

Different parameters are directly related to the fibre macrostructure: fineness, thickness, crimp and cross-section [2]. The most important dimensional features to characterize fibres are length and fineness. The length depends on the fibre nature. Cotton fibres length are shorter than wool ones, whereas silk is the longest one among natural fibers, as it is a filament. However, chemical fibres can be as long as desired as they are generally produced as a filament (long length) and cut on the desired length. Fineness is defined as the ratio between fibre mass and fibre length and it is not easy to measure because the cross section of fibres can vary and show different shapes, as it can be seen in Figure 1. Before 1960, fineness was measured in μm , but since the International System (IS) adopted the linear mass, *tex* (g/km) is the valid unit for fibre and yarns fineness [3]. Regarding the fibres dimension, it is commonly used the *dtex*, that is, one tenth of a *tex*.

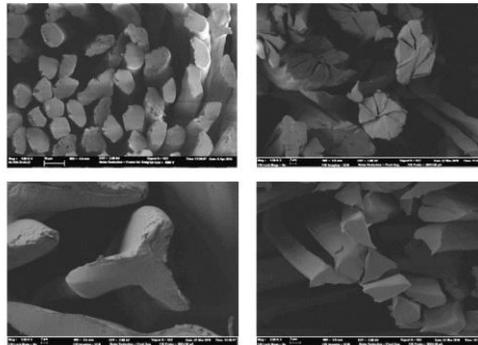


Figure 1. Electron microscopy images of the cross-section of different fibres.

Later in the 20th century, the consumption of fibres around the world rapidly increased due to their use in new application areas and technological advancements [4]. It is commonly accepted that a microfibre is considered when the fineness is below 1.1 *dtex* [5], equal to 1 denier. The denier is also a unit for measuring the linear mass density of fibres and it is defined as the mass in grams per 9000m of the fibre. It is commonly used in the textile industry to measure the fineness of

fibres. The physical and mechanical properties of fibres have been widely studied in the last decade [6–9].

Generally, fibres are used in the manufacture of textile fabrics, composites or thermal and acoustic isolation materials [10–12]. Several studies based on the acoustic properties of fibres have been reported due to their practical interest. The absorption properties of fibres may vary depending on the manufacturing method, the inhomogeneity of the fibre structure, the fibre macrostructure and the fibre configuration [13]. Aso and Kinoshita studied in [14] several parameters influencing the sound absorption characteristics of the fibre assembly as length, fineness, thickness, fibre orientation, porosity or elasticity of the constituent fibres. The homogeneity of the total fibre surface area determines equal absorption values, regardless of the length or fineness of the fibre. Shoshani and Rosenhouse determined in [15] that fibre content caused a small effect on the sound absorption coefficient at low frequencies, but a significant impact at high frequencies. Na et al. examined in [16] how the structure and geometric shape of microfibre affects on the sound absorption compared to regular fibres. The microfibrils absorb sound better than traditional fibres due to its higher surface area. Recently, Berardi and Iannace studied in [17] the sound-absorbing characteristics of different natural fibres and they used theoretical models to predict the acoustic behaviour of these fibres.

Although many studies have been consacrated to study specifically the acoustic behaviour of fibres, the influence of the specific characteristics of the fibre parametres on the sound absorption is not still well known. In this work, different fibres are arranged in samples in an unorganized way to assess the influence of length, fineness and the hollow section of the fibres on the acoustic absorption. For this purpose, the sound absorption coefficient of the samples is evaluated in the impedance tube.

2. Experimental investigation

2.1 Materials

A total of six different polyacrylonitrile fibres, three acrylic and three polyester fibres were analyzed. Table 1 shows the reference given to each sample, and the technical information including the description, the length in mm, the fineness in *dtex* and the composition. Acrylic fibre sample is labeled as A and polyester fibre sample is referenced as P.

Reference	Description	Length (mm)	Fineness (dtex)	Composition	Type of fibre
A1	Neochrome BR	63	3.3	Acrylic	Solid
A2	Neochrome MT	63	5.4	Acrylic	Solid
A3	Negro BR	37	5.4	Acrylic	Solid
P1	HCS	32	7.8	Polyester	Hollow (ten holes)
P2	HCSH	32	7.8	Polyester	Hollow (one hole)
P3	NHCS	32	7.8	Polyester	Solid

Table 1. Reference and technical information of the 6 textile fibres (acrylic and polyester).

The difference between the acrylic fibre samples (A1, A2 and A3) lies largely in the fineness and the length of the fibre, while the main difference between the polyester fibre samples (P1, P2 and P3) is based on the presence and geometry of the holes. The hollow polyester fibres (P1 and P2) are used in some applications such as improving the resistance of fabrics due to the higher fibre surface/volume ratio [18]. Several researchers have focused on the analysis the influence of

hollow polyester fibres on their mechanical properties [19, 20]. Here, we investigate the influence of the hollow section in the acoustic behaviour of the fibres.

Figure 2 shows the cross section of the three polyester samples presented in Table 1. The polyester fibre sample P1 has ten holes, P2 a unique central hole and P3 has no holes.

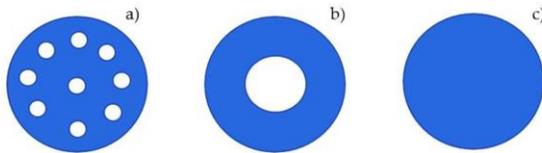


Figure 2. Cross section from polyester fibres. a) P1; b) P2; c) P3.

Three microscope images of the polyester fibre samples are shown in Figure 3. In this study, the fibre samples were examined with a suitable accelerating voltage of 10 kV and 2000 \times magnifications. Fibres have been frozen to -19° C before having them cut. Due to the fibre shear deformation the cutting changes their circular shape (as shown in Fig. 2) to an irregular or oval shape as shown in Figure 2.

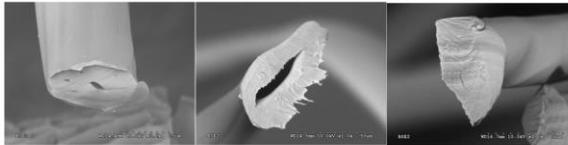


Figure 3. Cross section from polyester fibres. a) P1; b) P2; c) P3.

2.2. Preparation of fibre samples

In this work, different test specimens have been prepared from the fibres shown in Table 1. The preparation of the fibre samples were divided into two parts. In the first part, the fibres were

cut into smaller sizes to facilitate the handling process. In the second part, after the fibre was cut into smaller sizes, three samples with different fibre content (1.3 g, 3.2 g and 6.4 g) were made for each type of fibre. Specifically, nine acrylic samples using a thickness (total length) from 3.8 cm to 6.5 cm, its reference can be observed in Table 2, and nine polyester fibre samples using a thickness from 4 cm to 7 cm, as observed in Table 2. The thickness values selected for the fibre samples are typical of porous or fibrous materials, which are used as acoustic absorbent materials or part of acoustic solutions.

Table 2 shows the physical properties of the acrylic and polyester fibre samples. Each test is performed with three samples with identical thickness using the same mounting conditions with the aim of reducing the dispersion error produced by the inhomogeneity of the fibre material.

Type	Thickness (cm)	Physical density (kg/m ³)	Type	Thickness (cm)	Physical density (kg/m ³)
A1_1.3	3.80±0.20	0.94±0.10	P1_1.3	4.00±0.15	0.94±0.01
A1_3.2	4.30±0.25	2.31±0.24	P1_3.2	5.00±0.20	2.31±0.04
A1_6.4	6.50±0.80	4.62±0.31	P1_6.4	7.00±0.50	4.62±0.15
A2_1.3	4.00±0.15	0.94±0.10	P2_1.3	4.00±0.20	0.94±0.05
A2_3.2	4.50±0.20	2.31±0.25	P2_3.2	5.00±0.30	2.31±0.32
A2_6.4	5.50±0.50	4.62±0.49	P2_6.4	6.50±0.50	4.62±0.22
A3_1.3	3.80 ±0.30	0.94±0.11	P3_1.3	4.00±0.30	0.94±0.09
A3_3.2	4.30±0.20	2.31±0.28	P3_3.2	4.00±0.40	2.31±0.03
A3_6.4	6.50±0.50	4.62±0.39	P3_6.4	5.00±0.45	4.62±0.12

Table 2. Specifications of acrylic and polyester fibre samples.

2.3 Methods. Acoustic absorption coefficient at normal incidence

The absorption acoustic properties of fibres have been characterized by using the impedance tube method. The acoustic absorption coefficient at normal incidence is obtained with two-microphone technique according to the standard ISO 10534-2 [21], which is based on the transfer-function method. This test method requires two microphones (1/2-inch free-field Brüel and Kjer – type 4190), a digital system (Pulse LabShop v.22.2.0.197), a PC for the signal treatment and a sound source (Beyma CP800Ti loudspeaker). In the tube used in this work, the measurements cover the frequency range from 100 Hz to 3150 Hz. These frequencies are established by the restrictions imposed by the distance between both microphones, the precision of the signal processing equipment and the inner diameter of the impedance tube. The impedance tube is rigid methacrylate duct with circular cross section of 4 cm. The material under test is a fibre sample (acrylic or polyester) and it is placed at the end of the tube rigidly backed. Figure 4 shows the experimental setup with the fibre placed at the end of the impedance tube with rigid end.

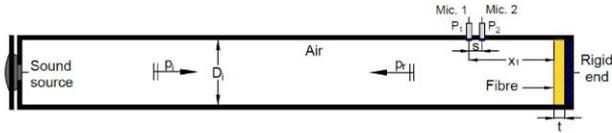


Figure 4. Scheme of the acoustic impedance tube used to measure the acoustic absorption coefficient at normal incidence of the fibre samples. D_i is the inner diameter of the tube ($D_i = 4$ cm); t is the fibre sample thickness, x_1 is the distance between Mic.1 and the fibre sample; p_i is the acoustic pressure of the incident wave; p_r is the acoustic pressure of the reflected wave and s is the separation between both microphones ($s = 3.2$ cm).

In the two-microphone technique [21], the complex acoustic pressure is registered in both microphones in order to calculate the complex acoustic transfer function (H_{12}), as

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{ik_0s_2} + r_{rc}e^{ik_0s_2}}{e^{ik_0s_1} + r_{rc}e^{ik_0s_1}} \quad (1)$$

where $k_0 = 2\pi f/c_0$ is the wave number being f the frequency and c_0 the speed of sound in air (in our case, $c_0 = 340$ m/s), r is the complex acoustic pressure reflection coefficient, x_2 and x_1 are the distance between the fibre sample and the microphone placed farther and closer to it, respectively.

The complex acoustic pressure reflection coefficient, r , for a plane wave at normal incidence can be obtained from Equation (1), as

$$r = \frac{H_{12} \cdot H_1}{H_R \cdot H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (2)$$

where $H_1 = e^{jks}$ is the sound pressure transfer function of the incident wave, $H_R = e^{-jks}$ is the sound pressure transfer function of the reflected wave and s is the separation between both microphones (in our study, $s = 3.2$ cm).

Once the complex reflection coefficient has been calculated, the normal incidence sound absorption coefficient is obtained from its definition in a reflection configuration, as

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (3)$$

The acoustic absorption coefficient as a function of frequency is the relevant magnitude to characterize the ability to absorb acoustic energy of the material under test. But often, an average value in octave frequency bands of the absorption coefficient is expressed. Figure 5 shows a detail of the end of the impedance tube with the two. Fibres are not arranged like woven or nonwoven textiles but organized in samples with cylindrical shape that are placed at the end of the impedance tube.

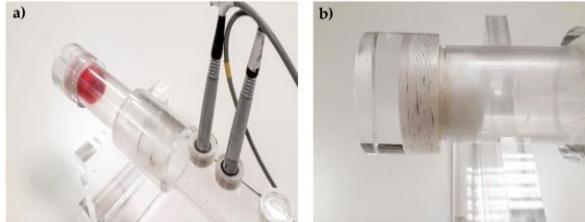


Figure 5. Detail of the end of the impedance tube used to measure the acoustic absorption coefficient at normal incidence, including a sample of a) A1 fibre and b) P1 fibre.

3. Results and Discussion

In this Section the experimental results are presented and analyzed. A first study of the fibre fineness influence on the acoustic absorption using different acrylic fibres samples with the same length is presented. Next, the effect of the fibre length on the sound absorption coefficient using acrylic fibres is analyzed. Subsequently, the results of three polyester fibres with different transverse section (solid / hollow) are presented to investigate the influence on the acoustic behaviour of the samples. Finally, the acoustic absorption coefficient averaged in the working frequency range of samples made of both types of fibres (acrylic and polymer), is presented to show their overall acoustic behaviour.

3.1 Fibre fineness

The results of samples composed of fibres with the same length (63 mm) and composition (polyacrylonitrile) are presented and compared. The significant different parameter of these fibres is the fibre fineness. Sample A1 has fibres with fineness 3.3 *dtex* whereas fibres of sample A2 have fineness 5.4 *dtex*.

In Fig. 6, the sound absorption coefficient at normal incidence measured in the impedance tube of three acrylic samples A2 with different fibre content (1.3 g, 3.2 g, 6.4 g) is shown. It can be seen that the maximum absorption gradually increases and shifts towards low frequencies as the fibre content of the sample is higher. Acrylic samples A2 have been taken as reference for the study as they have the same fibre length (63mm) as samples A1 and they have the same fineness (5.4 dtex) as samples A3. Figure 7 shows the sound absorption coefficient difference of both samples A1 and A3 with respect to the reference samples A2 for each fibre content. Note that the ordinates axis is not restricted to positive values as differences of sound absorption coefficients are plotted. Figure 7a shows a clear influence of the fibre fineness on the sound absorption coefficient: A1 fibre samples present lower values of the sound absorption coefficient at normal incidence than A2 fibre samples as all experimental points of the difference are positive values. Consequently, from these results, it can be inferred that the increase in fibre fineness of acrylic samples increases the acoustic absorption coefficient in the whole working frequency range. This effect can be observed disregarding the different fibre content of the acrylic fibre analyzed (1.3 g, 3.2 g, 6.4 g). However, the difference is higher at lower frequencies for denser samples. We can assert that fibre fineness is an important parameter to enhance the sound absorption in the mid frequency region (above 400 Hz).

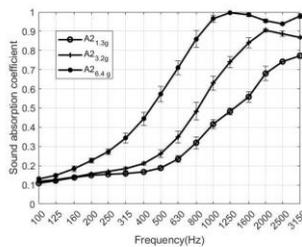


Figure 6. Sound absorption coefficient at normal incidence of acrylic fibre sample A2 with different fibre content.

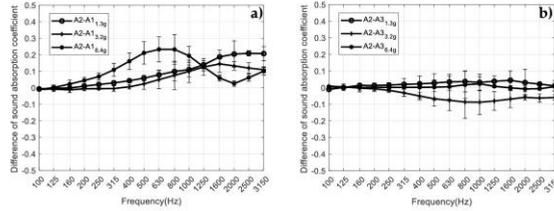


Figure 7. Difference of sound absorption coefficient at normal incidence of acrylic fibre samples with different fibre content to observe the influence of a) fibre fineness and b) fibre length.

3.2. Fibre length

In this section, samples of acrylic fibres with the same composition (polyacrylonitrile) and the same fineness (5.4 *dtex*), but with different length are presented and analyzed. Same as in Section 3.1, acrylic samples A2 are taken as the reference. In Fig. 7b, the difference of the sound absorption coefficient at normal incidence of acrylic samples A3 with respect to samples A2 is presented. In this case, the significant parameter to be analyzed is the fibre length as samples A2 are 63 mm long and samples A3 are 37 mm long. By comparing Fig. 7a and 7b, it can be noticed that the fibre length has less influence on sound absorption than fineness. In fact, differences in Fig. 7b are smaller than 0.1 for all frequencies. Moreover, sound absorption coefficient differences have positive and negative values for different fibre contents, showing that there is not a clear tendency. The maximum difference between both fibres is observed for a fibre content of 3.2 g. But, no clear conclusions can be drawn with regard to the influence of the fibre length on the sound absorption coefficient. Thus, these results do not permit to assume that the length of fibres of acrylic samples has a significant effect on their acoustic absorption.

3.3. Hollow cross section

We are here interested in evaluating the effect of the cross section of the fibres on acoustic absorption. For this purpose, samples with fibres presenting two different hollow patterns and solid (not hollowed) fibres are analyzed and compared. Polyester fibre sample P1 with ten holes

in the cross section has been chosen as the reference. Figure 8 shows the sound absorption coefficient at normal incidence of these fibre sample with different fibre content. The maximum of absorption gradually increases and shifts towards low frequencies when the fibre content is increased. That is, the same tendency as the fineness fibre with frequency.

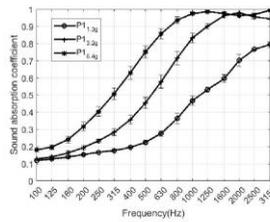


Figure 8. Sound absorption coefficient at normal incidence of polyester fibre sample P1 with different fibre content.

In Figure 9a, samples with both hollow fibres are compared P1 and P2 that has a single central hole in the cross section. No significant differences are observed between acoustic absorption of both hollow fibres in different hole distributions. Note that the hollowed area is the same in both samples (0.1 mm²). Thus, these results show that the specific distribution of the hollowed surface of the cross section of the fibre or the number of holes do not affect the acoustic absorption. However, the presence of holes is important as it is shown in Fig. 9b, where samples with hollowed fibres (P1/10 holes) are compared to samples with solid fibre (P3/ no holes).

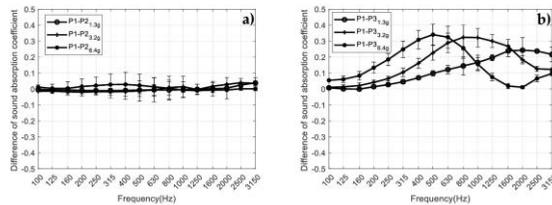


Figure 9. Difference of sound absorption coefficient at normal incidence of polyester fibre samples with different fibre

content to observe the influence of hollow cross section. a) hollow fibre (P1/ 10 holes) is compared to hollow fibre (P2/ 1 hole); b) hollow fibre (P1/ 10 holes) is compared to solid fibre (P3/ no-hole).

A remarkable effect of the solid/hollowed comparison can be observed as differences of the sound absorption coefficient are higher than 0.3 for certain frequencies. Hollowed fibres present a higher acoustic absorption coefficient than solid fibre in the whole working frequency range for all fibre contents. This effect is more important for higher frequencies in fibres with less fibre content. Thus, it can be concluded that using hollowed fibres instead of solid fibres can have a significant effect on their acoustic behaviour. But, the specific distribution of the holes in the cross section of the fibre is not relevant.

4.4. Average sound absorption coefficient

In order to evaluate the overall response of the samples to acoustic absorption, the sound absorption coefficient has been integrated in the working frequency range. The average value of sound absorption coefficient ($\bar{\alpha}$) has been computed for all the samples. It is defined as the average of the absorption coefficients in frequency bands and it is obtained as $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$, where $n=16$ is the number of the one-third octave bands. Figure 10a and 10b show the average acoustic absorption coefficients between 100 Hz and 3150 Hz for acrylic and polyester fibre samples, respectively. It is observed that the $\bar{\alpha}$ values of both fibres (acrylic and polyester) lies in the range of 0.25 - 0.68. In all cases, samples with higher fibre content present higher average sound absorption coefficient. In general, acrylic fibre samples show lower absorption coefficient values in comparison to hollowed polyester fibre samples.

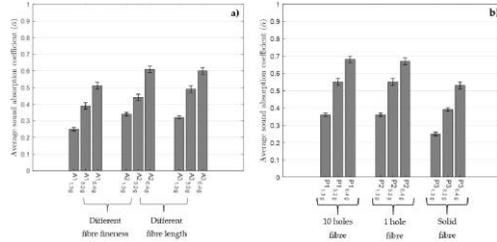


Figure 10. Average sound absorption coefficients of a) acrylic and b) polyester fibre samples. The dispersion percentage is presented in order to study the variability of the data and it is expressed as error bars for each sample.

4. Conclusions

The influence of different parameters of acrylic and polymer fibres like fineness, length, type of section and fibre content has been analyzed by comparing their acoustic absorption. The acoustic absorption coefficient at normal incidence of fibre samples was measured by the two-microphone technique in impedance tube. Results show that the fibre fineness has a significant influence in the acoustic absorption of acrylic fibres, but the length of fibres is not relevant. The acoustic behaviour of polymer samples with solid and hollow fibres is compared to account for the effect of the internal geometry of the fibre cross section. Samples with hollowed fibres show a higher acoustic absorption than solid fibre samples. But the specific cross section geometry is not a significant parameter regarding the acoustic absorption. Moreover, fibres with the same hollowed area but a unique central hole or ten distributed holes present very similar results.

Funding: This research was financially supported by the Spanish Ministry of Economy and Innovation (MINECO) and the European Union FEDER through project PID2019-109175GB-C22 and by project ACIF/2017/073 by Regional Ministry of Education, Culture and Sport of the Generalitat Valenciana and with the support of European Structural Investment Funds (ESIF-European Union).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest with respect to the research, publication and authorship of this article.

References

1. Hearle, J. W., and Morton, W. E. *Physical properties of textile fibres*, Elsevier (2008).
2. Gacén Guillén, J. *Microfibras. Barcelona: UPC* (1996).
3. Wang, H.M., and Wang, X. Evaluation of the fineness of degummed bast fibers. *Fiber. Polym.*, **5**, 171 (2004).
4. Padhye, R., and Nayak, R. *Acoustic Textiles. Textile Science and Clothing Technology*. Melbourne, Victoria, Australia, Springer (2016).
5. Yan, G., and Yu, C. A joint influence of the distributions of fiber length and fineness on the strength efficiency of the fibers in yarn. *Fiber. Polym.*, **8**, 309-312 (2007).
6. Balakrishnan, S., Wickramasinghe, G.L.D., and Wijayapala, U.S. Investigation on improving banana fiber fineness for textile application. *Text. Res. J.*, **89**(21–22):4398–4409 (2019).
7. Hu, M., Wang, C., Lu, C., Anuar, N.I.S., Yousfani, S.H.S., Jing, M., Chen, Z., Zakaria, S., and Zuo, H. Investigation on the classified extraction of the bamboo fiber and its properties. *J. Nat. Fibers*, 1–11 (2019).
8. Palamutcu, S., Soydan, A.S., Avinc, O., Günaydin, G.K., Yavas, A., Kivilem, M.N., and Demirtaş, M. Physical properties of different turkish organic cotton fiber types depending on the cultivation area. In book *Organic cotton* (pp. 25–39). Springer, Singapore (2019).
9. Sitotaw, D.B., Woldemariam, A.H., and Tesema, A.F. Characterization of the wool fiber physical properties of Ethiopian indigenous sheep breeds. *J. Text. Inst.*, **111**(1–8) (2019).
10. Eyupoglu, C., Eyupoglu, S., and Merdan, N. Improvement of thermal insulation properties of polyester nonwoven and estimation of thermal conductivity coefficients using artificial neural network. *J. Test. Eval.*, **47**(2):1075–1086 (2019).
11. Rubino, C., Bonet-Aracil, M., Gisbert-Payá, J., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., Zamorano-Cantó, M., and Martellotta, F. Composite eco-friendly sound absorbing materials made of recycled textile waste and biopolymers. *Materials*, **12**(23):4020 (2019).
12. Thilagavathi, G., Muthukumar, N., Neela-Krishnan, S., and Senthilram, T. Development and characterization of pineapple fibre nonwovens for thermal and sound insulation applications. *J. Nat. Fibers*, 1–10 (2019).

13. Lee, Y.E., and Joo, C.W. Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. *AUTEX Res. J.*, **3**(2): 77–84 (2003).
14. Aso, K., and Kinoshita, R. Sound absorption characteristics of fiber assemblies. *Text. Mach. Soc. Jpn.*, **10**(5):209–217 (1963).
15. Shoshani, Y., and Rosenhouse, G. Noise absorption by woven fabrics. *Appl. Acoust.*, **30**(4):321–333 (1990).
16. Na, Y., Lancaster, J., Casali, J., and Cho, G. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Text. Res. J.*, **77**(5):330–335 (2007).
17. Iannace, G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, **94**, 840–852 (2015).
18. Kothari, V.K. *Textile Fibres: Development and Innovations*, IAFL Publication, New Delhi (2000).
19. Yang, C., Qian, C., Zhong, W., Wang, Y., and Wang, H. The design and manufacture of profiled multi-channelled hollow polyester fibers. *Fiber. Polym.*, **10**(5), 657–661 (2009).
20. Khoddami, A., Carr, C. M., and Gong, R. H. Effect of hollow polyester fibres on mechanical properties of knitted wool/polyester fabrics. *Fiber. Polym.*, **10**(4), 452–460 (2009).
21. ISO 10534-2. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method. *Acoust Comite Europeen de Normalisation*, Brussels (1998).



Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules

R. Atiénzar-Navarro^{a,*}, M. Bonet-Aracil^b, J. Gisbert-Payá^b, R. del Rey^c, R. Picó^a

^aInstituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC), Universitat Politècnica de València, C/Paraninfo, 1, 46780 Grau de Gandia, València Spain

^bDepartamento de Ingeniería Textil y Papelera (DITEPXA), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrandiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoi, València Spain

^cCentro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica (CTFAMA), Universitat Politècnica de València, Av. de los Naranjos s/n, 46022 València Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 October 2019

Received in revised form 18 February 2020

Accepted 20 February 2020

Keywords:

Sound absorption

Microcapsules

Padding technique

Woven fabrics

ABSTRACT

The use of microcapsules is increasing in the textile industry and play an important role in the field of acoustical porous materials in order to adopt solutions for the control of noise. In this work, we present an experimental study of the acoustic effect of woven textile fabrics doped with microcapsules by using the padding technique. For this purpose, measurements with the fabric backed by an air-cavity or by a rigid wall in the impedance tube have been done. A comparative analysis of acoustic effect by using cotton fabrics with the same yarn density but different doping percentage is presented. We have investigated the influence of the sound damping effect of doping six different textile woven fabrics with the same concentration of microcapsules. The results show that the variation on the sound absorption coefficient of doped woven fabrics depends on the type of fabric, the concentration of microcapsules and the experimental setup.

© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The acoustic pollution generated by human activities has experienced a drastic increase in recent years affecting a large part of society and the environment, as specified by the World Health Organization (WHO) [1]. According to the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) [2] and the European Environment Agency (EEA) [3], the effect of noise pollution is one of the biggest environmental problems today because noise and vibrations have both physiological and psychological effects on human health [4]. Some examples of these problems, on humans, due to the high levels of noise are permanent hearing loss, sleep disturbance, less blood supply, decreased working capacity, fatigue, stress, cardiovascular disorders, tachycardia and pupil dilation. Public concern continues due to these adverse effects caused by noise pollution. In order to avoid these, and in accordance with the Action 5 of the EU Framework Program for Research and Innovation (HORIZON2020), new acoustic solutions to mitigate noise must be found from new economic and sustainable materials [5]. The new European program (HORIZON2030) will be in operation by the end of 2020 [6]. The Sustainable Development Goals (SDGs) of this program, in particular, the SDG12 reinforces the need to reduce, recycle and reuse waste in search of sustainable development.

Traditionally, materials difficult to recycle based on rockwool and fiberglass have been used to mitigate high noise levels [7]. Nowadays, research is oriented to new and innovative materials [8–12] that are respectful with the environment [13]. The use of wastes as acoustic and/or thermal insulating materials is a goal under study. Maderuelo-Sanz et al. showed in [9] a novel sound absorber made from end of life tyres useful to reduce noise pollution in building construction. Del Rey et al. [10] proposed to control noise using recycled polyurethane foams. These new materials have useful sound absorbing properties and they are a viable alternative to traditional materials for practical applications.

Another valid alternative to traditional solutions is the use of waste materials from manufacturing processes in the textile industry, in combination with natural fibers or other types of fibers. For that purpose, different techniques such as knitting, weaving or nonwoven are used [14,15]. The acoustic properties of fabrics may vary depending on the method of preparation, their nature, fibers and pore treatment, yarn density and humidity conditions [16]. The acoustic properties of the textile materials also depend on the mechanical characteristics of the fabric and the manufacturing process. Bies et al. showed in [17] that the most important parameter to determine how a fabric acts as a sound absorbing material is the airflow resistance. Specific fabric features like the twisting of the weft yarn and the density of the fabric selection also have an influence in the porosity and the air permeability of the fabric as acoustic material [18]. The most used textile structure for acoustic applications is the nonwoven, but for lack of aesthetic

* Corresponding author.

E-mail address: rostaia@doctor.upv.es (R. Atiénzar-Navarro).

<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107285>
0003-682X/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

appeal they are usually covered with woven fabrics in order to produce a pleasant appearance [19]. In general, these textile woven fabrics can be considered thin compared to the wavelength and can be acoustically characterized as a permeable membrane [20,21]. Pieren et al. used in [21] thin fabrics that have a membrane-type acoustic response in their sound absorption models. The sound absorption properties for thin and lightweight fabrics are affected by sound-induced vibrations [22,23]. Sakagami et al. presented in [22] a detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane and they proposed theoretical methods to take the vibration effect of the membrane into account.

Numerous previous studies can be found in the literature about the acoustical properties of woven textile materials [24]. In 1990, Shoshani et al. showed in [25] that some intrinsic parameters analyzed of nonwoven fiberwebs and woven fabrics, like number of fiberweb layers, fiber contents and the opening angle between individual panels, have a small effect on the sound absorption coefficient at low frequencies ($f < 0.5$ kHz), but a significant impact at high frequencies (around $f = 4$ kHz). Due to the practical interest of using textile materials, new solutions have been investigated to increase the overall sound absorption of fabrics. In 2007, Na et al. [26] showed that microfiber fabrics have higher sound absorption than traditional textile fabrics due to its great surface area, resulting in higher airflow resistance. In 2012, Soltani et al. demonstrated in [27] that plain weave fabrics absorb more sound than other weave types due to several reasons: these have a great number of yarn intersections, a short free float length, severe crimping of the yarns in the plain weave and higher yarn density. In the same year, Kici et al. presented in [28] a new sound absorbent material made of tea-leaf fibers and luffa cylindrica with polyurethane foam and by increasing the tea-leaf-fibers, the sound absorption values for all frequency ranges improved. The motivation for the research of new sound absorbing materials is not only in the field of acoustic conditioning, but also in the field of acoustic insulation. In 2015, Reixach et al. investigated in [29] composite materials made of fibers from orange tree pruning reinforced polypropylene in order to obtain airborne insulation solutions. Recently, Naghmouchi et al. studied in [30] a new natural fiber-based composite material made with olive stone flour reinforced polypropylene as a solution for airborne isolation. The results showed that for frequencies below 0.63 kHz third octave, this new material shows similar soundproofing properties compared to gypsum boards.

New advances in acoustic textiles have increased their use exponentially in numerous areas of application, particularly in new technological advances [31]. Textile fabrics are used in public spaces, such as theaters, museums, opera houses and other cultural spaces in order to improve the indoor sound quality by using curtains and carpets [32–34]. The evolution of textile engineering last years has brought new mechanisms and solutions to confer new properties to textile fabrics as for example Chevillotte who studied in [35] the way of controlling sound absorption of a porous media by adding an upstream resistive layer of glass screen. The results revealed an improvement of sound absorption at low frequencies and lately, Segura-Alcaraz et al. investigated in [36] the best combination fabric-nonwoven and results showed a good interaction between both of them obtaining thermal effects of the nonwoven and resonant effects of the fabric that cause a variation in the sound absorption coefficient. At higher density of yarns in the fabric, the sound absorption increases and the resonance peak shifts to low frequencies.

In the textile engineering, Nelson, G. considered the use of microcapsules (MCCs) applied on textile fabrics for the first time [37]. MCCs are micrometric particles composed of one or more active ingredients [38–40]. They are formed by a membrane (outer

layer) that encompasses the active compound in the nucleus [41]. Microencapsulation is used to alter the physical properties of the volatile substance used in order to make it more manageable and to protect it from multiple external factors such as sunlight, evaporation, humidity, alkalinity, unwanted rubbing action or the combination between them [42]. The most known industrial methods for adhering microcapsules to textile fabrics are bath exhaustion, padding, spraying and coating. MCCs adhere to textile structures using a binding agent. The acoustic effect of MCCs adhered to fabrics has been shown in a previous work [43]. Few recent studies have been consecrated last decades to the use of microparticles for acoustical purposes [44–48]. However, the physical mechanism involved in the sound absorption related to the adhesion of MCCs is not still well known. One of the reasons is that sound absorption depends on many factors of different nature like the size of MCCs, the hosting material or the doping technique. Zhou et al. presented a polyurethane foam (PU) composed of polymer microparticles of size from $0.1 \mu\text{m}$ to 1mm [49]. They show that the size of polymer microparticles have an influence on the absorption peak frequency. Indeed, at low frequencies, the sound absorption coefficient of PU foam with microparticles is higher than traditional PU foams, with the same thickness. The same authors studied the acoustic properties of hollow polymeric multiporous microspheres with different porous structure [50]. The results revealed a high sound absorption at high frequencies in comparison with granular materials of the same thickness when the density value of the microspheres is increased and the porosity is increased. Also Cheng et al. [51] observed a big absorption at high frequencies in a foamed cellulose-polymer material formed from microspheres. Few works can be found in literature accounting for the effect of MCCs in textile fabrics as acoustic materials. Zhi et al. [52] studied the sound absorption of a synthetic foam reinforced with spacer fabric. Authors analyze the effect on sound absorption of adding microspheres to it, showing that a great influence on the propagation of sound waves. When the microspheres content decreases, the first resonance frequency shifts to the higher frequency range and it has little influence on the value of peak sound absorption coefficient.

In this work, the effect of doping different textile fabrics with microcapsules on the sound absorption coefficient is analyzed. Depending on the type of fabric and the MCCs concentration, the damping effect on the sound absorption of doped textile materials is shown. A comparative analysis between a cotton fabric (CO) with different MCCs concentration and the same non-doped fabric is presented. Experimental results are shown in both, back-end and air-cavity impedance measurements. The influence of the type of fabric is analyzed by doping different textile fabrics with the same technique described above and with the same MCCs concentration.

2. Experimental

2.1. Materials

Different types of fabrics were tested. The first one referenced as T1 is comprised of polyester yarns and a weft yarn of blue chenille with a ratio one chenille/two polyester, which creates the bubble effect and increases the thickness. Textile fabrics labeled as T2, T3 and T5 were also comprised of polyester yarns but without chenille, their colour effect was obtained by printing on the fabric surface, even the flat colours. In particular, T3 is printed with simple designs employing one or more colours and it has a rough texture and both T2 and T5 are made with a soft face on one side and with a slight texture on the other. The difference between the two woven fabrics are in dyeing and grammage. The next

one referenced as T4, was also made of 100% polyester fibers, without chenille yarns nor printing colour designs were created by jacquard weaving and the last one referenced as T6 is comprised of polyester yarns and a yarn of pink chenille gives the fabric the thickness.

Reference CO corresponds to fabric made of 100% cotton fibers, which was chemically bleached. The cotton sample was a twill weaved fabric and no chenille was included.

The surface mass density of the textile fabrics under study is presented in Table 1 and in Table 2.

2.2. Preparation and characterization of the doped fabrics

During the microencapsulation process, the shape, size, durability, permeability and wall properties of the MCCs are considered. One of the most important characteristics that determines the purpose of microcapsules is permeability. Often, a solid and insoluble waterproof membrane shell (natural polymer) is used to isolate the active principle in liquid form and in order to protect it from environmental factors, thus converting a liquid substance into a solid state.

Padding is an impregnation technique to adhere MCCs onto the textile fabric surface. It consists of a rapid immersion process of the textile sample and two squeezing rolls press the liquid from both sides in the treatment bath, to force the liquid to pass through the fibers. The padding process was made with a horizontal foulard (2608 TEPA). The squeeze roll speed and pressure were regulated in order to achieve 80% wet pick-up (percentage of bath absorbed by the textile fabric) [53].

The doping process of the different textile fabrics was carried out by using microcapsules containing Lavender essential oil fragrance, which were supplied by InnovaTec S.A-C S.L. and its size varies from 1 μm to 8 μm in order to avoid agents which can interfere. No binder was added.

In this study, one of the baths was comprised of different MCCs concentration (25 g/L, 50 g/L and 100 g/L) in distilled water for the cotton samples. The rest of the fabrics were treated in other bath with the same MCCs concentration: 100 g/L. To complete the adhesion process between fibers and MCCs, the textile samples were dried in a horizontal infrared dryer during 180 s at a temperature of 105 °C.

MCCs, due to its micrometric size, are imperceptible to the human eye. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) mod. ZEISS ULTRA55 was used to observe the surface of the fabrics with high resolution. With this technique, it is possible to visualize the shape of the membrane of each microcapsule (smooth or rough), their structure, their size and their location [54,55]. In this study, CO samples were examined with suitable accelerating voltage of 2 kV and 2000× magnifications (see Fig. 1a and b). In order to make them conductive, and observe them by SEM, previously the samples were fixed on a standard sample holder and the sputter-coated with a thin film of gold/platinum metal under vacuum conditions. This process was done in a Sputter Coater BAL-TEC mod. SCD005.

Table 1
Values of the surface mass density and airflow resistivity of undoped and doped cotton samples with a 0.3 mm thickness.

Fabric type	Surface mass density (Kg · 10 ⁻³ /m ²)	σ (kPa · s · m ⁻²)
CO Undoped	183	1363–1370
CO 25 g/L	191	1344–1380
CO 50 g/L	199	1350–1383
CO 100 g/L	187	1342–1360

2.3. Methods

The textile samples are characterized acoustically either experimentally by using the same parameters as Chen et al. in [56] or by elaborating predictive models [57,58]. In the Materials Laboratory of the Higher Polytechnic School of Gandia, measurements of textile fabrics (see Fig. 2) have been carried out in order to characterize them acoustically by using two classical techniques: 1) the Standard ISO 10534-2:1998 [59] in order to calculate the normal incidence sound absorption coefficient (α) and 2) the Ingard&Dear method (1985) [60] in order to obtain the specific airflow resistance (R_s).

2.3.1. Sound absorption coefficient

The sound absorption coefficient (α_n) of the samples is measured according to the transfer function method described in the Standard ISO 10534 – 2 : 1998 [59]. This test method requires an impedance tube, a digital signal analysis system (Pulse LabShop v.22.2.0.197) and two microphones. Measurements are performed by using a sound source mounted in an isolated box (Beyma CP800Ti loudspeaker) placed to one end of the acoustic impedance tube and the textile fabric samples under study at the other end (see Fig. 3). The sound source generates plane waves inside the impedance tube hitting the material perpendicularly. Free-field Brüel and kjaer pressure microphones (type 4190 1/2-inch) are mounted on the wall, in fixed positions close to the sample. The acoustic pressure is recorded in order to calculate the normal incidence sound absorption coefficients. The impedance tube is a rigid, methacrylate, smooth, transparent and airtight duct with circular cross section, which meets the specifications described in the standard [59].

The working frequency range is from 0.1 kHz to 3.15 kHz due to restrictions impose by the distance between microphones, by the precision of the signal processing equipment and by the tube inner diameter [59]. Three test specimens from each configuration were prepared for the experiment in order to provide an acceptable uncertainty of measurements based on the material variability, cutting variability and other experimental factors.

The sound pressure transfer function (H₁₂) [59] is determined with the application of the two-microphone method in order to calculate the complex reflection coefficients (r) given by Eq. (1) as follows:

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_k - H_{12}} e^{2ik_0x_1} \tag{1}$$

where H_i = e^{iks} is the sound pressure transfer function for the incident waves, s is the distance between both microphones (s = 3.2 cm), H_k = e^{iks} is the sound pressure transfer function for the reflected waves, k₀ is the wave number, j = √-1 and x₁ is the distance between the corresponding microphone and the measured textile fabric.

The microphone spacing (s) introduces small inter-channel differences of the phase information contained in the data recorded. For this reason, the two-channels are exchanged for each measurement.

Finally, the absorption coefficients are calculated from Eq. 1 as

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

This testing method described in this section is valid for both configurations, the sample at the end of the impedance tube and backed by an air-cavity. In this last configuration, there is a theoretical model to predict the sound absorption at normal incidence of thin textile fabrics [57,58]. In order to acoustically characterize the textile fabric, the model requires as input parameters its specific airflow resistance R_s (Pa · s/m) and its surface mass density m_s

Table 2
Thickness, surface mass density and undoped and doped airflow resistivity values of the textile fabrics.

Fabric type	Thickness (cm)	Surface mass density (Kg · 10 ⁻³ /m ²)	Undoped σ (kPa · s · m ⁻²)	Doped σ (kPa · s · m ⁻²)
T1	0.18	398	204-250	230-232
T2	0.05	159	786-842	815-819
T3	0.08	358	506-516	509-510
T4	0.07	245	571-579	577-581
T5	0.05	199	809-823	820-839
T6	0.14	478	270-274	286-292

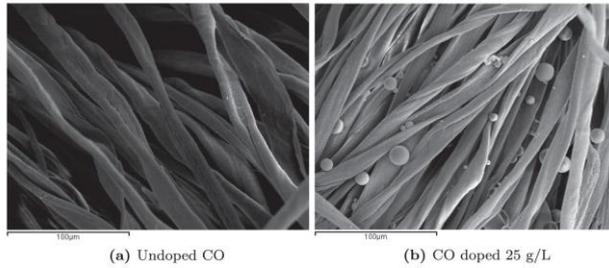


Fig. 1. FESEM micrographs of cotton fabrics. (a) Sample surface of undoped CO before impregnation treatment; (b) CO doped with 25 g/L concentration of microcapsules.

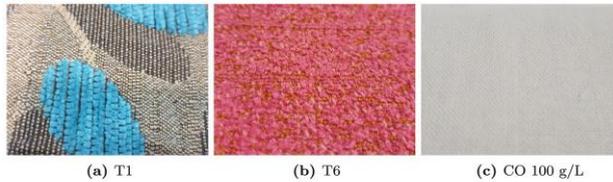


Fig. 2. Some of the textile fabrics analyzed. (a) Undoped T1 (1.8 mm thickness); (b) Undoped T6 (1.4 mm thickness); (c) CO doped with 100 g/L concentration of microcapsules (0.2 mm thickness).



Fig. 3. Scheme of the impedance tube used to measure the normal incidence sound absorption coefficient. D is the tube inner diameter (D = 4 cm), t is the thickness of the textile fabric, p_1 is the sound pressure of the incident wave and p_2 is the sound pressure of the reflected wave.

(kg/m²). The normal incidence sound absorption coefficient can be calculated by using the surface impedance of the absorbent structure Z_m , which is described by impedance of fabric Z_f in series with the surface impedance of the air-cavity Z_c as follows:

$$Z_m = Z_f + Z_c = \frac{R_f + j\omega m_f}{R_f^2 + (\omega m_f)^2} + j \frac{R_c^2(\omega m_f)}{R_c^2 + (\omega m_f)^2} - jZ_0 \cot(k_0 D), \quad (3)$$

where Z_f is the impedance of the fabric and Z_c is the impedance of the backing air gap (cavity) being D the air gap depth, $Z_0 = \rho_0 c_0$ is the air characteristic impedance, ρ is the air density (kg/m³), c is the speed of sound in air (m/s), $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency and k_0 is the wave number.

From Eq. 3, Z_m is used to calculate the normal incidence sound absorption coefficient by

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \right|^2, \quad (4)$$

In this model, the fabric is assumed to be acoustically thin, which means the thickness is much smaller than the wavelength of sound. In our work, this condition is fulfilled for all the fabrics in the frequency range up to 3.15 kHz. It is also considered that sound absorption occurs mainly inside the fabric and dissipative effects inside the air-cavity are neglected.

2.3.2. Airflow resistivity

Airflow resistivity (σ) is also measured in order to evaluate the difficulty of an air stream to flow through the fabric per unit thickness. The experimental setup is based on the indirect method proposed by Ingard&Dear that allows to obtain the value of the specific airflow resistance under certain limitations [60].

The rigid methacrylate tube has a circular cross section with an internal diameter of 4 cm, the total length of the tube is 169 cm and the distance between the first microphone and the rigid end is 84.5 cm. The sample thickness, t , is placed in the middle of the impedance tube. L is the distance between the back face of the fabric sample and the rigid end. Two microphones are used to measure the difference in sound pressure between fabric material. One of them (Mic. 1) is placed in front of the sample to directly measure the sound pressure (p_1); the other (Mic. 2) is located next to the highly sound-reflective end (p_2) as can be seen in Fig. 4:

According to Ingard&Dear method [60], the normalized airflow impedance for frequencies that satisfy the following condition: $L + t = (2n - 1)\lambda/4$, where n is an integer number, is expressed as follows:

$$\frac{Z}{\rho_0 c_0} = \theta + i\chi = 1 \frac{1}{H_{12}} (-1)^{n-1} \tag{5}$$

From Eq. (5), it is possible to obtain the real (θ) and imaginary (χ) part of the characteristic impedance Z as

$$\theta = \left| \operatorname{Im} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right| \tag{6}$$

$$\chi = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) (-1)^{n-1} \tag{7}$$

where θ is the airflow resistance and χ is the airflow reactance.

At low frequencies corresponding to $L + t = (2n - 1)\lambda/4$, the airflow reactance is small compared to the airflow resistance doing the following simplification:

$$\theta \approx \left| \frac{1}{H_{12}} \right| \tag{8}$$

The average values of the airflow resistivity are obtained by using the absolute value of the imaginary part of the transfer function between the microphone signals as follows:

$$\sigma \approx \left(\frac{\rho_0 c_0}{t} \right) \left| \operatorname{Im} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right|, \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] \tag{9}$$

3. Results and discussion

The doping process is determined by several factors like the type of doping, the concentration of MCCs, the size of MCCs and the type of fabric. Due to the complexity of the problem and the high number of variables involved in the analysis, the following hypotheses have been assumed:

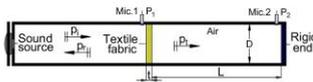


Fig. 4. Schematic diagram of the impedance tube used to measure specific airflow resistance by Ingard&Dear method. P_1 is the acoustic pressure of the transmitted wave.

- The padding technique has been used to dop the samples with MCCs of size from 1 μm to 8 μm . The MCCs size distribution is identical in all dopages [61].
- The measurement process and the number of MCCs adhered to fabrics do not change during the experiments. Washing [62], but also rubbing and vibration [63,64] of samples can reduce its MCCs concentration. In consequence, care has been taken in handling of doped samples so that they retain their acoustic properties during the measurement process.

3.1. Homogeneity of doping

In the process of doping the woven fabric, all the material is submitted to rapid immersion and it is squeezed. The quality of the treatment must ensure that the sample is homogeneously doped. This implies that the proportion and size of MCCs adhered to the doped material must be spatially distributed. It has been checked here the homogeneity of doping samples by analyzing the acoustic characteristics of different samples of the same cotton fabric. Cotton fabrics have been widely used in the textile industry for its biodegradable natural fiber, permeability, softness, comfort and high wettability [65]. CO fabric samples were obtained with a chemically and optically bleached. It is a twill weaved fabric with 115 g/m². Samples have been doped with the padding technique in a bath of distilled water solutions with a 25 g/L MCCs concentration. After doping and drying, sample have been cut in circular shape for the impedance tube characterization.

In Fig. 5, the sound absorption coefficient against frequency is shown for three samples of the same cotton material doped with the same technique and concentration of MCCs (25 g/L). Samples are measured in the impedance tube by the air-cavity method. It can be seen that in all cases, the differences in the sound absorption coefficient are smaller than 10% and always below the margin of error of the experimental method. These results ensure the homogeneity of the doping process.

3.2. Microcapsules concentration on fabrics

A quantitative study of the concentration of MCCs in doped fabrics is performed here. The lower and upper limits of the concentration values are chosen by the following criteria, respectively: 1) a minimum concentration is required to produce a significant effect on the acoustic behavior of the material and 2) the acoustic effect produced by doping MCCs is expected to saturate. In this

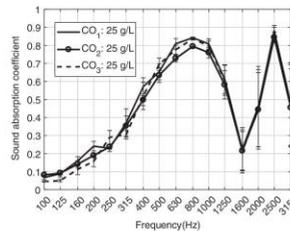


Fig. 5. Normal incidence sound absorption coefficient of three cotton samples measured in the impedance tube with an air-cavity of 10 cm. Samples are cut from the same textile fabric doped with the same technique and same concentration of MCCs (25 g/L) to test the repeatability and the homogeneity of the doping process.

way, doping samples with very high values of MCCs concentration do not change their acoustic behaviour. These two values (minimum and maximum) may depend on the type of fabric. However, for simplicity it is proposed here to analyze the effect of concentration with a single cotton sample as a reference and general guide for the rest of textile fabrics.

Four samples of CO with a thickness less than 1 mm have been considered for the study. One of the samples has not been treated (undoped CO). The other three have been doped with the padding technique in a bath of distilled water solutions with the different MCCs concentrations each: 25 g/L, 50 g/L and 100 g/L. Fig. 6 shows the sound absorption coefficient of the undoped and doped CO samples by using the air-cavity technique. In all cases, the maximum peak frequency is at 0.8 kHz. The undoped and all doped samples resonate at the same frequency. Thus, MCCs do not change the resonance properties of the material. The sound absorption coefficient is above $\alpha = 0.5$ near the first resonance, from 0.5 kHz to 1 kHz. In this frequency range, an increase of sound absorption is observed for all doped samples. The maximum difference in the sound absorption coefficient between doped and undoped samples is reached at the resonance. A similar behaviour is observed at the second resonance in 2.5 kHz. In CO fabric it is observed that a value of 25 g/L concentration of MCCs is enough to observe a noticeable acoustic effect. Doping CO fabrics changes the acoustic properties of the material. However, concentration of MCCs in CO fabrics leads to apparently no important differences in their sound absorption performance above 25 g/L. In fact, varying the mechanical and acoustical properties of a material by doping it, induces changes in sound damping, but the effect saturates with concentration of MCCs.

Table 1 shows the surface mass density and airflow resistivity of the same CO fabric doped with different concentrations of MCCs. Differences measured for both variables due to doping of fabrics are smaller than 10%. Moreover, the concentration of MCCs has not a direct correlation with the resistivity neither the mass density of the textile sample. Thus, variation of the sound absorption coefficient by doping CO fabrics is not due to the surface mass density (as the weight of MCCs is very small compared to the fabric) nor with the change of airflow resistivity (MCCs do not change the resistivity of fibers). As a consequence, other variables and mechanisms must be explored to explain the mechanical and acoustical effect of MCCs in doped fabrics.

3.3. Influence of textile woven fabrics

Textile woven fabrics are produced by interlacing warp and weft yarns. The warp consists of a multitude of separate parallel

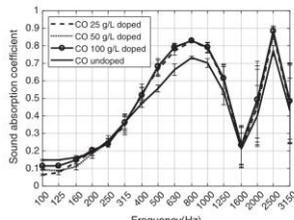


Fig. 6. Normal incidence sound absorption coefficient of the cotton textile fabrics with different MCCs concentration of doping with a 10 cm thick air-cavity.

yarns. The weft consists of a multitude of separate parallel yarns at right angle to the warp ones. In the doping process, the adhesion of MCCs to the textile fabric depends on the type of yarn and its interweaving. Doping has been proven in Section 3.2 to modify slightly the acoustic performances of CO fabrics. It is proposed to consider here the sound damping effect of doping different types of textile fabrics. A set of six different fabrics have been doped by the padding technique in a bath of distilled water with 100 g/L concentration. Table 2 shows the surface mass density and the thickness of the different textile fabrics analyzed. The airflow resistivity values of doped and undoped fabrics are presented with their standard deviation for the validity frequency range of the impedance tube. In general, less dense fabrics exhibit higher airflow resistivity. Same as for CO fabric, it can be seen that doping do not significantly varies the airflow resistivity of textile fabric.

Fig. 7 shows the results obtained for the sound absorption coefficient of the T4 sample at the end of the impedance tube. In this particular case, it was decided to study the textile fabric without any backing layer in order to observe the possible influence of the microcapsules on the sound absorption. Although differences due to doping are small, it can be observed that the sound absorption of doped textile fabrics is slightly higher in medium and high frequencies. In general, the damping effect increases slightly but gradually with frequency. No significant differences due to doping are observed at low frequencies below 0.3 kHz. Experimental measurements in this setup show that doping the samples does not change or slightly increases the absorption coefficient of fabrics, but in no case analyzed the absorption is reduced.

In order to enhance the damping effects of the samples, the normal incidence absorption coefficient is measured in the impedance tube in resonant conditions, that is, with an air-cavity of 10 cm. In this measurement configuration, sound damping is enhanced at the resonance and differences in the sound absorption coefficient of samples are increased. Fig. 8 shows the results for all the textile fabrics.

Depending on the effect of doping on the overall sound absorption at the resonance, fabrics can be grouped into three categories: 1) Fabrics that enhance the sound absorption by doping (T5 and T6), 2) Fabrics showing no acoustic effect by doping (T1 and T3) and 3) Fabrics that decrease the sound absorption by doping (T2 and T4). It is remarkable that there is not a clear relation between the results in both configurations: with rigid end and air-cavity. As a general rule, fabrics that are acoustically sensitive to doping have a higher damping at frequencies with higher sound absorption coefficient. In fact, at resonances the damping effect is the highest. The acoustic behavior of fabrics after doping is diverse (increase,

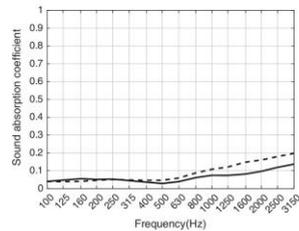


Fig. 7. Measurement of the sound absorption coefficient of the T4 textile fabric at the end of the impedance tube. The doped fabric are compared (dashed line) to undoped fabric (solid line).

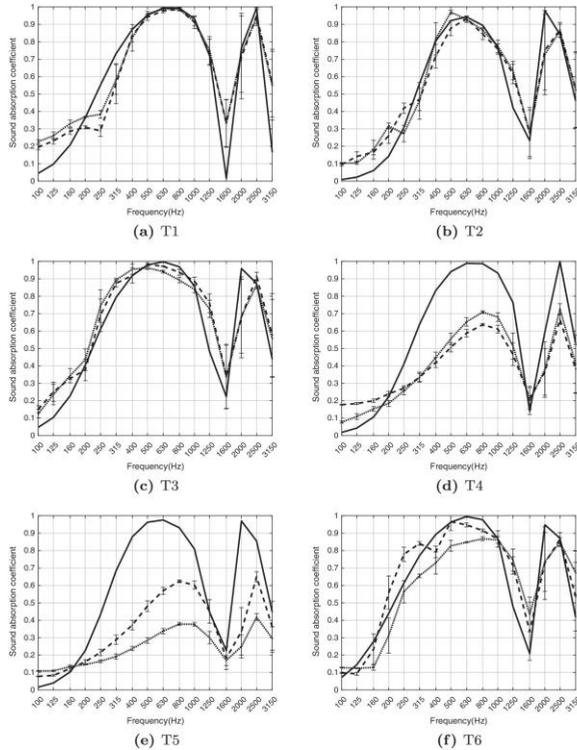


Fig. 8. Sound absorption coefficient measured in impedance tube of doped (dotted line) and undoped (dashed line) textile fabrics by using an air-cavity of 10 cm. Experimental results have been compared with theoretical estimation of Pieren's model (solid line). Differences in the model between doped and undoped fabrics are negligible. Both are represented with the same curve.

decrease or no change in absorption) and depends on the type of fabric that is considered.

Pieren's model [57] from Eq. 6 and Eq. 7 has been represented using the experimental values obtained for the specific airflow resistance, R_v , and the surface mass density, m_f . The prediction model is a good approximation for fabrics with high absorption coefficient (T1, T2, T3 and T6), but it fails for less absorbent fabrics (T4 and T5) where losses in the air-cavity are comparable to those in the fabric, so a hypothesis of the model is not fulfilled. The difference between the experimental and predicted sound absorption

values of these fabrics may be due to the fact that T4 has a different dye on both sides while T5 contains more irregularities because it has a fantasy thread that generates thickness changes. The small variations in the airflow resistivity and the surface mass density measured in doping fabrics do not explain the change measured in the absorption coefficient from the Pieren's model. Therefore, new theoretical models are necessary to understand the physical mechanisms underlying the effect of microparticles adhered to the yards of textile fabrics and check the airflow resistance measurement technique for textile fabrics.

4. Conclusions

In this manuscript, the sound absorption coefficient has been measured from 0.1 kHz to 3.15 kHz in order to determine the influence of the microcapsules adhered to the different woven fabrics.

A comparative analysis of cotton samples by using different doping percentage but with the same yarn density is presented. In this case, MCCs do not change the position of first resonance, but an increase in the sound absorption coefficient is observed in all doped samples.

The acoustic effect of MCCs adhered to six different fabrics is analyzed by measuring the normal incidence sound absorption coefficient in an impedance tube. Doping has a different acoustic effect (increases, decreases or does not change) depending on the concentration of MCCs, the type of doped fabrics and the experimental setup (sample at the end or with an air-cavity).

Pieren's model predicts the sound absorption coefficient of textile fabrics by using its specific airflow resistance and its surface mass density. But, this model fails in fabrics where losses into the air-cavity are comparable to those in the fabric. It can be observed that Pieren's model does not correctly describe the effect of the microcapsules adhered to the textile fabrics. In other words, with the presence of microcapsules in the woven fabrics, the description of the acoustic behavior is very complex due to the high number of variables involved in the analysis.

Results have been analyzed under the hypotheses of homogeneity of doping, the same number of MCCs adhered to fabrics and assuming that the MCCs size distribution is identical in all dopages.

This work is a first step to create new acoustic functional materials based on the increase and control of the acoustic damping with the use of MCCs and the results of this study evidence that it is possible to control the sound absorption by doping textile fabrics with different concentration of microcapsules.

Acknowledgements

Authors acknowledge the support of the Ministry of Economy and Innovation (MINECO) and European Union FEDER through project FIS2015-65998-C2-2 and by projects AICO/2016/060 and ACIF/2017/073 by Regional Ministry of Education, Culture and Sport of the Generalitat Valenciana and with the support of European Structural Investment Funds (ESIF-European Union).

References

- [1] Berglund B, Lindvall T, Schwela DH. World Health Organization. Guidelines for community noise. Geneva, Switzerland, WHO; 1999. Available online: URL: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise> (accessed on 19 September 2019).
- [2] Alexandre A, Barde J-P. Organization for Economic Cooperation and Development. Fighting Noise in 1990s. Eds. OECD Publications (Paris, France); 1991.
- [3] Environmental noise. Available online: URL: <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/environment-and-health/environmental-noise> (accessed on 19 September 2019).
- [4] Passchier-Vermeer W, Passchier WF. Noise exposure and public health. *Environ Health Perspect* 2000;108(1):123-31. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108s1123>.
- [5] Portal Español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Horizonte 2020. Available online: URL: <https://eshorizonte2020.es/> (accessed on 19 September 2019).
- [6] Portal Español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Horizonte 2030. Available online: URL: <https://h2030.es/> (accessed on 19 September 2019).
- [7] Ballagh KO. Acoustical properties of wool. *Appl Acoust* 1996;48(2):101-20. [https://doi.org/10.1016/S0951-882X\(95\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0951-882X(95)00024-8).
- [8] Benkriera H, Khan A, Horoshenkov KV. Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chem Eng Sci* 2011;66(18):4157-71. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.047>.
- [9] Maderuelo-Sanz R, Nadal-Gibert AV, Crespo-Amorón JE, Pares-García F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Appl Acoust* 2012;73:402-8. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.001>.

- [10] Del Rey R, Alba J, Arenas JP, Sanchis VJ. An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Appl Acoust* 2012;73(6):604-9. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.005>.
- [11] Liu D, Xia K, Chen W, Yang R, Wang B. Preparation and design of green sound-absorbing materials via pulp fibrous models. *J Compos Mater* 2012;46(4):399-407. <https://doi.org/10.1177/0021899311429881>.
- [12] Del Rey R, Ma, Bertó Carbó L, Alba Fernández J, Sanchis Rico VJ. Obtención de soluciones acústicas a partir de reciclado textil mediante tecnología. WET-LAD. Avances en ingeniería medioambiental, vol. 6, pp. 73-86 (book chapter); 2012. Editorial Marfil. ISBN 978-84-268-1637-5.
- [13] Arenas JP, Crocker MJ. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound Vib* 2010;44(7):12-7.
- [14] Rushforth IM, Horoshenkov KV, Mirafat M, Swift MJ. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Appl Acoust* 2005;66(6):731-49. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.10.006>.
- [15] Shoshani Y, Rosenhouse G. Noise insulating blankets made of textiles. *Appl Acoust* 1992;35(2):129-38. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(92\)90327-P](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90327-P).
- [16] Kang Y, Lee E, Lee K, Choi S, Shin E. Acoustic properties of sound-absorbing polyester fabrics woven with thick staple and thin draw textured yarn for use in interior decoration. *J Textile Inst* 2018;1-9:202-10. <https://doi.org/10.1080/00405009.2018.1508769>.
- [17] Bies DA, Hansen CH. Engineering noise control: theory and practice. 2nd ed. New York: Taylor and Francis; 2009.
- [18] Ogulata TT. Air permeability of woven fabrics. *J Textile Apparel* 2006;5(2):1-10.
- [19] Midha VK, Chavhan MdV. Nonwoven sound absorption textiles. *Int J Textile Fashion* 2012;2(2):45-55, Issue 2.
- [20] Pierce Allan D. Acoustics: an introduction to its physical principles and applications. New York: McGraw-Hill Book Co; 1981.
- [21] Pieren R, Schäffer B, Schoenwald S, Eggenschwiler K. Sound absorption of textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Text Res J* 2016;86(1):36-48. <https://doi.org/10.1177/0040517516673337>.
- [22] Sakagami K, Kiyama M, Morimoto M, Takahashi D. Detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane. *Appl Acoust* 1998;54(2):93-111. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00085-6).
- [23] Kang J, Fuchs HV. Predicting the absorption of open wave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space. *J Sound Vib* 1999;220(5):905-20. <https://doi.org/10.1006/jsv.1998.1972>.
- [24] Ingard KU. Notes on sound absorption technology. Poughkeepsie, NY: Noise Control Foundation; 1994.
- [25] Shoshani Y, Rosenhouse G. Noise absorption by woven fabrics. *Appl Acoust* 1990;30(4):321-33. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(90\)90061-5](https://doi.org/10.1016/0003-682X(90)90061-5).
- [26] Na Y, Lancaster J, Casali J, Cho G. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Text Res J* 2007;77(5):330-5. <https://doi.org/10.1177/00405175073078748>.
- [27] Soltani P, Zerrebini M. The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics. *Text Res J* 2012;82(9):875-82. <https://doi.org/10.1177/0040517511402121>.
- [28] Ekici B, Kertli A, Kizik H. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. *Arch Acoust* 2012;37(4):515-20. <https://doi.org/10.2478/v10168-012-0052-1>.
- [29] Resnack R, Del Rey R, Alba J, Arbat G, Espinach FX, Mutgé P. Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated gypsum boards. *Constr Build Mater* 2015;77:124-9. <https://doi.org/10.1016/j.constrbuildmat.2014.12.041>.
- [30] Naghmoschi I, Espinach FX, Del Rey R, Alba J, Souti S, Mutgé P. Comparison of the soundproofing characteristics of olive stone filled polypropylene, gypsum boards and wood fiber reinforced polypropylene. *Cellulose Chem Technol* 2016;50(3-4):411-5.
- [31] Padhye R, Nayak R. Acoustic Textiles. Textile Science and Clothing Technology. Melbourne, Victoria, Australia, Springer; 2016.
- [32] del Rey R, Alba J, Blanes M, Marco B. The acoustic absorption of textile curtains on the function of the fullness. *Materiales de Construcción* 2013;63(312):569-80. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.05512>.
- [33] Hanna YI, Kandil MM. Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Appl Acoust* 1991;34(4):281-91. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(91\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0003-682X(91)90011-5).
- [34] Houtsma AJM, Martin HJ, Hak CJM, van Donselaar CJ. Measuring the effectiveness of special acoustic provisions in a concert hall. *J Acoust Soc Am* 1996;100(4):2803. <https://doi.org/10.1121/1.410552>.
- [35] Chevillotte F. Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Appl Acoust* 2012;73(1):56-60. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.07.005>.
- [36] Segura-Alcaraz P, Segura-Alcaraz J, Montava I, Bonet Aracil MÁ. The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. *Autex Res J* 2018;18(3):269-80. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0006>.
- [37] Nelson G. Microencapsulation in textile finishing. *Rev Progr Color Related Topics* 2001;31(1):57-64.
- [38] Bonet Aracil MÁ, Monllor P, Capablanca L, Gisbert J, Díaz P, Montava I. A comparison between padding and bath exhaustion to apply microcapsules onto cotton. *Cellulose* 2015;22(3):2117-27. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0600-8>.

- [39] Monllor P, Capablanca L, Gisbert J, Díaz P, Montava I, Bonet MÁ. Improvement of microcapsule adhesion to fabrics. *Text Res J* 2010;80(7):631–5. <https://doi.org/10.1177/0040517509346444>.
- [40] Holme I. Innovative technologies for high performance textiles. *Color Technol* 2007;129(2):59–73. <https://doi.org/10.1111/1478-4408.2007.00064.x>.
- [41] Ghosh SK. Functional coatings and microencapsulation: a general perspective. *Funct Coat* 2006;1–28. <https://doi.org/10.1002/3527608478.ch1>.
- [42] Deacy PB. Microencapsulation and related drug processes. United States, New York: Marcel Dekker; 1984, vol. 20, pp. 234–237.
- [43] Atiénzar R, Bonet MÁ, Payá J, del Rey R, Picó R. Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules. *Revista de Acústica* 2019;50(3 y 4):19–21. ISSN: 2254-2396.
- [44] Aggarwal AK, Dayal A, Kumar N. Microencapsulation processes and applications in textile processing. *Colourage* 1998;45(8):15–24.
- [45] Zuckerman J, Pushaw R, Perry B, Wyner D. Fabric coating composition containing energy absorbing phase change material; 2001. US Patent 6, 207, 738.
- [46] Ono A, Fuse T, Miyamoto O, Makino S, Yamato Y, Kametani S, Tokura S, Tanaka H, Ito T, Nakao H, Tokuoka S, Takeda T. Fibrous structures having a durable fragrance and a process for preparing the same; 1990. US Patent 4, 917, 520.
- [47] Sanson R, McKinney J, Russell J. Fabrics with insect repellent tent fabric; 1993. US Patent 5, 198, 287.
- [48] Gisbert J, Bañez F, Bonet M, Monllor P, Díaz P, Montava I. Increasing hydration of the epidemis by microcapsules in sterilized products. *J Appl Polym Sci* 2009;113(4):2282–6. <https://doi.org/10.1002/app.30210>.
- [49] Zhou H, Li B, Huang C. Sound absorption characteristics of polymer micro-particles. *J Appl Polym Sci* 2006;101(4):2675–9. <https://doi.org/10.1002/app.23911>.
- [50] Zhou H, Li B, Huang C. Sound absorption behavior of multiporous hollow polymer micro-spheres. *Mater Lett* 2006;60(29–30):3451–6. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.030>.
- [51] Cheng F, Lu P, Ren P, Chen J, Ou Y, Lin M, Liu D. Preparation and properties of foamed cellulose-polymer microsphere hybrid materials for sound absorption. *Bioresources* 2016;11(3):7394–405. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7394-7405>.
- [52] Zhi C, Longa H. Sound absorption properties of syntactic foam reinforced by warpknitted spacer fabric. *Cell Polym* 2016;35(5):271–86. <https://doi.org/10.1177/026248921603500503>.
- [53] Monllor P, Sánchez L, Cases F, Bonet MÁ. Thermal behavior of microcapsulated fragrances on cotton fabrics. *Text Res J* 2009;79(4):365–80. <https://doi.org/10.1177/0040517508097520>.
- [54] Hong K, Park S. Melamine resin microcapsules containing fragrant oil: synthesis and characterization. *Mater Chem Phys* 1999;58(2):128–31. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(98\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(98)00263-6).
- [55] Ré MI, Biscans B. Preparation of microspheres of ketoprofen with acrylic polymers by a quasi-emulsion solvent diffusion method. *Powder Technol* 1999;101(2):120–33. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(98\)01614-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)01614-6).
- [56] Chen Y, Jiang N. Carbonized and activated non-wovens as high-performance acoustic materials. *Text Res J* 2007;77(10):785–91. <https://doi.org/10.1177/0040517507080921>.
- [57] Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air-cavity. *Text Res J* 2012;82(9):864–74. <https://doi.org/10.1177/0040517511429564>.
- [58] Pieren R. Sound Absorption Modelling of Thin, Lightweight Curtains. *Proceedings – European Conference on Noise Control*; 2012.
- [59] ISO 10534-2. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method. *Acoustics*; 1998.
- [60] Ingard KU, Dear TA. Measurement of acoustic flow resistance. *J Sound Vib* 1985;103(4):567–72. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(85\)80024-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(85)80024-9).
- [61] Azziz N, Ladhari N, Majdoub M. Elaboration and characterization of polyurethane-based microcapsules; application in textile. *Asian J Textile* 2011;1(3):130–7. <https://doi.org/10.3923/aj.2011.130.137>.
- [62] Bonet Aracil MÁ, Bou-Belda E, Monllor P, Gisbert J. Binder effectiveness of microcapsules applied onto cotton fabrics during laundry. *J Textile Inst* 2016;107(3):300–6. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1028096>.
- [63] Selda Tozım M, Alay Aksoy S. Investigation of tactile comfort properties of the fabrics treated with microcapsules containing phase change materials (PCMs microcapsules). *J Textile Inst* 2015;107(9):1203–12. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1099174>.
- [64] Monllor P, Bonet MÁ, Cases F. Characterization of the behaviour of flavour microcapsules in cotton fabrics. *Eur Polymer J* 2007;43(6):2481–90. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.04.004>.
- [65] Gao D, Lyu L, Lyu B, Ma J, Yang L, Zhang J. Multifunctional cotton fabric loaded with Ce doped ZnO nanorods. *Mater Res Bull* 2017;89:102–7. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.01.030>.



Article

Sound Absorption Properties of Perforated Recycled Polyurethane Foams Reinforced with Woven Fabric

Roberto Atiénzar-Navarro ^{1,*}, Romina del Rey ², Jesús Alba ², Víctor J. Sánchez-Morcillo ¹ and Rubén Picó ¹

¹ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, 46730 Valencia, Spain; victorsm@fis.upv.es (V.J.S.-M.); rpico@fis.upv.es (R.P.)

² Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, 46730 Valencia, Spain; roderey@fis.upv.es (R.d.R.); jesalba@fis.upv.es (J.A.)

* Correspondence: roatna@doctor.upv.es; Tel.: +3466299905043143

Received: 17 January 2020; Accepted: 1 February 2020; Published: 10 February 2020



Abstract: The acoustic properties of recycled polyurethane foams are well known. Such foams are used as a part of acoustic solutions in different fields such as building or transport. This paper aims to seek improvements in the sound absorption of these recycled foams when they are combined with fabrics. For this aim, foams have been drilled with cylindrical perforations, and also combined with different fabrics. The effect on the sound absorption is evaluated based on the following key parameters: perforation rate (5% and 20%), aperture size (4 mm and 6 mm), and a complete perforation depth. Experimental measurements were performed by using an impedance tube for the characterization of its acoustic behavior. Sound absorption of perforated samples is also studied—numerically by finite element simulations, where the viscothermal losses were considered; and analytically by using models for the perforated foam and the fabric. Two textile fabrics were used in combination with perforated polyurethane samples. Results evidence a modification of the sound absorption at mid frequencies employing fabrics that have a membrane-type acoustic response.

Keywords: sound absorption; textile fabrics; recycled polyurethane foam; finite element

1. Introduction

Nowadays, society demands a greater sensitivity towards compatibility between progress and respect for the environment. Favoring the regeneration and sustainability of the ecosystem of the territory is only possible with proper management and responsible and efficient use of natural resources. Researchers are focusing on this idea as written in the Horizon2020 Challenge 5 and by the Sustainable Development Goals (SDGs). In particular, the SDG 12 of the new European program called Horizon2030, indicates that the use of sustainable raw materials with a lower carbon footprint and secondary materials are crucial. These green recycled materials are compatible from the environmental point of view and may be an alternative to address noise and vibration issues.

According to the World Health Organization (WHO) [1], noise pollution is now gaining global attention because it has become a major world health problem affecting everyday life of people. Exposure to excessive noise may cause undesired physiological and psychological effects on humans [2].

Some adverse effects on human health caused by the long-term exposure to high levels of unwanted sound are hearing loss, stress, fatigue, insomnia, high blood pressure, or serious cardiovascular disorders such as heart attacks. Hence, there is a need to investigate the control of noise pollution effectively.

Numerous previous studies can be found in the literature concerning the use of materials obtained from recycled products for noise mitigation. A sustainable use of natural resources is pursued by developing new materials using waste as raw material, reusing them or recycling them in part or in its

whole. Eco-materials with absorbent acoustic properties—like recycled plastic bottles (PET), natural fibers such as kenaf [3], coconut [4], sheep wool [5], or cotton [6]—have been proposed. Other porous materials obtained from the recycling of textile waste are cellular materials (foams), like recycled polyurethane (RPU) [7], that also show interesting acoustic properties [8]. They can be considered as an alternative to classical materials.

RPU is an eco-friendly polymer obtained from manufacturing processes of the textile industry and it is widely used as sound absorbing material due to its high efficiency on sound absorption at mid and high frequencies. In [9], how to predict the acoustic behavior of RPU samples by using two different empirical models is presented. More recently, a novel material was presented [10] based on the combination of polyurethane foam and bamboo leaves particles by using different contents with the aim to improve acoustic properties.

Theoretical models are used to describe the acoustic propagation and absorption in different materials [11–13]. In 1994, Voronina presented in [14] an empirical model for homogeneous materials that takes into account the structural characteristic of fibrous material. In 2005, Umnova et al. proposed in [15] an acoustic method in order to estimate the porosity and tortuosity of rigid-porous materials.

The perforation of foams can change and improve the sound absorption. Among the contributions of the last decade, Zhang et al. investigated in [16] the influence of the pore cell size and the open porosity of RPU samples in their sound absorption coefficient. Tiuc et al. examined in [17] the influence of the perforation on the sound absorption coefficient and they accounted for an increase of the sound absorption coefficient at frequencies above 1200 Hz by using perforated samples.

Drilling technologies are used in other materials as micro-perforated panels (MPP). In this context, Chevillotte et al. investigated in [18] the influence of the microstructural parameters as perforation diameter, pore distribution, and pore diameter on the sound absorption coefficient of the perforated aluminum foam sample. Lou et al. showed in [19] the influence of the aperture size, the perforation rate, perforation depth, and back air-cavity on the flexible perforated composite plate. In both studies, the results revealed that perforation could enhance the sound absorption. Lin et al. [20] studied perforated rigid PU foam plates. Results showed that the sound absorption of perforated plates slightly increased when the perforation rate decreases. Lately, Xia et al. presented their work based on foam macrostructures in [21] where they investigated the effects of different types of perforation and air-cavities on the sound absorption coefficient. The results revealed that the foams with half-hole presented a good sound absorption behavior for frequencies greater than 2500 Hz.

With the goal to describe the effects of perforation with this type of materials, different models have been proposed. In 2001, Atalla et al. presented in [22] a 3-D numerical finite element model in order to predict the absorption coefficient of non-homogeneous porous material. In 2003, Olny and Boutin [23] used the homogenization method for periodic structures (HPS) and the simplified model proposed by Zwikker and Kosten [24] in order to study the wave propagation in a porosity media with two periodic interconnected network of pores. The results showed the effect of some design parameters (meso-porosity, type of lattice, size of the pores) on the sound absorption. In 2005, Sgard et al. analyzed in [25] models for predicting the acoustic wave transmission of double porosity media and they investigated the effect of the aperture size, perforation rate, and air-cavities on the sound absorption coefficient. Results showed a good agreement between the measurements and the models. Recently, Carbajo et al. used in [26] the double porosity media to acoustically model rigid porous materials.

New acoustic solutions using thin fiber membranes in combination with porous materials have been investigated recently in order to modify the acoustic absorption of the system fabric-RPU. In 2012, Ekici et al. presented in [27] a sound absorbent material made of tea-leaf fibers and luffa cylindrica with RPU. The number of tea-leaf fibers is shown to increase the sound absorption coefficient for all frequency ranges. In 2014, del Rey et al. studied in [28] the sound absorption improvements that can be achieved with the combination of nanopaper and different types of base substrates. Results showed that the nanopaper enhances the acoustic absorption properties of fibrous and porous materials at

mid and high frequencies. Segura-Alcaraz et al. demonstrated in [29] the influence of microfibrer fabric placed on the top of a nonwoven structure. Results showed that the selectivity of the absorption depends on the type of fabric used.

This work investigates the normal incidence sound absorption coefficient in different configurations. These configurations are composed of a layer of thin fabric acting as a membrane on the top of the meso-perforated porous materials. These foams were perforated according to two design parameters (perforation rate and aperture size of the holes). For this study, perforations were carried out using two different technologies: laser and milling machine. Compared to previous works of other authors, this paper focuses on controlling the sound absorption using different textile fabrics in the system membrane—RPU. Results were compared to those obtained numerically and analytically with a good agreement between them.

This paper is organized as follows. Section 2 briefly describes the theoretical background, where different models have been developed in order to study the acoustic properties of both RPU foam and textile fabric. The acoustic properties of porous media are described by the Johnson–Champoux–Allard model [12,13]. The Olny and Boutin [23] model is used for double porosity media. Pieren’s model [30] is used to predict the acoustic behavior of the thin membranes. In Section 3, the numerical model based on finite elements is introduced to validate the theoretical model and the experimental results. The perforated foam fabrication and the experimental setup using the impedance tube are detailed in Section 4. In Section 5, the experimental, theoretical and numerical results are compared and discussed. Finally, as a result of this work, Section 6 includes the most relevant conclusions.

2. Theoretical Background

In this work, different theoretical models are used to predict the properties of the different materials under investigation. These models are reviewed in this section.

2.1. Johnson–Champoux–Allard Model

Johnson–Champoux–Allard (JCA) proposed in [12,13] a model to describe the acoustic behavior of porous media throughout the frequency range. Here, this model is used to describe the dissipative viscothermal effects of the RPU foam. The expression for the complex dynamic density (ρ_{JCA} , kg/m³) includes the visco-inertial effects (Equation (1)) and the expression for the complex bulk modulus (K_{JCA} , Pa) includes the thermal effects (Equation (2)). Both equations involve parameters such as airflow resistivity, two characteristic lengths, porosity and tortuosity as

$$\rho_{JCA} = \frac{\alpha_{\infty}\rho_0}{\varnothing} \left(1 + \frac{\sigma\varnothing}{j\omega\rho_0\alpha_{\infty}} \sqrt{1 + \frac{4j\omega\alpha_{\infty}^2\mu\rho_0}{\sigma^2\Lambda^2\varnothing^2}} \right) \tag{1}$$

$$K_{JCA} = \frac{\gamma P_0}{\varnothing} \left(\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\mu}{j\omega\Lambda'^2 N_{Pr}\rho_0} \sqrt{1 + \frac{j\omega\Lambda'^2 N_{Pr}\rho_0}{16\mu}} \right)^{-1} \right) \tag{2}$$

In Equations (1) and (2), the physical parameters used in this work for the properties of air are the dynamic viscosity $\mu = 1.84 \cdot 10^{-5}$ Pa·s, the air density $\rho_0 = 1.213$ kg·m⁻³, the Prandtl number $N_{Pr} = 0.708$ at normal atmospheric pressure and temperature, and the speed of sound in air $c_0 = 343$ m/s. The macroscopic parameters of the porous media are porosity \varnothing , tortuosity α_{∞} , airflow resistivity σ (Pa·s·m⁻²), viscous characteristic length Λ , and thermal characteristic length Λ' of the porous material are defined in the next section.

Estimation of JCA Parameters

Four parameters involved in JCA modelling (porosity, tortuosity, viscous, and thermal characteristic length) have been estimated in order to predict the complex characteristic impedance, Z_c ,

and the complex wave number, k . These parameters are necessary to describe the acoustic behavior of the porous media.

Porosity (\varnothing) is defined as the ratio of the volume of holes over the total volume. For homogeneous materials, it can be estimated by using the Voronina model (1994) [14]

$$\varnothing = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_f} \tag{3}$$

where ρ_m is the bulk density of the porous media and ρ_f is the density of the fibers.

Tortuosity (α_{∞}) describes the influence of the internal structure of porous sound absorbing materials for the prediction of the acoustical properties. According to [15], it relates to porosity as

$$\alpha_{\infty} = 1 + (1 - \varnothing)(2\varnothing)^{-1} \tag{4}$$

Viscous characteristic length (Λ) is a parameter used to describe the dissipative visco-inertial effects [12], which is related to the smallest pore size. Allard and Champoux introduced in [13] a thermal characteristic length (Λ') to characterize the thermal dissipation effect, which is related to the largest pore size and can be estimated as

$$L = \frac{4\rho_m}{\pi\rho_f d^2} \tag{5}$$

$$\Lambda' = 2\Lambda = \frac{1}{\pi RL} \tag{6}$$

where L is the total length of the fiber per unit volume of the material, d is the mean fiber diameter, $R = d/2$, ρ_m is the bulk density of the porous medium and ρ_f is the density of the fibers.

2.2. Olny and Boutin Model

Olny and Boutin method [23] is used when meso-perforated or double porosity materials with two periodic interconnected networks of pores are considered. Homogenization method for periodic structures (HPS) is used to describe the wave propagation in the double porous media from the macroscopic point of view. The complex dynamic density and the complex bulk modulus of the homogeneous medium are given by

$$\rho_{dp} = \left(\frac{1 - \varnothing_M}{\rho_{fCA}} + \frac{1}{\rho_M} \right)^{-1} \tag{7}$$

$$K_{dp} = \left(\frac{1 - \varnothing_M}{K_{fCA}} + \frac{1}{K_M} \right)^{-1} \tag{8}$$

where \varnothing_M is the meso-porosity. The scale ratio between the mesopores and the micropores is low ($\approx 10^{-3}$). The complex dynamic density and the complex bulk modulus of the cylindrical holes of circular cross-section can be computed using the simplified model proposed by Zwikker and Kosten [24]

$$\rho_M = \frac{\rho_0}{\varnothing_M \left(1 - \frac{2j_1(s\sqrt{-j})}{s\sqrt{-j_0}(s\sqrt{-j})} \right)} \tag{9}$$

$$K_M = \frac{\gamma P_0}{\varnothing_M \left(\gamma - (\gamma - 1) \left(1 - \frac{2j_1(N_{Pr}s\sqrt{-j})}{N_{Pr}s\sqrt{-j_0}(N_{Pr}s\sqrt{-j})} \right) \right)} \tag{10}$$

where $s = R_1 \left(\frac{\omega \rho_0}{2\mu} \right)^{1/2}$, R_1 is the radius of the circular cross-section (cylindrical mesopores) and ω is the angular frequency, J_0 and J_1 are the Bessel functions of the first kind and zero-th and first order, respectively.

Finally, the frequency-dependent complex characteristic impedance (Z_c , Pa·s/m) and the complex wave number (k , rad/m) expressions can be estimated as

$$Z_c = \sqrt{\rho_{dp} k_{dp}} \tag{11}$$

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho_{dp}}{k_{dp}}} \tag{12}$$

These two magnitudes allow to calculate the surface impedance of a rigidly backed sample of thickness t .

$$Z_S = -jZ_c \coth(kt) \tag{13}$$

Finally, the reflection and absorption coefficients are calculated from Equation 13 as

$$r = \frac{Z_S - \rho_0 c_0}{Z_S + \rho_0 c_0} \tag{14}$$

$$\alpha_n = 1 - |r|^2 \tag{15}$$

2.3. Pieren's Model

The Pieren model [30] is used to calculate the impedance of a fabric. In this model, textile fabric can be considered acoustically thin compared to the wavelength of sound. In this work, this condition is fulfilled for both fabrics in the whole working frequency range. The acoustic impedance of the fabric is defined as

$$Z_{tex} = \frac{j\omega m_f R_s}{j\omega m_f + R_s} = \frac{R_s (\omega m_f)^2}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} + j \frac{R_s^2 \omega m_f}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} \tag{16}$$

where m_f is the surface mass density and R_s is the specific airflow resistance.

The surface impedance of the complete absorbent structure (Z_{in}) can be characterized by the impedance of the textile fabric (Z_{tex}) plus the impedance of the polyurethane foam (Z_S), leading to

$$Z_{in} = Z_{tex} + Z_S = \frac{R_s (\omega m_f)^2}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} + j \frac{R_s^2 \omega m_f}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} - jZ_c \coth(kt) \tag{17}$$

2.4. Delany and Bazley Model

This semi-empirical model describes the acoustic behavior in terms of several non-intrinsic physical parameters, which allow to minimize propagation errors on the basis of experimentally obtained parameters [11].

This involves obtaining the coefficients C_i ($1 \leq i \leq 8$) that best fit the equations presented for the materials under study

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-C_6} \right] \tag{18}$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-C_8} \right] \tag{19}$$

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-C_2} \right] \tag{20}$$

$$Z_i = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-\alpha_i} \right] \quad (21)$$

where α and β are the real and imaginary part of the propagation constant Γ , Z_R , and Z_i are the real and imaginary part of the characteristic impedance Z , σ is the airflow resistivity in the direction of wave propagation and f is the working frequency range.

From the characteristic impedance Z and the propagation constant Γ , it is possible to obtain the sound absorption coefficient by using Equations (13) and (15).

The experimental data, both the normal incidence sound absorption coefficient (α_n) and the airflow resistivity (σ) are necessary to obtain the C_i parameters of the adjustment. An iterative method based on reducing the function of the quadratic error has been used in order to obtain the coefficients that best describe the acoustic behavior of the samples under study,

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i})^2 \quad (22)$$

where $\alpha_{n,i}$ represents the normal incidence sound absorption coefficient values, measured for a textile fabric at i -th frequency and $\hat{\alpha}_{n,i}$ is the estimated previous value from Equations (18)–(21).

The coefficients follow from the minimization of the error function, i.e., by solving the system

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial C_i} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i}) \frac{\partial \hat{\alpha}_{n,i}}{\partial C_i} = 0, \quad 1 \leq i \leq 8 \quad (23)$$

3. Numerical Model for Porous Media

A numerical study using the Finite Element Method (FEM) is also performed to validate the theoretical model and the experimental results. This method solves the Helmholtz equation

$$\nabla^2 \hat{p}(\omega) + k^2 \hat{p}(\omega) = 0 \quad (24)$$

in a discretized domain, k is the lossless wave number ($k = \omega/c$), $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$ represents the Laplacian and \hat{p} is the complex amplitude of the acoustic pressure.

The sound source is modeled by a plane wave of unit amplitude. The frequency range used in the numerical model is the same as in the experimental method, from 400 Hz to 3150 Hz. The mesh size (Δx) is chosen to ensure convergence, that is, $\Delta x < \lambda_{\min}/8 \approx 14$ mm.

The physical magnitude analyzed is the total sound pressure field (p_t) in the frequency domain, which is determined by the superposition of the background pressure field (p_b) and the dispersed pressure field (p), expressed as $p_t = p_b + p$.

Equation (24) is lossless, but may be easily extended to the lossy case. Viscothermal losses of air in the impedance tube are taken into account using the following wave number and impedance expressions [31]:

$$k = \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{\kappa}{s} (1 + (\gamma - 1)/\chi) \right) \quad (25)$$

$$Z = \frac{\rho_0 c_0}{s} \left(1 + \frac{\kappa}{s} (1 - (\gamma - 1)/\chi) \right) \quad (26)$$

being $s = R/\delta$, where R is the inner radius considered in each perforation and $\delta = \sqrt{2\mu/\rho_0\omega}$ is the thickness of the viscous boundary layer, μ is the viscosity of air, $\kappa = (1 + i)/\sqrt{2}$ is the thermal conductivity, γ is the heat capacity of air, and $\chi = \sqrt{Pr}$ is the square root of the Prandtl number.

4. Materials and Methods

4.1. Polyurethane Foam and Textile Fabric Materials

The recycled polyurethane foam (RPU) of thickness $t = 2 \pm 0.15$ cm used is a porous cellular absorbent material and it is made from the residues of the manufacturing processes in the textile industry without chemical treatment inflicting less damage to environment (see Figure 1). These foams present good sound absorbing properties and they are widely used in several applications as absorbent materials.



Figure 1. Recycled polyurethane foam used in this work.

In our study, samples of RPU will be covered with two different woven textile fabrics with different yarn densities (T1 and T2, see Figure 2) to evaluate the acoustic performance of the coupled system. It should be noted the reduced thickness of these textiles (less than one cm). Both woven textile fabrics T1 and T2 used are flexible woven materials consisting of a network of synthetic fibers made of textured PET polyester increasing the covering capacity. This kind of fabrics possess excellent properties such as low surface yarn density, low production cost, and surface inhomogeneity. The one referenced as T1 is comprised of polyester yarns and a weft yarn of blue chenille with a ratio one chenille/two polyester, which creates a bubble texture increasing the thickness. The other fabric labeled as T2 is comprised of polyester yarns and a yarn of pink chenille.



Figure 2. Surface and the warp/weft pathways of the textile materials is analyzed with microscope imaging technique with 16X magnifications. **left:** T1; **right:** T2.

4.2. Drilling Configurations and Methods

The perforated RPU samples were performed in FabLab Océano Naranja (València, Spain) and they were drilled by using two different technologies: a CNC milling machine and a CNC LaserCL2010. CNC is a computer numerical control, which consists of a programmed code with instructions to make precise movements. The CNC machine interacts with a computer equipped with drawing software that transforms the numerical code into Cartesian coordinates. The CNC machines work with a very high degree of precision (tolerance of ± 0.01 mm in every cut) transforming a virtual object (CAD model) into a real one.

RPU foams were perforated with different aperture sizes (D) and different perforation rates (\varnothing_M) considering a complete perforation depth in all the samples. The three-axis CNC milling machine

allows the subtraction of the material when it is drilled (see Figure 3a), while the laser method concentrates light on the surface of the sample and burns it (see Figure 3b).

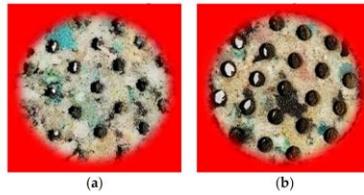


Figure 3. Specification of drilled RPU foams: $D = 6$ mm and $\varnothing_M = 20\%$. (a) milling machine method; (b) laser method.

Figure 4 shows the Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) images with mod. ZEISS ULTRA55 used to visualize details with high resolution down to $100 \mu\text{m}$ of the hole surfaces of the perforated RPU foams and to assess the condition of the samples after the drilling process. These foams were tested with suitable accelerating voltage of 2 kV, a working distance up to 10 mm, a $10 \mu\text{m}$ lens aperture size and $50\times$ magnifications.

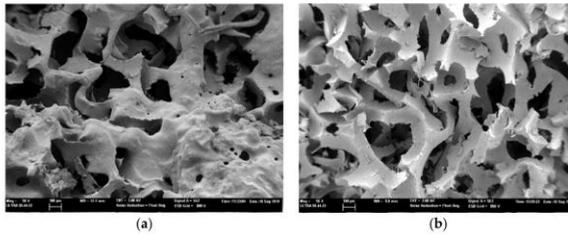


Figure 4. Electron microscopy images of surface of the perforated foam sample with (a) laser and (b) milling machine.

Figure 4 also provides information about the effect of the surface roughness of the RPU sample. It can be seen that the CNC laser drilling technology heats the foam material by applying focused laser energy, causing it to vaporize and producing a smooth surface throughout the holes (Figure 4a). The CNC milling technology is based on a subtraction process and it shows higher roughness around the drilled holes than the laser method (see Figure 4b).

Samples have been drilled with different configurations in periodic lattices. All samples are drilled with circular holes of diameter D arranged in square lattice with lattice constant a , which corresponds to the distance between two adjacent cells (see Figure 5).

The perforation ratio (\varnothing_M) is defined as the ratio between volume occupied by the holes and the total volume of the sample,

$$\varnothing_M = \frac{n(D)}{4(R)}^2 \cdot 100 \quad (27)$$

where n is the number of holes, D is the diameter of the holes and R is the radius of the samples.

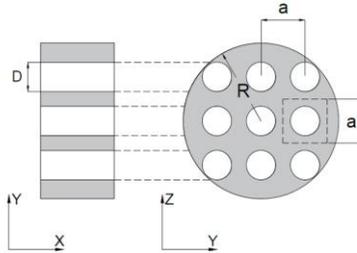


Figure 5. General configuration of 2D periodic perforated samples arranged in a square lattice with lattice constant a . D is denoted as the diameter of the perforated hole and R is the radius of the foam sample.

In this work, two values of \varnothing_M (5% and 20%) and two values of D (4 mm and 6 mm) have been measured, leading to four different configurations as shown in Table 1. The diameter of all samples is 4 cm. A schematic representation (real scale) of the top view of the perforated samples are shown in Figure 6.

Table 1. Detailed parameters of the four drilling configurations measured

Configuration	\varnothing_M real (%)	\varnothing_M approx. (%)	D (mm)	a (mm)	No. of holes
a)	5	5	4	15.8	5
b)	4.5	5	6	23.8	2
c)	21	20	4	7.9	21
d)	20.25	20	6	11.9	9

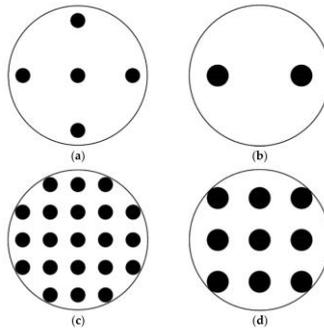


Figure 6. Four different drilling configurations have been measured: (a) $D = 4$ mm, $\varnothing_M = 5\%$, $a = 15.8$ mm; (b) $D = 6$ mm, $\varnothing_M = 5\%$, $a = 23.8$ mm; (c) $D = 4$ mm, $\varnothing_M = 20\%$, $a = 7.9$ mm; and (d) $D = 6$ mm, $\varnothing_M = 20\%$, $a = 11.9$ mm. The radius of all samples is $R = 2$ cm.

4.3. Experimental Methodology

A campaign of measurements of both perforated polyurethane foams and textile fabrics based on impedance tubes have been carried out in order to characterize them acoustically as absorbers by using two classical techniques: one based on measuring the sound absorption coefficient at normal incidence as described in [32] and other based on measuring the specific airflow resistance as described in [33]. The samples of RPU and textile fabrics for the normal incidence sound absorption coefficient and the airflow resistivity test were cut circularly with the same impedance tube diameter of ≈ 4 cm. These samples are geometric circular cylinders and both faces are parallel and flat. Also, these samples are fitted easily to the sample holder avoiding an improper adjustment. In the fabric-RPU configuration, the woven fabric is attached to the foam by using sewing needles, whose thickness is less than ≈ 1 mm and do not significantly affect the acoustic measurements.

4.3.1. Sound Absorption Coefficient

The sound absorption coefficient (α_n) as a function of the frequency was measured by using the transfer function mode described in the Standard ISO 10534-2:1998 [32]. This test method requires an impedance tube device, a data acquisition system (Pulse LabShop v.22.2.0.197), two microphones ($\frac{1}{2}$ -inch free-field Brüel and Kjær pressure microphones – type 4190), a PC and a sound source (Beyma CP800Ti loudspeaker). The sound source generates a plane wave inside the impedance tube hitting the material perpendicularly. The impedance tube is a rigid, methacrylate, smooth, transparent, and airtight duct with circular cross section of 4 cm (see a scheme in Figure 7), which meets the specifications described in the standard [32].

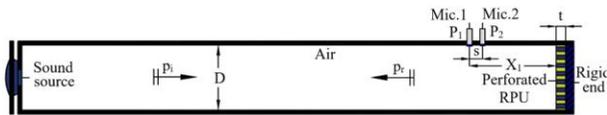


Figure 7. Diagram of the impedance tube used to measure the sound absorption at normal incidence. D is the inner diameter of the tube ($D = 4$ cm); t is the thickness of the sample, X_1 is the distance between Mic.1 and the sample; p_i is the acoustic pressure of the incident wave; p_r is the acoustic pressure of the reflected wave; and s is the separation between both microphones ($s = 3.2$ cm).

Measurements cover the frequency range from 400 to 3150 Hz. These frequencies are determined by the restrictions imposed by the distance between both microphones, the precision of the signal processing equipment and the diameter of the impedance tube. Each test of the sound absorption coefficient is performed three times for each sample always using the same mounting conditions in order to reduce the dispersion error produced by the inhomogeneity of the samples. The material must fit perfectly to the sample holder without compressing it. The test instrumentation is connected as indicated in Figure 7.

When using the two microphone technique, there is a mismatch between the microphones in the determination of the transfer function. To correct it, the measurement is repeated with the channels exchanged obtaining the transfer function H'_{12} and H''_{12} in order to calculate the calibration factor using the Equation (28)

$$H_c = \left(H'_{12} / H''_{12} \right)^{\frac{1}{2}} = |H_c| e^{i\phi_c} \tag{28}$$

where ϕ_c is the corrected phase angle.

From a MATLAB function implemented for this case, the corrected transfer function, H_{12} , which describes the total acoustic field, can be obtained as

$$H_{12} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} = \frac{e^{jk_0x_2} + re^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + re^{-jk_0x_1}} \quad (29)$$

The complex acoustic transfer function (H_{12}) of the signals in both microphones is determined in order to obtain the complex acoustic pressure reflection coefficient for a plane wave at normal incidence (r). It represents the complex ratio of the pressure amplitude of the reflected wave and the incident wave, as

$$r = \frac{H_I - H_R}{H_I + H_R} e^{2jk_0x_1} \quad (30)$$

where $H_I = e^{jk_0x}$ is the sound pressure transfer function of the incident wave, $H_R = e^{-jk_0x}$ is the sound pressure transfer function of the reflected wave, $k_0 = 2\pi f/c_0$ is the wave number being f the frequency and x_1 is the distance between the sample and the microphone placed further away from it.

After the complex reflection coefficients are obtained, the normal incidence sound absorption coefficients follow from Equation (15).

4.3.2. Airflow Resistivity

The airflow resistivity (σ) is defined as the airflow resistance divided by the sample thickness t . It is directly related to the absorption properties of the porous materials. It is measured under certain limitations of our experimental setup considering the indirect method described by Ingard and Dear (1985) [33]. In this indirect model, the measuring device is a rigid methacrylate tube of circular cross section with a sound source at one end; in the other, a completely rigid termination. The Mic.1 is located in front of the sample in order to directly measure the sound pressure (P_1) and the Mic.2 is set at the end of the impedance tube, near the rigid termination (P_2). In Figure 8, a schematic of the experimental device is shown, where the placement of the microphones and the sample can be seen.

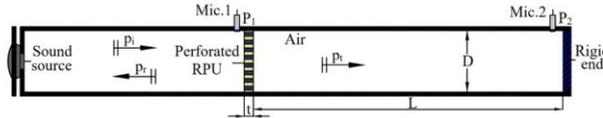


Figure 8. Schematic diagram of the impedance tube used to measure specific airflow resistance by Ingard and Dear method. L is the distance between the back face of the sample and the rigid end; t is the thickness of the sample; p_i is the acoustic pressure of the transmitted wave.

The cross section of the impedance tube must be very small compared to the wavelength of the sound (λ) to ensure plane wave propagation. Therefore, the following condition: $\lambda \gg 1.7D$, where D is the inner diameter of the tube, is satisfied. It is possible to calculate the airflow resistance by finding the minimum of the imaginary part of the pressure ratio p_1/p_2 for frequencies that satisfy the following condition: $L + t = (2n - 1)\lambda/4$, where n is an integer number.

The average values of the specific airflow resistivity are obtained by using the absolute value of the imaginary part of the transfer function between the signals of the two microphones as

$$\sigma \approx \left(\frac{\rho_0 c_0}{t} \right) \left| \text{Im} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right| \quad (31)$$

5. Results and Discussion

5.1. Effect of Perforation Rate and Aperture Size On the Sound Absorption

There are different technologies for material drilling depending on their hardness, their composition and their manufacture. In the case of polyurethane foams, these can be cut efficiently using two main techniques: laser and drilling machine. When using laser method, the laser beam interacts with a material causing its vaporization on its way for a given depth. Through the drilling method, the perforation is not perfect because the perforated hole, after removing the drill, is refilled with fibers [34].

The effects of drilling operation on the surface roughness depend on the perforation technique employed. Milling is a traditional process for hole-making by using rotary cutters to remove material. The quality of the drilled holes usually is improved by secondary drilling. Laser cutting is one of the most extended methods for industrial applications [35].

The effect on the sound absorption in samples perforated with two different drilling methods has been tested. It has been checked that both configurations have a very similar acoustic behavior. Consequently, in this work, RPU foams perforated only with the milling machine technique are analyzed.

A study of samples with $D = 4$ mm and different \varnothing_M has been carried out. Figure 9 shows the results obtained for the sound absorption coefficient of the RPU samples placed at the end of the impedance tube. At mid frequencies up to 2000 Hz, the unperforated sample has a sound absorption coefficient higher than the perforated samples. It can be seen in Figure 9 that the maximum of absorption shifts towards higher frequencies when the perforation rate is increased. In this type of perforated configurations, both the maximum sound absorption value and the frequency where the absorption is maximum, varies depending on the rate and the diameter of perforation chosen [19]. The absorption values in the region 2000 to 3150 Hz are the maximum values in the frequency range that can be observed due to the configuration of the measurements. Examples of this acoustic behavior can be observed in [9]. The $\varnothing_M = 5\%$ configuration has the maximum absorption at the frequency of 2500 Hz, and the $\varnothing_M = 20\%$ at the frequency of 3150 Hz.

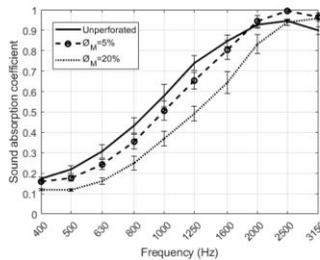


Figure 9. Results of the normal incidence sound absorption coefficient of the perforated RPU foam samples for $D = 4$ mm.

5.2. Effect of the Textile Fabric over a RPU Foam on Acoustic Absorption

A textile fabric has been added over a RPU foam in order to improve the sound absorption. In Table 2, the woven fabric characteristics of both fabrics T1 and T2 are shown. T2 fabric has higher surface yarn density and higher airflow resistivity. Figure 10 shows the study of the normal incidence sound absorption coefficient of both textile fabrics. The sound absorption of both fabrics is very low at 400 Hz showing a slight increase with frequency, being smaller than 0.3 in the whole frequency range.

Table 2. Thickness (t), surface yarn density (ρ), and airflow resistivity (σ) of the woven textile fabrics

Fabric Type	t (cm)	ρ ($\text{Kg} \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^{-2}$)	σ ($\text{kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)
T1	0.18	398	204–250
T2	0.14	478	270–274

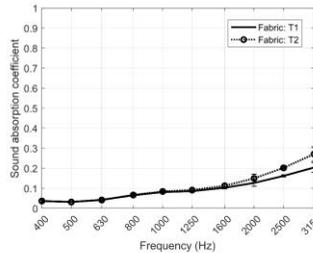


Figure 10. Sound absorption coefficient at normal incidence of the textile fabrics with their dispersion percentage.

Figure 11 shows RPU samples with two different textile fabrics. The normal incidence sound absorption coefficient of the perforated RPU foam in combination with the woven fabrics for $D = 4$ mm is measured and shown in Figure 12. The acoustic influence of using textiles that cover RPU foams is analyzed.

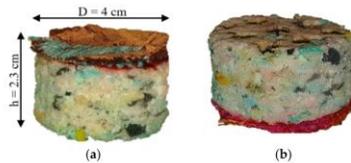


Figure 11. Two different configurations of the system perforated fabric–RPU. (a) T1–RPU; (b) T2–RPU.

It is intended to achieve a configuration that provides an increase in the airflow resistance of the sample set as this acoustic parameter can be considered additive in this union of materials. For sufficiently low-density materials, if the airflow resistance of the fabric-RPU sample is increased, an increase of the acoustic impedance is generated increasing the sound absorption (see Figure 12). Examples of this phenomenon can be seen in reference [36], where the acoustic absorption of the fabric + air configuration is much greater than the absorption of the fabric. This is achieved by increasing the impedance of the material set compared to the impedance of the air cavity. It can be seen in Figure 12 that the effect of using a textile fabric to cover the RPU sample results in a decrease of the absorption peak. The additional mass introduced by the fabric, explains why the resonance frequency of the RPU + fabric configuration is reduced. In both figures (see Figure 12a,b), the same trend is observed: the absorption coefficient is enhanced by placing a fabric on the surface of both unperforated and perforated RPU samples. An increase in the sound absorption coefficient is produced at mid frequencies with the combination textile fabric + RPU compared to the foam without fabric. The highest sound absorption coefficient is reached at 1600 Hz when RPU is combined with the T2 fabric.

The presence of the fabric in the RPU foam results in a displacement of the sound absorption maximum towards low frequencies. In Figure 12a, the combination T1 fabric + perforated RPU foam presents higher absorption than the combination T1 fabric + unperforated RPU at high frequencies, from 1350 to 3150 Hz. Figure 12b evidences greater difference in absorption when perforation is considered. In both cases, the sound absorption coefficient reaches quasi perfect absorption at the maximum.

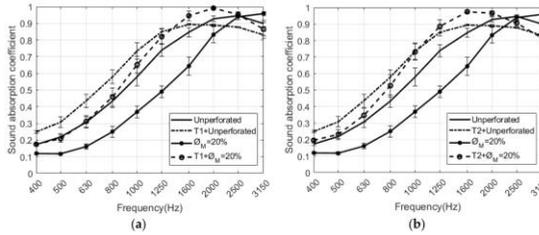


Figure 12. Results of the sound absorption coefficient at normal incidence of the different combinations between unperforated and perforated RPU samples and textile fabrics (T1 and T2): (a) $\phi_M = 20\%$, $D = 4$ mm, T1; (b) $\phi_M = 20\%$, $D = 4$ mm, T2.

5.3. Comparison of Predicted and Measured Values

The sound absorption coefficient in normal incidence for a set of four different configurations of perforated RPU samples was experimentally measured. In order to validate the theoretical and numerical models proposed in Section 2 for double porosity media, predicted and measured sound absorption curves have been compared. As it can be seen in Figure 13, there are no significant differences between the models and the measurements. A similar matching has been observed in the other configurations studied, although they are not presented here for simplicity. Both models used the acoustic parameters of both unperforated and perforated RPU foams, with a thickness of 2 ± 0.15 cm, shown in Table 3 in order to describe the sound absorption properties of perforated foams. There are slight deviations at mid frequencies that can be explained from the experimental uncertainty.

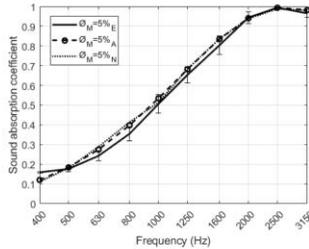


Figure 13. Normal incidence plane wave sound absorption coefficient of the RPU samples for $D = 4$ mm. Comparison between measurement (continuous lines) theoretical model (dashed lines) and numerical model (dotted lines).

Table 3. Acoustic parameters of the samples measured. Bulk density of the material (ρ_m), density of the fibers (ρ_f), airflow resistivity (σ), porosity (θ), meso-porosity (θ_m), tortuosity (α_{∞}), viscous characteristics length (Λ), thermal characteristics length (Λ'), and mean fiber diameter (d).

Foam Type	ρ_m (Kg m ⁻³)	ρ_f (Kg m ⁻³)	σ (kPa s m ⁻²)	θ	θ_m	α_{∞}	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	d (μ m)
Unperforated	182			0					
5%4 mm	153			0.05					
5%6 mm	165	1250	20.4–20.5	0.88	0.65	1.07	52.1	104.2	25
20%4 mm	130			0.2					
20%6 mm	132			0.2					

Two different configurations of perforated RPU foams covered by two different textile fabrics have been measured experimentally. Figure 14a–d compare the predicted and measured absorption coefficients of the absorbent structure in each configuration. It can be seen in all figures a good agreement between the measurements and both models, analytical and numerical, that have been previously presented in Section 2. In the numerical model, the values of the Delany and Bazley coefficients are presented in Table 4 for both textile fabrics (T1 and T2). It is important to remark here that the model for viscothermal losses in the air perforations has not been considered in numerical simulations. This model is valid for open perforations and here the presence of the fabric avoids radiation. The slight difference between simulated and experimental sound absorption values observed in all cases of Figure 14 may be due to the composition of the fabric used and the imperfections between the porous material and the textile.

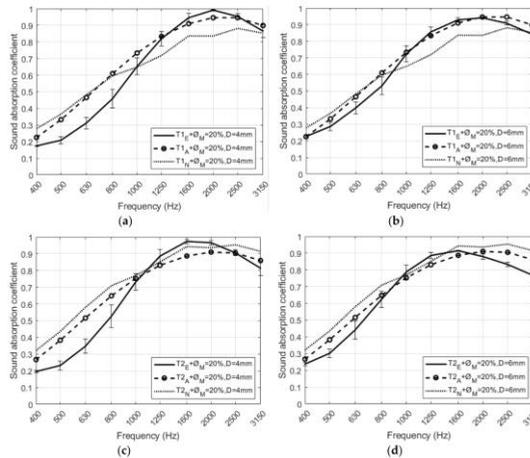


Figure 14. Normal incidence plane wave sound absorption coefficient of the RPU samples covered with two different textile fabrics. Comparison between measurement (continuous lines) theoretical model (dashed lines) and numerical model (dotted lines) of (a) T1 fabric with 20% and D = 4 mm, (b) T1 fabric with 20% and D = 6 mm, (c) T2 fabric with 20% and D = 4 mm, (d) T2 fabric with 20% and D = 6 mm.

Table 4. Delany and Bazley coefficients of fabrics T1 and T2.

Fabrics	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
T1	0.1101	0.6283	0.1846	0.7027	0.0455	0.8173	0.0733	0.7487
T2	0.0984	0.7225	0.2191	0.6716	0.0431	1.0000	0.0899	0.2333

6. Conclusions

The influence of adding fabric to the surface of recycled polyurethane perforated foam samples has been investigated. The normal incident sound absorption coefficient of samples were measured experimentally in an impedance tube. The influence of perforation parameters like the perforation rate and the aperture size have been investigated. The higher the perforation rate, the lower the sound absorption values at medium and high frequencies. For the same perforation rate, the larger the aperture size, the absorption values are slightly higher. The combination textile fabric + perforated RPU foam modifies and increases significantly the sound absorption coefficient at frequencies around 2 kHz compared to unperforated RPU samples. Experimental results evidence that the sound absorption depends slightly on the type of the textile fabric used. A theoretical model and a numerical model was performed to validate the results presented in this work. Good agreement is found between both models and measurements.

Author Contributions: Methodology, R.d.R. and R.P.; formal analysis, R.A.-N., R.d.R. and R.P.; investigation, R.A.-N.; data curation, R.A.-N.; writing (original draft preparation), R.A.-N.; writing (review and editing), R.A.-N., R.d.R., J.A., V.J.S.-M. and R.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was financially supported by the Ministry of Economy and Innovation (MINECO) and the European Union FEDER through project FIS2015-65998-C2-2 and by projects AICO/2016/060 and ACIF/2017/073 by Regional Ministry of Education, Culture and Sport of the Generalitat Valenciana and with the support of European Structural Investment Funds (ESIF-European Union).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Berglund, B.; Lindvall, T.; Schwela, D.H. *World Health Organization. Guidelines for community noise*; WHO: Geneva, Switzerland, 1999.
- Hamernik, R.P.; Ahroon, W.A. Interrupted noise exposures: Threshold shift dynamics and permanent effects. *J. Acoust. Soc. Am.* **1998**, *103*, 3478–3488. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Ramis, J.; Alba, J.; del Rey, R.; Escuder, E.; Sanchis, V.J. New absorbent material acoustic base on kenaf's fiber. *Materiales de Construcción* **2010**, *60*, 133–143. [[CrossRef](#)]
- Ramis, J.; del Rey, R.; Alba, J.; Godinho, L.; Carbajo, J. A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber. *Materiales de construcción* **2014**, *64*, 1–7. [[CrossRef](#)]
- Rey Tormos, R.; Alba Fernández, J.; Uris Martínez, A.; Candelas Valiente, P. WOOL4BUILD: Improved isolation material for eco-building based on natural wool. *Revista de Acústica* **2017**, *48*, 3–10.
- Atienzar, R.; Bonet, M.Á.; Payà, J.; del Rey, R.; Pico, R. Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules. *Revista de Acústica* **2019**, *50*, 20–31.
- Yang, W.; Dong, Q.; Liu, S.; Xie, H.; Liu, L.; Li, J. Recycling and Disposal Methods for Polyurethane Foam Wastes. *Procedia Environ. Sci.* **2012**, *16*, 167–175. [[CrossRef](#)]
- Gama, N.; Silva, R.; Carvalho, A.; Ferreira, A.; Barros-Timmons, A. Sound absorption properties of polyurethane foams derived from crude glycerol and liquefied coffee grounds polyol. *Polym. Test.* **2017**, *62*, 13–22. [[CrossRef](#)]
- Del Rey, R.; Alba, J.; Arenas, J.; Sanchis, V.J. An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Appl. Acoust.* **2012**, *73*, 604–609. [[CrossRef](#)]
- Chen, S.; Jiang, Y. The acoustic property study of polyurethane foam with addition of bamboo leaves particles. *Polym. Compos.* **2016**, *39*, 1370–1381. [[CrossRef](#)]

11. Delany, M.E.; Bazley, E.N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl. Acoust.* **1970**, *3*, 105–116. [[CrossRef](#)]
12. Johnson, D.L.; Koplik, J.; Dashen, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* **1987**, *176*, 379–402. [[CrossRef](#)]
13. Allard, J.F.; Champoux, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J. Acoust. Soc. Am.* **1992**, *91*, 3346–3353. [[CrossRef](#)]
14. Voronina, N. Acoustical properties of fibrous materials. *Appl. Acoust.* **1994**, *42*, 165–174. [[CrossRef](#)]
15. Umnova, O.; Attenborough, K.; Ho-Chul, S.; Cummings, A. Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Appl. Acoust.* **2005**, *66*, 607–624. [[CrossRef](#)]
16. Zhang, C.H.; Li, J.Q.; Hu, Z.; Zhu, F.L.; Huang, Y.D. Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: Effect of interconnected porosity. *Mater. Design* **2012**, *41*, 319–325. [[CrossRef](#)]
17. Tiuc, A.E.; Rusu, T.; Vasile, O. The influence of perforations on the surface of a sound absorbing material on the sound absorption coefficient. *Rom. J. Acoust. Vib.* **2013**, *10*, 59–62.
18. Chevillotte, F. Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Appl. Acoust.* **2012**, *73*, 56–60. [[CrossRef](#)]
19. Lou, C.-W.; Huang, S.-Y.; Huang, C.-H.; Pan, Y.-J.; Yan, R.; Hsieh, C.-T.; Lin, J.-H. Effects of structure design on resilience and acoustic absorption properties of porous flexible-foam based perforated composites. *Fibers Polym.* **2015**, *16*, 2652–2662. [[CrossRef](#)]
20. Lin, J.-H.; Chuang, Y.-C.; Li, T.-T.; Huang, C.-H.; Huang, C.-L.; Chen, Y.-S.; Lou, C.-W. Effects of Perforation on Rigid PU Foam Plates: Acoustic and Mechanical Properties. *Materials* **2016**, *9*, 1000. [[CrossRef](#)]
21. Xia, X.; Zhang, Z.; Zhao, W.; Li, C.; Ding, J.; Liu, C.; Liu, Y. Acoustic properties of closed-cell aluminum foams with different macrostructures. *J. Mater. Sci. Technol.* **2017**, *33*, 1227–1234. [[CrossRef](#)]
22. Atalla, N.; Sgard, F.; Olny, X.; Panneton, R. Acoustic absorption of macro-perforated porous materials. *J. Sound Vib.* **2001**, *243*, 659–678. [[CrossRef](#)]
23. Olny, X.; Boutin, C. Acoustic wave propagation in double porosity media. *J. Acoust. Soc. Am.* **2003**, *114*, 73–89. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Zwikker, C.; Kosten, C.W. *Sound Absorbing Materials*; Elsevier: New York, NY, USA, 1949.
25. Sgard, F.C.; Olny, X.; Atalla, N.; Castel, F. On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Appl. Acoust.* **2005**, *66*, 625–651. [[CrossRef](#)]
26. Carbajo, J.; Prieto, A.; Ramis, J.; Rio-Martin, L. A non-parametric fluid-equivalent approach for the acoustic characterization of rigid porous materials. *Appl. Math. Model.* **2019**, *76*, 330–347. [[CrossRef](#)]
27. Ekici, B.; Kentli, A.; Kucuk, H. Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers. *Arch. Acoust.* **2012**, *37*, 515–520. [[CrossRef](#)]
28. Del Rey, R.; Alba, J.; Llopis, A.; Guillén, I. *Aplicación de Nanopapel Para la Mejora de Prestaciones Acústicas*. 45^o Congreso español de acústica (2014), 8^o Congreso ibérico de Acústica–European Symposium on Smart Cities and Environmental Acoustics; Sociedad Española de Acústica: Madrid, Spain, 2014; ISSN 1240-7441.
29. Segura Alcaraz, M.P.; Bonet-Aracil, M.; Segura Alcaraz, J.G.; Montava Seguí, I. Sound absorption of textile material using a microfibers resistive layer. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *254*, 072022. [[CrossRef](#)]
30. Pieren, R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text. Res. J.* **2012**, *82*, 864–874. [[CrossRef](#)]
31. Romero-García, V.; Theocharis, G.; Richoux, O.; Pagneux, V. Use of complex frequency plane to design broadband and sub-wavelength absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.* **2016**, *139*, 3395–3403. [[CrossRef](#)]
32. ISO 10534-2. *Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes. Part 2: Transfer-Function Method*. Acoustics; Comité Européen de Normalisation: Brussels, Belgium, 1998.
33. Ingard, K.U.; Dear, T.A. Measurement of Acoustic Flow Resistance. *J. Sound Vib.* **1985**, *103*, 567–572. [[CrossRef](#)]
34. Jayabal, S.; Natarajan, U. Drilling analysis of coir-fiber-reinforced polyester composites. *B. Mater. Sci.* **2011**, *34*, 1563–1567. [[CrossRef](#)]

35. Radovanović, M.; Dašić, P. Research on surface roughness by laser cut. *The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați*, Fascicle VIII: ISSN 1221–4590. *Tribology* **2006**, *12*, 84–88.
36. Del Rey, R.; Alba, J.; Blanes, M.; Marco, B. The acoustic absorption of textile curtains on the function of the fullness. *Materiales de Construcción* **2013**, *63*, 569–580. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Article

Influence of fabric folding geometry on the sound absorption

Roberto Atiénzar-Navarro^{1*}, Rubén Picó¹, Romina del Rey², Marilés Bonet-Aracil³ and Jaime Gisbert-Payá³

¹ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, 46730, Valencia, Spain; roatna@doctor.upv.es, rpico@fis.upv.es

² Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, 46730, Valencia, Spain; roderey@fis.upv.es

³ Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801, Alcoi, Valencia, Spain; maboar@txp.upv.es, jaigispa@txp.upv.es

* Corresponding author: roatna@doctor.upv.es; Tel.: +3466299905043143

Abstract

Textile materials used without any other structures show low absorption throughout the operating frequency range and they are currently used for interior decoration. These fabrics can play an important role in the development of acoustic materials considering folding techniques in the design phase. The folding of a cotton fabric not only affects the aesthetic appearance but also directly influences the total absorption surface and the volumetric density. The aim of this research was to establish the influence of geometric design parameters such as the number of folds and the textile length on the sound absorption properties. Experimental measurements were performed by using an impedance tube considering only incident plane waves. The diffuse-field sound absorption coefficient of several fabric configurations placed in front of a rigid backing forming an air-cavity between them was also measured in the small-sized reverberation chamber. A semi-empirical model based on the spacing between the fabric to the backing wall and the folding geometry was used in order to predict the diffuse-field sound absorption in reverberation room. Results showed a very good agreement between measured and predicted sound absorption coefficients.

Keywords

sound absorption, folding geometry, cotton fabric, prediction model

1. Introduction

Textiles are most commonly woven because the nonwoven structures lack the aesthetic appeal and they are covered with woven fabrics to produce a pleasing appearance [1, 2]. Woven fabrics are textile materials produced by weaving and they are generally made by interlacing two or more distinct sets of yarns at right angles to each other [3]. In the weaving process, the two basic components are warp and weft. The lengthwise yarns are known as warp ends whilst the lateral yarns are weft picks.

The acoustic properties of textile fabrics depend on the manufacturing process and the physical characteristics of the textile such as yarn density, nature, fibers, humid conditions and pore treatment [4]. In 1990, Shoshani and Rosenhouse [5] studied the influence of the intrinsic

parameters of different woven fabrics (fiber content, yarn count or cover factor) in the sound absorption coefficient. In general, fabrics used for acoustic purposes are lightweight and thin compared to the wavelength in the usual frequency range. Thus, they can be modelled as a permeable membrane [6–8], which is a two degrees of freedom oscillator. The flexible membrane (mass) is mounted over an air-cavity (spring) and dissipates acoustic energy by flexion. Sakagami et al. [9] studied, in detail, the acoustic properties of permeable membranes. Kang et al. develop in [10] a theoretical method for predicting the sound absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air-cavity. Recently, Pieren, R. presented in [11] a theoretical model for prediction of the sound absorption coefficient of thin textile fabrics considering the sound-induced vibrations. Later, Pieren, R. and Heutschi, K. [12] refined the model presented in [11] considering the airflow through porous yarns.

A textile fabric rigidly backed shows poor sound absorption [13]. Because of this, in the literature there are several researches related with different solutions to enhance the absorption properties of fabrics for multiple purposes [14–15]. Micro-fiber fabrics present higher surface yarn density than conventional textiles resulting in a higher airflow resistance. In 2007, Na et al. investigated in [14] the sound absorption properties of micro-fiber fabrics. The results showed that the micro-fiber fabric absorb better than a conventional fabric due to its higher surface area, resulting in higher frictional resistance by increasing the total pore path length. Lately, Segura-Alcaraz in [15] investigated the influence of using two different micro-fiber fabrics (twill and terry) placed on the top of a nonwoven structure with different thickness. Resonant effects are shown in the system fabric-nonwoven causing a different displacement in the sound absorption peak depending on the type of fabric used.

Due to its mechanical flexibility, fabrics are usually used and arranged with folding. Curtains can be folded in different ways. Over the last decades, different studies based on fabric folding design techniques are used to create 3D textile structures [16] with the possibility of enhancing and controlling the acoustic absorption of fabrics [17–18]. These textile structures have been widely developed as acoustic absorbent elements. The absorption of acoustic curtains reduces echoes and decreases the reverberation time of spaces [19–20]. Pirn, R. studied in [17] the physical and acoustical properties of three halls equipped with retractable curtains in order to observe how the room acoustics is modified. Del Rey et al. studied in [18] the acoustic absorption of curtains in a reverberant chamber with different air-cavities and degrees of fullness. Lately, in order to predict the acoustic performance of flat and folded curtains in reverberation rooms under several conditions, Pieren et al. [21] extended the models presented in [12]. In these new models, the effects of edge diffraction at the textile sample [22] and the non-uniform sound intensity were considered [23]. Folding is also used as a technique for the designed acoustic barriers based on the origami folding [24].

The folding process consists of obtaining multiple folds from the flat material. In general, folds can be made from almost any fabric qualities and are easily adapted to specific personal design. In this work, the aim is to evaluate quantitatively the effect of fabric folding geometry on the sound absorption. Two different methods have been considered for the acoustic characterization of textile material: the impedance tube and the small-scale reverberation chamber. The experimental results were compared to those obtained analytically with a good agreement between them.

This paper is organized as follows. In Section 2, the theoretical model used to predict the acoustic properties of thin membranes in diffuse-field conditions is presented. In Section 3, the preparation of folded specimens is described. Both the experimental setups, the impedance tube and the small-scale reverberation chamber are detailed in Section 4. Section 5 discusses the experimental results and their relationship against the theoretical predictions. Finally, the main conclusions of this work are summarized in Section 6.

2. Theoretical model

In this section, first the system composed by a thin textile fabric acting as a membrane backed by an air-cavity with rigid ending [11] in oblique incidence is presented. Then, a model to predict the random-incidence sound absorption coefficient of textile fabrics is detailed [21–23]. Finally, this model has been extended to predict the absorption coefficient to fabrics presenting foldings [21]. The folding of the textile material is described by three geometric parameters, namely the folding height, the folding period and the average distance corresponding to the distance between the centre of the folded fabric and the backing. These models are reviewed in this section.

2.1. Oblique incidence

A fabric of thickness t is separated by an air-cavity of length r to a rigid backing. For the unfolded fabric (Fig. 1), a fixed distance r from the reflective surface is considered. It is assumed that the fabric is acoustically thin compared to the wavelength of sound ($t \ll \lambda$).

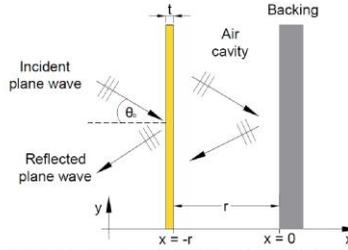


Figure 1. Illustration of the unfolded fabric configuration considered in this study. r is the air-cavity depth, θ_0 is the angle of incidence.

The acoustic behaviour of the membrane can be characterized by its impedance as shown by several authors in [7–12]. A thin textile fabric as a membrane is acoustically described by two parameters: the specific airflow resistance R_s ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$) and the surface mass density m_f (kg/m^2). The expression of the acoustic impedance of textile fabric, Z_{tex} , is formulated as follows [11, 12]:

$$Z_{\text{tex}}(\omega) = R\{Z_{\text{tex}}\} + i \cdot \text{imag}\{Z_{\text{tex}}\} = \frac{R_s(\omega m_f)^2}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} + i \cdot \frac{R_s^2 \omega m_f}{R_s^2 + (\omega m_f)^2}, \quad (1)$$

where ω is the angular frequency.

In Fig. 1, the surface impedance of the fabric backed up by an air-cavity (Z_{in}) can be calculated by [11, 12]:

$$Z_{\text{in}} = Z_{\text{tex}} + Z_{\text{AC}} = \frac{R_s(\omega m_f)^2}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} + i \frac{R_s^2 \omega m_f}{R_s^2 + (\omega m_f)^2} - i \frac{Z_0}{\cos(\theta_0)} \cdot \cot(k_0 \cdot r \cdot \cos(\theta_0)), \quad (2)$$

where Z_{AC} is the characteristic impedance of the rigidly backed air-cavity and θ_0 is the angle of incidence.

2.2. Diffuse-field. Statistical sound absorption coefficient

In this section, a sound absorption model for flat fabrics placed inside the reverberation room under diffuse or random sound field conditions is presented. A diffuse sound field is considered when the distribution of the sound intensity is homogeneous. Therefore, for a perfectly diffuse-field, the following assumptions must be satisfied: 1) uniform energy density distribution in a room. 2) The energy impinging on a surface uniformly from all directions.

The statistical or random-incidence sound absorption coefficient α_s is used to acoustically characterize textile materials in diffuse-field and it is defined by several authors [21–23] as follows,

$$\alpha_s(\theta) = \frac{8 \cdot \Re[Z_{\text{res}}]}{Z_0} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{w(\theta) \cdot \sin(\theta)}{\left| \frac{Z_{\text{res}}}{Z_0} + \frac{Z_{\text{AC}}}{Z_0} + Z_r(\theta) \right|^2} d\theta \quad (3)$$

where $Z_r(\theta) \cong 1/\cos(\theta)$ is the normalized averaged radiation impedance over azimuthal angle in the range of 0 to 2π rad and θ is the angle in radians. For the resultant field in a reverberation room, the frequency-dependent angle weighting function, $w(\theta)$, accounts for the non-uniform intensity distribution across the fabric under test in the reverberation room and it is defined by:

$$w(\theta) = \begin{cases} 1.64 - 0.3 \cdot \theta - 0.47 \cdot \theta^2, & f \geq f_i \text{ kHz} \\ 1, & f < f_i \text{ kHz} \end{cases} \quad (4)$$

where f_i is the cut-off frequency of the reverberation room, in our work, $f_i = 0.485$ kHz.

2.3. Sound absorption of folded permeable membrane

In the previous section, a model to predict the diffuse-field sound absorption coefficient of thin fabric placed in a reverberation room has been discussed. The semi-empirical model has been extended to folded fabrics in [21] to predict the statistical or random-incidence sound absorption coefficient, α_s , of folded lightweight curtains in rooms.

Then, it has been considered the configuration shown in Fig. 2. The variables to describe geometrically the folded fabrics are the folding height h , the folding period x and the average distance \bar{r} corresponding to the distance between the backing and the sample centre.

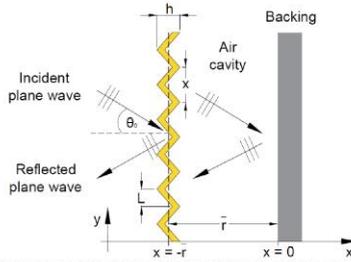


Figure 2. Illustration of the folded fabric configuration considered in this study. h is the folding height; L is the length of the fold; \bar{r} is the average distance between the backing and the centre of the folded fabric; x is the distance between two consecutive folds; θ_0 is the angle of incidence.

The thickness of the air-cavity is not simply by r as in the case of an unfolded fabric. On the contrary, a simplified model for the geometry of the folded fabric has been considered and the following hypotheses have been assumed:

1. The folding period x is considered as uniformly distributed in the folded structure. This means that is assumed that there is the same distance between consecutive folds.
2. The air-cavity behind the textile sample strongly influences the sound absorption coefficient. The folding involves a variation of the air-cavity depth. This effect is accounted by considering the arithmetic mean of the statistical sound absorption coefficient, $\bar{\alpha}_s$, as:

$$\bar{\alpha}_s = \frac{\alpha_s(r = \bar{r} - h/2) + \alpha_s(r = \bar{r} + h/2)}{2} \quad , \quad (5)$$

where $\bar{r} - h/2$ and $\bar{r} + h/2$ correspond to the air-cavity maximum and minimum distances, respectively.

3. The incident and reflected sound waves pass through the folded specimen multiple times. This effect play an important role at high frequencies with grazing incidence ($\theta = \pi/2$ rad). It is considered in the prediction model by using a frequency and geometry (the fold height and the fold period) dependent function ξ [21]. Incident and reflected sound pass through the fabric multiple times for wavelengths less than one-fifth the height of the fold ($\lambda_c \approx h/5$). It is possible to consider this effect in the model by using ξ ,

$$\xi(f, h, x) = \begin{cases} 0.5, & \text{if } f > f_c = c_0/h \text{ and } h > x/2, \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

According to hypotheses two and three, the statistical sound absorption coefficient of folded textile fabrics, α_{sf} , can be expressed as follows,

$$\alpha_{sf} = \bar{\alpha}_s + \xi \cdot (1 - \bar{\alpha}_s) \cdot \bar{\alpha}_s \quad , \quad (7)$$

where $(1 - \bar{\alpha}_s)$ determines the portion of sound energy that is not absorbed by a single layer of fabric

3. Materials

3.1. Textile material

The textile fabric used was made of cellulosic fibers (60 cotton/40 linen). The fabric was weaved with a twill rapport for the basement, with a wrap density of 35 ends/cm, a weft density of 20 picks/cm and a surface yarn density of 210 g · m⁻², which has been chemically and optically bleached in an industrial process (see Fig. 3). Textile has a jacquard section using a logo as a pattern woven.



Figure 3. Different cotton textile samples under study. a) Unfolded and b) folded fabric.

3.2. Folding fabric

There are different ways to fold a fabric, depending on the shape and the size of the fold. Regarding the geometry, the most common are the wave fold, S-fold or ripple fold. It is proposed here a simple geometrical model to divide the flat fabric, of thickness t , into n periodic and identical folds, as shown in Fig. 4.

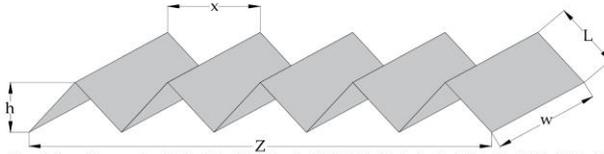


Figure 4. Geometric parameters of textile fabrics. Z is the length of folded fabric; L is the length of fold; h is the height of fold; x is the distance between two consecutive folds; w is the width of folded fabric.

The folds of a fabric of width w can be uniquely defined by the length of the fold L , the height of the fold h and the distance between two consecutive folds x .

In this work, twelve different folded samples by combining different geometrical parameters as shown in Table 1 were characterized. The folding fraction (N) is defined as:

$$N(\%) = 1 - \frac{V_f}{V_i} \quad (8)$$

where V_f is the volume of fabric without folds and V_i is the volume of the folded specimen.

The first sample, T0, corresponds to the unfolded (flat) fabric (see Table 1). Note that only folded fabrics with identical folds periodically distributed have been considered. All fabric samples were designed in a rectangular structure with the same warp/weft orientation and with a thickness of $t = 1$ mm.

Fabric type	n	h(cm)	x(cm)	N(%)
T0	0	0	–	–
T1	5	1.4	0.8	98.3
T2	10	0.7	0.4	96.5
T3	15	0.5	0.3	95.2
T4	5	1.9	0.8	98.3
T5	10	0.9	0.4	96.4
T6	15	0.7	0.3	95.6
T7	20	0.6	0.2	94.6
T8	10	3.0	6.0	95.3
T9	20	1.5	3.0	91.0
T10	20	3.0	3.0	92.5

Table 1. Geometric parameters of fabrics: n is the number of folds, h is the folding height, x is the distance between two consecutive folds and N is the folding fraction.

4. Experimental measurements

The absorption properties of folded fabrics have been characterized by using two different methods: the impedance tube and the reverberation room. In the first method, the normal incidence sound absorption coefficient and the specific airflow resistance were obtained with two-microphone technique. In the second method, the acoustic field is diffused in the enclosure and the random incidence absorption coefficient was measured.

4.1. Normal incidence sound absorption coefficient

The normal incidence sound absorption coefficient is measured in an impedance tube according to the standard ISO 10534-2 [25] for the configurations T0–T7 listed in Table 1. It is based on the transfer-function method and it requires two microphones ($\frac{1}{2}$ -inch free-field Brüel and Kjær – type 4190), a digital system (Pulse LabShop v.22.2.0.197), a PC for the signal treatment and a sound source (Beyma CP800Ti loudspeaker). In the tube used in this work, the measurements cover the frequency range from 0.4 kHz to 3.15 kHz. These frequencies are established by the restrictions imposed by the distance between both microphones, the precision of the signal processing equipment and the inner diameter of the impedance tube. The impedance tube is rigid methacrylate duct with circular cross section of 4 cm, which meets with the specifications described in ISO 10534-2.

The material under test is placed at the end of the tube rigidly backed. The procedure followed to introduce the folded fabric into the circular tube is shown in Figure 5. The samples are pre-folded out of the tube from a rectangular flat (unfolded) fabric according to the corresponding geometrical parameters. After it is cut in elliptical shape and then folded to the design pattern (see Fig. 5a). As a result of the folding, the fabric becomes a material with thickness h , and circular shape with the same diameter of the impedance tube, D_i (see Fig. 5b). To complete the process, the sample must be perfectly fit to the sample holder without compressing it (see Fig. 5c).

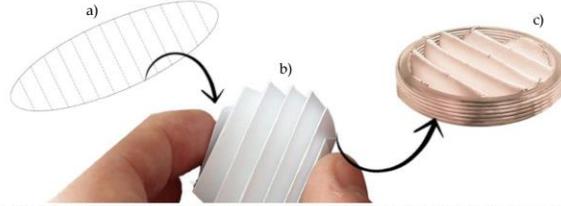


Figure 5. Procedure to introduce the sample in the sample holder. a) Textile fabric is cut in elliptical shape; b) Textile specimen is folded to the design pattern; c) Folded sample is perfectly fit to the sample holder.

Each test is performed with three samples with identical geometry using the same mounting conditions with the aim of reducing the dispersion error produced by the inhomogeneity of the textile material. Figure 6 shows the experimental setup with the folded fabric placed at the end of the impedance tube with rigid end.

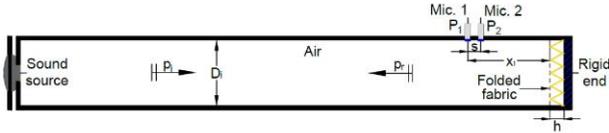


Figure 6. Diagram of the impedance tube used to measure the sound absorption at normal incidence. D is the inner diameter of the tube ($D_i = 4$ cm), h is the folding height, x_1 is the distance between Mic. 1 and the sample, p_i is the acoustic pressure of the incident wave; p_r is the acoustic pressure of the reflected wave; s is the separation between both microphones ($s = 3.2$ cm).

In the two-microphone technique, the complex acoustic pressure is registered in both microphones in order to calculate the complex acoustic transfer function (H_{12}), which is used to obtain the complex acoustic pressure reflection coefficient for a plane wave at normal incidence and it is represented by r , as

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}, \quad (9)$$

where $H_I = e^{jk_0 s}$ is the sound pressure transfer function of the incident wave, $H_R = e^{-jk_0 s}$ is the sound pressure transfer function of the reflected wave, $k_0 = 2\pi f/c_0$ is the wave number being f the frequency and x_1 is the distance between the sample and the microphone placed further away from it.

Once the complex reflection coefficient has been calculated, the normal incidence sound absorption coefficient is defined as

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (10)$$

4.2. Measurement method of airflow resistance coefficient

The airflow resistance, R_s , is an important parameter in prediction models of sound absorption of textile materials. It was presented in Section 2.1 and it measures the difficulty of an air stream to flow through the material, considering the indirect method described by Ingard and

Dear (1985) [26]. It depends on the pressure gradient, ∇p_s , on the faces of fabric, and the speed of vibration, u , within it, as

$$R_s = \frac{\nabla p_s}{u}. \quad (11)$$

The measuring device in this indirect method is a closed methacrylate tube of circular cross section with a loudspeaker at one end; in the other, a completely rigid termination. One of the microphones is located in front of the textile sample in order to directly measure the sound pressure (p_1) and the other microphone is set at the end of the impedance tube, near the rigid termination (p_2). The airflow resistivity measurements were carried out on three identical samples of the cotton fabric under test, being $R_s = 2000\text{--}2080 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$. Figure 7 shows a diagram of the Ingard and Dear's measurement device.

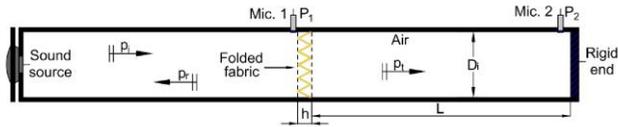


Figure 7. Diagram of the Ingard and Dear's measurement device. L is the distance between the rigid end and the back face of the folded fabric; p_i is the acoustic pressure of the transmitted wave.

4.3. Small-sized reverberation chamber

The sound absorption measurements are also performed in a small-sized reverberation room under diffuse-field conditions. The reverberation room used has asymmetric walls and small wooden diffusers placed randomly inside the room to enhance its diffusivity [27]. It has a volume of 1.12 m^3 and a surface of 6.74 m^2 . Compared to a typical full-scale standardized reverberation chamber, this small-sized chamber can obtain the sound absorption coefficient at diffuse incidence of textile materials using small samples with surface $\cong 0.2 \text{ m}^2$, allowing low-cost tests instead of $10\text{--}12 \text{ m}^2$ needed in a real scale standardized reverberation chamber.

Four configurations given in Table 1 were measured (T0, T8, T9 and T10). In general, a sample with a considerable number of folds is ideal for physically holding and manipulating it during the sample preparation phase. Samples with low or high number of folds are difficult to manipulate and mount to the frame. The fabrics were placed over a wooden rectangular frame of size $60 \times 40 \times 2 \text{ cm}$ inside the reverberation room.

The minimum required distances between sources, microphones and any reflecting surface were resized using a factor of 1.6. The working frequency range at $1/3$ octave intervals is from 0.4 kHz to 6.3 kHz in order to ensure the diffuse-field specifications described in the standard ISO 354 [28]. The sound source used is a Genelec 8030A, which has a free-field frequency response of $58 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$ ($\pm 2.0 \text{ dB}$) at 1 m . Measurements of the reverberation time were performed first with the empty chamber and then with the chamber containing the test samples under the same conditions of air temperature ($T = 20.5 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) and relative humidity ($\text{RH} = 56 \pm 5\%$) by using the so-called interrupted noise method, where the sound pressure level decays after excite the room with broadband pink noise. In this study, the sound source positions are located at the corners of the reverberation chamber in order to excite the room modes. The position of the textile sample inside the chamber is shown in Figure 8.



Figure 8. Experimental setup in the small-sized reverberation chamber. Fabric samples correspond to the configurations a) T0 and b) T8.

The reverberation time RT is estimated according to the Sabine [29] and Eyring [30–32] equations, where V is the volume of the small-sized reverberation chamber (m^3), A is the total absorption area (m^2) and S is the area covered by the test specimen (m^2):

$$RT_{\text{Sabine}} = 0.162 \frac{V}{A}, \quad (12)$$

$$RT_{\text{Eyring}} = \frac{0.162V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})}, \quad (13)$$

with

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i, \quad (14)$$

where S_i is the area of the i -th surface and α_i is the Eyring sound power absorption coefficient attributed to the i -th surface.

In Sabine method, the random incidence sound absorption coefficient, α_s , of the sample is evaluated from the Equation (12), as

$$\alpha_s = \left[0.162V \cdot \left(\frac{1}{RT_2} - \frac{1}{RT_1} \right) \right] \cdot \frac{1}{S}, \quad (15)$$

where RT is the reverberation time (s). The subscripts 1 and 2 refer to the average of the reverberation times of the chamber in each frequency band without and with the test sample, respectively.

5. Results and Discussion

The sound absorption coefficient at normal incidence was experimentally measured for the T0–T7 configurations given in Table 1. As it can be seen in Fig. 9, the sound absorption increases when the number of folds decreases and the folding height increases. In Fig. 9a, the influence of folding on the sound absorption is analyzed for $Z = 15$ cm, while in Fig. 9b it is evaluated for $Z = 20$ cm. In both figures, from 1 kHz to 3.15 kHz, an increase of sound absorption is observed for all folded samples compared to the unfolded sample. The maximum difference in the sound absorption coefficient between folded and unfolded samples is reached using folded textile fabrics with a low number of folds. This behavior is observed in all configurations analyzed. The

distance between folds leads to apparently no important differences in the normal incidence sound absorption coefficient.

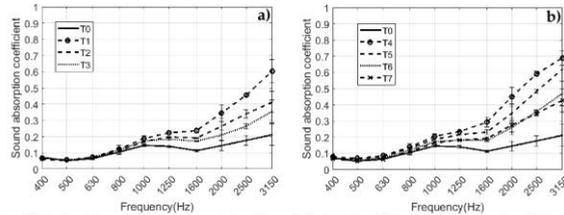


Figure 9. Results of the normal incidence sound absorption coefficient of folded fabrics with different number of folds. a) T0(n=0), T1 (n=5), T2(n=10), T3(n=15); Z = 15 cm; b) T0(n=0), T4 (n=5), T5(n=10), T6(n=15), T7(n=20); Z = 20 cm.

Figure 10 compares the sound absorption values obtained from the small-sized reverberation chamber by using two different calculation methods (Sabine, Eyring) for the T0, T8, T9 and T10 configurations considered in Table 1. The measurements of α_s were obtained from the difference between reverberation times of the chamber without and with specimens. The variation in the estimation of the reverberation time in both methods modifies the value of the average acoustic absorption. Same as shown in Figure 9 for normal incidence, in diffused conditions, an increase of sound absorption coefficient is observed for all folding samples above 1 kHz. Folds contribute to increase the sound absorption with respect to the unfolded sample. In diffuse-field conditions, the oblique incident waves experience higher losses because sound waves pass through the folded fabric multiple times and the effect is enhanced. The higher differences in absorption due to folds are observed at a frequency of 2.5 kHz. No significant differences due to folding are observed at low frequencies below 0.8 kHz and at high frequencies above 4 kHz. Differences between folds are not significantly higher between T8, T9 and T10 folded fabrics to draw firm conclusions about the effect of the fold geometry on the sound absorption of the fabric in diffuse-field conditions.

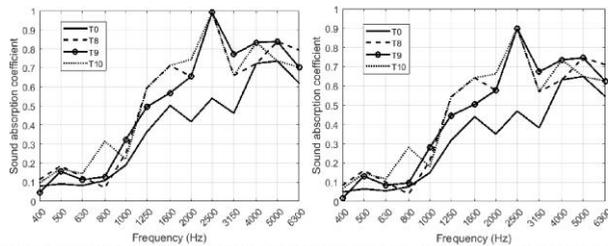


Figure 10. Results of the sound absorption coefficient obtained in the small-sized reverberation chamber by using air-cavity of 2 cm. left: Sabine method; right: Eyring method.

In Fig. 11, the statistical sound absorption coefficients measured in the reverberation chamber, presented in the Section 4.3, are compared to the predicted α_s for unfolded and folded textile fabrics. For the calculation, the model presented in Section 2.2 has been used in Fig. 11a and the

model described in Section 2.3 has been applied in Fig. 11b. In both cases, a reasonably good agreement between measured and calculated results is achieved from 0.4 kHz to 6.3 kHz. In addition, the resonance, where the damping effect is the highest, is well predicted by the model in all configurations. In Fig. 11b, the difference between measured and calculated values is gradually increased with the increase of frequency. In this case, for frequencies above 4 kHz the model predicts lower values than measurements. As a hypothesis for this deviation, in the folded textile fabric there is a variation of the air-cavity depth, reducing significantly the interference patterns. This effect may be causing an underestimation of measured α_c values, at high frequencies. Although the model accounts for this effect in Equation 5, this approach may be deficient at high frequencies.

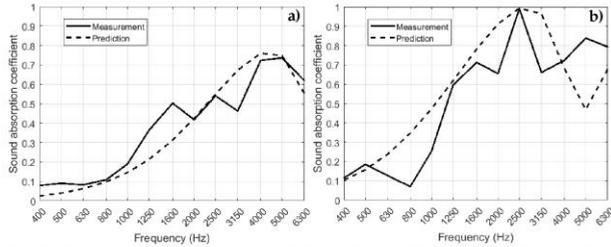


Figure 11. Measured and predicted statistical sound absorption coefficients for unfolded and folded configurations. a) Unfolded T0 fabric; b) T8 fabric.

6. Conclusions

The normal incidence sound absorption coefficient using an impedance tube and the random-incidence sound absorption coefficient using a small-scale reverberation chamber have been measured experimentally in order to determine the influence of geometric design parameters in folded textile fabrics.

A comparative analysis of cotton specimens with different number of folds is presented. In both methods used, the folding of textile fabrics increases the sound absorption at medium and high frequencies compared to the unfolded fabric, but the folding effect saturates with a certain number of folds in the working frequency range.

Experimental results have been validated by a theoretical method predicting the diffuse-field sound absorption in reverberation chamber of both unfolded and folded samples backed by an air-cavity.

The textile model has been developed under the assumptions of ideal diffuse sound field in the small-sized reverberation chamber, the uniform distribution of folding structures and considering the multiple times that the sound waves pass through the textile structure.

Funding

This research was financially supported by the Ministry of Economy and Innovation (MINECO) and the European Union FEDER through project FIS2015-65998-C2-2 and by project ACIF/2017/073 by Regional Ministry of Education, Culture and Sport of the Generalitat Valenciana and with the support of European Structural Investment Funds (ESIF-European Union).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest with respect to the research, publication and authorship of this article.

References

1. Padhye R, Nayak R. Acoustic Textiles. Textile Science and Clothing Technology. Melbourne, Victoria, Australia (Springer), 2016.
2. Midha VK, Chavhan MdV. Nonwoven sound absorption textiles. *Int J Text Fash Tech*, 2012;2(2):45–55. ISSN: 2250-2378.
3. Mathur K, Seyam AF. Color and weave relationship in woven fabrics. *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*, 2011;129–150. <https://doi.org/10.5772/20856>.
4. Kang Y, Lee E, Lee K, Choi S, Shin E. Acoustic properties of sound-absorbing polyester fabrics woven with thick staple and thin draw textured yarn for use in interior decoration. *J Text Inst*, 2018;110(2):202-210. <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1508798>.
5. Shoshani Y, Rosenhouse G. Noise absorption by woven fabrics. *Appl Acoust*, 1990;30(4):321–333. [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(90\)90081-5](https://doi.org/10.1016/0003-682x(90)90081-5).
6. Pierce AD. Acoustics: an introduction to its physical principles and applications. New York: McGraw-Hill Book Co; 1981.
7. Sakagami K, Kiyama M, Morimoto M, Takahasi D. Detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane. *Appl Acoust*, 1998;54(2):93–111. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00085-6).
8. Moholkar VS, Warmoeskerken MMCG. Acoustical Characteristics of Textile Materials. *Text Res J*, 2003;73(9):827–837. <https://doi.org/10.1177/004051750307300914>.
9. Sakagami K, Fukutani Y, Yairi M, Morimoto M. A theoretical study on the effect of a permeable membrane in the air cavity of a double-leaf microperforated panel space sound absorber. *Appl Acoust*, 2014;79:104–109. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.12.015>.
10. Kang J, Fuchs HV. Predicting the absorption of open wave textiles and micro perforated membranes backed by an air space. *J Sound Vib*, 1999; 220(5):905–920. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1977>.
11. Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text Res J*, 2012;82(9):864–874. <https://doi.org/10.1177/0040517511429604>.
12. Pieren R, Heutschi K. Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method. *Appl Acoust*, 2015;92:27–41. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.003>.
13. Segura-Alcaraz P, Segura-Alcaraz J, Montava I, Bonet-Aracil M. The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. *Autex Res J*, 2018;18(3):269–280. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0006>.
14. Na Y, Lancaster J, Casali J, Cho G. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Text Res J*, 2007; 77(5):330–335. <https://doi.org/10.1177/0040517507078743>.

15. Segura-Alcaraz MP, Bonet-Aracil M, Segura-Alcaraz JC, Montava Seguí I. Sound absorption of textile material using a microfibrils resistive layer. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2017;254:072022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/254/7/072022>.
16. Knittel C, Nicholas D, Street R, Schauer C, Dion G. Self-Folding Textiles through Manipulation of Knit Stitch Architecture. *Fibers*, 2015;3(4):575–587. <https://doi.org/10.3390/fib3040575>.
17. Pirn R. Some objective and subjective aspects of three acoustically variable halls. *Appl Acoust*, 1992;35(3):221–231. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682x\(92\)90041-P](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682x(92)90041-P).
18. del Rey R, Alba J, Blanes M, Marco B. The acoustic absorption of textile curtains on the function of the fullness. *Mater Constr*, 2013;63(312):569–580. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.05512>.
19. Hanna YI, Kandil MM. Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Appl Acoust*, 1991;34(4):281–291. [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(91\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0003-682x(91)90011-3).
20. Demiryürek O, Aydemir H. Sound absorption properties of roller blind curtain fabrics. *J Ind Text*, 2016;44(1):3–19. <https://doi.org/10.1177/1528083716631332>.
21. Pieren R, Schäffer B, Schoenwald S, Eggenschwiler K. Sound absorption of textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Text Res J*, 2016;88(1):36–48. <https://doi.org/10.1177/0040517516673337>.
22. Thomasson S-I. On the absorption coefficient. *Acustica*, 1980;44(4):265–273.
23. Jeong C-H. Non-uniform sound intensity distributions when measuring absorption coefficients in reverberation chambers using a phased beam tracing. *J Acoust Soc Am*, 2010;127(6):3560–3568. <https://doi.org/10.1121/1.3397475>.
24. Yu X, Fang H, Cui F, Cheng L and Lu Z. Origami-inspired foldable sound barrier designs. *J Sound Vib*, 2018;442:514–526. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.025>.
25. ISO 10534-2. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method. *Acoust Comite Europeen de Normalisation*, Brussels, 1998.
26. Ingard KU, Dear TA. Measurement of Acoustic Flow Resistance. *J Sound Vib*, 1985;103:567–572. [https://doi.org/10.1016/S0022-460x\(85\)80024-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460x(85)80024-9).
27. del Rey R, Alba J, Bertó L, Gregori A. Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Mater Constr*, 2017;67(328):9. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07316>.
28. ISO 354. Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room. TC: ISO/TC 43/SC 2 *Building acoustics*, ICS: 91.120.20, 2003.
29. Sabine WC. *Collected papers on acoustics*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1922.
30. Eyring CF. Reverberation time in “dead” rooms. *J Acoust Soc Am*, 1930;1:217–239. <https://doi.org/10.1121/1.1915175>.
31. Eyring CF. Reverberation time measurements in coupled rooms. *J Acoust Soc Am*, 1931;3:181–206. <https://doi.org/10.1121/1.1915555>.
32. Eyring CF. Methods of calculating the average coefficient of sound absorption. *J Acoust Soc Am*, 1933;4:178–192. <https://doi.org/10.1121/1.1915599>.

Absorción acústica de nuevos tejidos textiles



Atiénzar, Roberto⁽¹⁾; Picó, Rubén⁽¹⁾; del Rey, Romina⁽¹⁾; Gisbert-Payá, Jaime⁽²⁾

⁽¹⁾ Escuela Politécnica Superior de Gandia, UPV, España

⁽²⁾ Escuela Politécnica Superior de Alcoy, UPV, España
roatna@doctor.upv.es

PACS: 43.58.Bh

Premio Andrés Lara para jóvenes investigadores 2018

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo poder evaluar nuevos materiales absorbentes de sonido provenientes de la ingeniería textil. Para la caracterización del comportamiento acústico de los tejidos textiles se hace uso del tubo de Kundt; por una parte, se hace una campaña de mediciones de coeficiente de absorción sonora a incidencia normal; por otra, se realizan mediciones de resistencia al flujo basado en el trabajo de Ingard&Dear. Se presenta un análisis comparativo entre la absorción acústica de las telas no dopadas, con las mismas, dopadas con microcápsulas antimicrobianas. Además, se hace uso de un plenum con objeto de mejorar la absorción acústica de estos tejidos.

Palabras clave: ingeniería textil, tubo de Kundt, absorción sonora, resistencia al flujo, microcápsulas.

Abstract

The aim of this study is to evaluate new sound absorbing materials from the textile engineering. For the characterization of the acoustic behavior of the textile fabrics, the Kundt tube is used: on the one hand, a campaign of sound absorption coefficient measurements are made at normal incidence; on the other hand, flow resistance measurements are made based on Ingard & Dear work. A comparative analysis is presented between the acoustic absorption of non-doped fabrics with the same doped with antimicrobial microcapsules. In addition, a plenum is used in order to improve the acoustic absorption of these fabrics.

1. Introducción

El uso de textiles acústicos está aumentando rápidamente debido a la aparición de mayores áreas de aplicación y nuevos avances tecnológicos. Históricamente han sido ampliamente utilizados en lugares públicos, como el teatro, en forma de cortina, moqueta etc. con el fin de mejorar la calidad del sonido [1].

Recientemente se ha propuesto la modificación de las fibras o tejidos con el fin de obtener nuevos textiles con propiedades acústicas mejoradas [2-3]. Una técnica que consiste en la utilización de microcápsulas con el propósito de conferir nuevas propiedades a las telas. Estas microcápsulas se pueden adherir al tejido textil por diversos métodos: impregnación, agotamiento convencional (baño), espumado, pulverización y recubrimiento.

Debido al tamaño de las microcápsulas, imperceptibles al ojo humano, se emplean una serie de técnicas de caracterización a fin de estudiar los tejidos textiles dopados con microcápsulas [4-6]. Se usa un microscopio electrónico de barrido (SEM) con la finalidad de producir imágenes de alta resolución de la superficie de un ejemplo de microcapsulado.

Zhou et al. [7] estudió las propiedades de absorción acústica de un material con micropartículas de polímero. Los resultados revelaron que las microesferas poliméricas porosas tenían un coeficiente de absorción acústica mayor que los materiales clásicos. Además se demostró la posibilidad de aplicar microesferas en polímeros huecos porosos como material absorbente [8]. Zhi et al. [9] investigó el efecto de las micropartículas en la absorción sonora de muestras de espuma sintética. Los resultados

determinaron que la absorción de la muestra aumentaba cuando el tamaño de las micropartículas era menor.

El objetivo de este trabajo es comparar la influencia de las microcápsulas en los tejidos textiles y estimar sus propiedades como absorbente de sonido. Para este estudio se han utilizado dos telas diferentes, *Nicole* y *Felice*.

2. Materiales y métodos

En el laboratorio de Química Textil de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy se ha desarrollado el proceso de dopado mediante el uso de microcápsulas adheridas en los diferentes tejidos textiles. Las microcápsulas empleadas contenían como principio activo aceite esencial de Lavanda y fueron suministradas por InnovaTec S&C S. L.

Se utiliza la técnica de fulardado para aplicar las microcápsulas sobre los tejidos. Esta técnica consiste en impregnar las telas en un baño que contiene una determinada solución: una dispersión de microcápsulas de tamaño entre 1 micra y 8 micras en agua destilada con una concentración de 100 g/L. El proceso de fulardado se realiza en un fulard horizontal TEPA en condiciones que aseguren un pick up (% de baño que absorbe la

muestra) del 80%. Posteriormente, las muestras son secadas durante unos 3 min en un secadero horizontal de infrarrojos a una temperatura de 105°C.

Para la caracterización morfológica (Figura 1), se ha utilizado la microscopía electrónica de barrido de emisión de campo FESEM (ULTRA 55, ZEISS), empleando un voltaje de aceleración de 2kV en las superficies a analizar de cada una de las muestras.

El proceso aplicado a las muestras suele garantizar una distribución aproximadamente uniforme en todo su conjunto. No obstante, debe tenerse en cuenta que la precisión de la técnica no asegura que la distribución de microcápsulas sea rigurosamente regular (Figura 1). Las muestras, así como las medidas acústicas, pueden por tanto, presentar cierta heterogeneidad.

En el laboratorio de caracterización de materiales acústicos de la Escuela Politécnica Superior de Gandía se ha llevado a cabo toda la campaña de mediciones con el fin de obtener los parámetros acústicos (coeficiente de absorción sonora a incidencia normal y resistencia específica al flujo) que caractericen las telas. Los tejidos textiles sujetos a ensayo en este trabajo se muestran en la Figura 2.

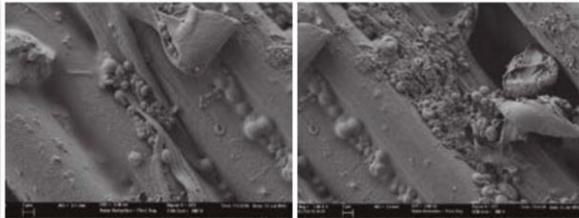


Figura 1. Detalle del microscopio electrónico (SEM) con microcápsulas (2000X de aumento).

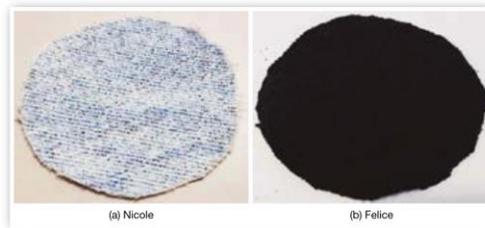


Figura 2. Tejidos textiles utilizados en el estudio.

Los métodos utilizados en este estudio son, por un lado, la Norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 [10], para determinar el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal; por otro lado, las recomendaciones del trabajo de Ingard&Dear [11] para obtener la resistencia específica al flujo.

El método descrito en la Norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 es aplicado con el fin de obtener el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal; para ello se emplea un tubo de impedancia acústica de metacrilato, dos posiciones fijas de micrófono y un sistema digital de análisis de señal. Se utiliza la plataforma de medida Pulse como base para las mediciones.

Este método presenta una gran ventaja de cara a la investigación científica debido a que requiere poco espacio de trabajo en el laboratorio y porque solamente se necesitan muestras del mismo tamaño que el diámetro del tubo de impedancia.

La técnica de medición se fundamenta en la emisión de ondas planas a través del tubo gracias a la fuente sonora que se conecta a uno de sus extremos; en el lado opuesto, se monta la muestra sometida a estudio. Los micrófonos, montados en la pared del tubo, se colocan en una posición cercana a la muestra a fin de registrar la presión acústica. Se determina la función de transferencia acústica compleja (H_{12}) de las señales en ambos micrófonos dada en [10], con el objetivo de calcular el coeficiente de reflexión complejo (r) y el coeficiente de absorción sonora (α), a incidencia normal.

Durante la realización del ensayo se procede a corregir la fase entre ambos micrófonos, para ello, se intercambian los dos canales para cada una de las medidas. Por ende, para cada una de las muestras se llevan a cabo dos medidas: una con los micrófonos en una posición; y en otra, con los micrófonos intercambiados. Con lo que se obtiene la función de transferencia H_{12} y H_{21} , respectivamente.

$$r = \frac{H_{12} - H_{21}}{H_{11} - H_{22}} e^{2j\omega x_1} \quad (1)$$

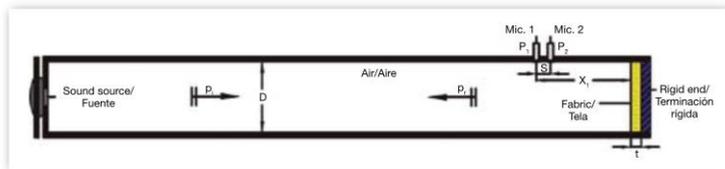


Figura 3. Esquema del dispositivo experimental para la medida del coeficiente de absorción a incidencia normal [UNE – EN ISO 10534 – 2:2002].

Donde H_i es la función de transferencia para la onda incidente, H_r es la función de transferencia para la onda reflejada, k_p es el número de onda y x_1 es la distancia entre la muestra y la posición última de micrófono.

A partir del resultado de la ecuación (1) se define en (2) el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal (α) que representa el cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la tela y la energía acústica incidente, para una onda acústica plana, a incidencia normal.

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

En este método, el rango frecuencial útil está limitado por el diámetro del tubo y por la distancia entre ambos micrófonos. En la Figura 3 se muestra un esquema del tubo experimental utilizado durante el ensayo.

Donde t es el espesor del tejido textil, s representa la separación entre ambos micrófonos, en este caso de 32 mm, X_1 es la distancia entre la muestra y la posición última de micrófono, D es el diámetro interior del tubo de 40 mm, p_i es la presión acústica de la onda incidente y p_r es la presión acústica de la onda reflejada.

En la Figura 4 se puede ver en detalle la parte final del tubo de impedancia, donde se muestra la colocación de ambos micrófonos de acuerdo a la normativa citada con anterioridad, y el portamuestras utilizado.

Una vez finalizados los ensayos del coeficiente de absorción de los tejidos textiles colocados al final del tubo de impedancia, se midió el coeficiente de absorción en incidencia normal con un plenum de 10 cm con el objetivo de poder abordar la influencia de la cavidad (e) de aire en la absorción acústica del tejido. En la Figura 5 se muestra un esquema del montaje experimental, y en la Figura 6.a se puede observar, con detalle, el montaje empleado en este ensayo.

Por otra parte, siguiendo las indicaciones de los autores Ingard&Dear [11] se ha obtenido de forma experimental la resistencia específica al flujo de las diferentes muestras para determinadas frecuencias (Figura 6.b).

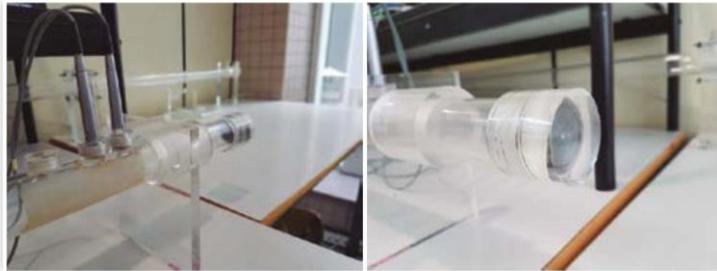


Figura 4. Detalle del montaje experimental para la medida del coeficiente de absorción a incidencia normal.

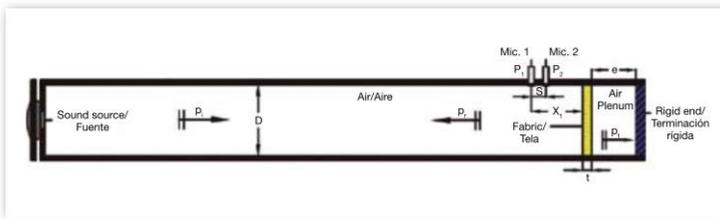


Figura 5. Esquema del dispositivo experimental para la medida del coeficiente de absorción a incidencia normal [UNE – EN ISO10534 – 2:2002] con un plenum de $(e) = 10$ cm.

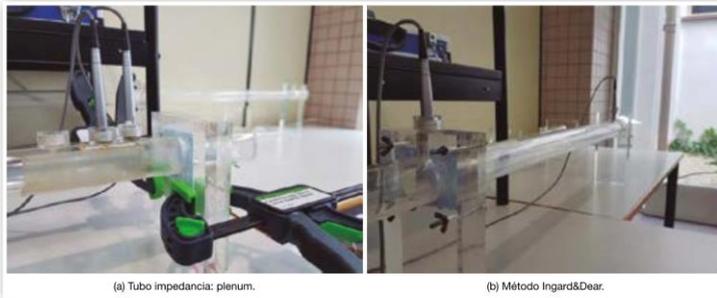


Figura 6. (a) Detalle del montaje experimental para la medida del coeficiente de absorción a incidencia normal con un plenum (e) de 10 cm; (b) Detalle del montaje experimental para la medida de resistencia específica al flujo.

La resistencia al flujo se define como la relación existente entre la caída de presión y la velocidad del flujo a través de una muestra. En la Figura 7 se muestra un esquema experimental del tubo utilizado en el método Ingard&Dear.

La tela, de espesor t , se coloca en el medio del tubo. L es la distancia entre la cara posterior del tejido textil y la terminación rígida. Uno de los micrófonos (Mic. 1) se coloca delante de la muestra a fin de medir directamente la presión acústica (p_1). El otro micrófono (Mic. 2) se ubica junto a la terminación rígida.

La fuente sonora emite ondas planas con objeto de producir resonancias asociadas a múltiplos impares de $\lambda/4$ a lo largo de la distancia que abarca desde la muestra (t) hasta la terminación rígida del tubo (L).

De esta forma, y bajo las condiciones que se especifican en [11], el cálculo de la resistividad al flujo se puede obtener a partir de la ecuación (3):

$$\sigma = \left(\frac{\rho c}{t} \right) \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (3)$$

Donde t es el espesor de la muestra, ρ la densidad media del aire, c la velocidad del sonido en el interior del tubo, p_1 la presión captada por el Mic. 1 y p_2 la presión registrada en el Mic. 2.

3. Resultados

En la tabla 1 se muestran las diferencias físicas en densidad y espesor de los distintos tejidos textiles. Además, se presentan los valores de resistividad al flujo de

las telas dopadas y sin dopar con su desviación estándar para determinadas frecuencias de validez, de acuerdo con el procedimiento descrito en [11].

En la Figura 8 se representan los resultados obtenidos del coeficiente de absorción acústica con la muestra al final del tubo y mediante uso de plenum, siguiendo las indicaciones de montaje que detalla la Norma UNE-EN ISO 10534-2:2002.

En las Fig. 8(a) y 8(b) se representa el coeficiente de absorción sonora de las dos telas sujetas a estudio en la configuración al final del tubo. Se puede ver que la capacidad de absorción de los tejidos textiles dopados es ligeramente superior en medias y altas frecuencias. A bajas frecuencias se percibe un cambio de comportamiento de la tela Felice, ya que la tela no dopada presenta una absorción ligeramente mayor que la dopada (ver Fig. 8(a)).

En cuanto a la configuración de medida con plenum, en la Fig. 8(c) se observa un comportamiento en frecuencia de la tela similar al medido al final del tubo, sin plenum (en Fig. 8(a)). A bajas frecuencias la absorción de la tela no dopada es superior, mientras que a medias frecuencias, el tejido dopado presenta una absorción mayor; en la Fig. 8(d) se percibe el efecto contrario que en la Fig. 8(c), donde a bajas y medias frecuencias, la tela no dopada muestra una absorción mayor salvo el pico de absorción que presenta la tela dopada sobre 300Hz, y si se compara con la Fig. 8(b), se deduce que el dopado no es tan influyente, para este caso, a nivel de absorción sonora; en altas frecuencias ambas telas (Felice y Nicole) no presentan grandes cambios.

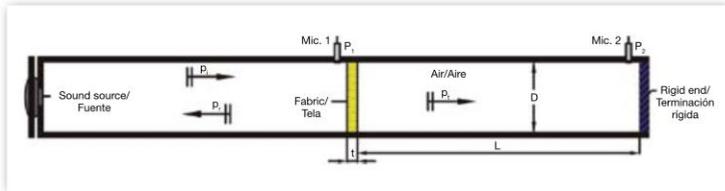


Figura 7. Esquema del dispositivo experimental para la medida de la resistencia específica al flujo según el método Ingard&Dear [11].

Tabla 1. Datos técnicos de los tejidos textiles dopados y no dopados.

Telas	Espesor (cm)	Densidad (g/m ²)	Resistividad al flujo	Resistividad al flujo
			No dopada (kPa · s/ m ²)	Dopada (kPa · s/ m ²)
Felice	0.07	245	571-579	577-581
Nicole	0.06	239	613-679	660-680

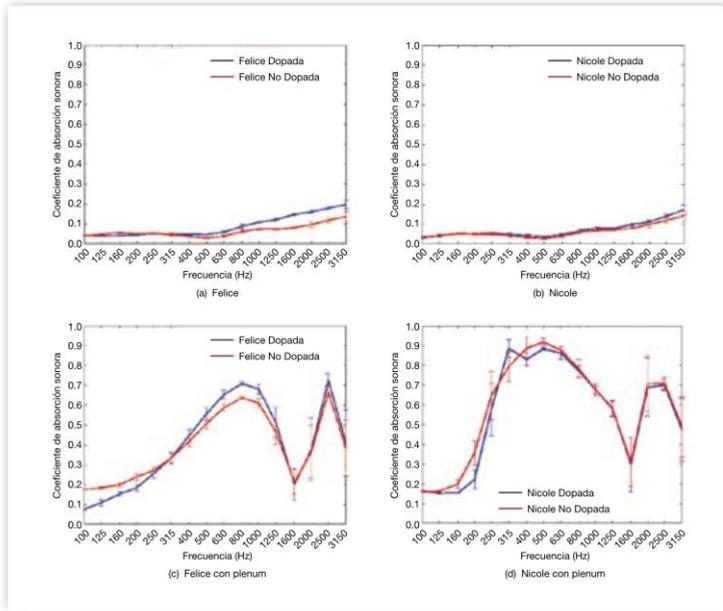


Figura 8. Medida del coeficiente de absorción de las telas Felice y Nicole con y sin plenum. En ambos casos se compara la tela dopada (en azul) con la misma, sin dopar (en rojo) y se muestra mediante barras de errores el porcentaje de dispersión de las medidas.

4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado algunos ejemplos como alternativa a las soluciones acústicas basadas en textiles clásicos. Se abre así un nuevo campo de trabajo entre la ingeniería textil y la acústica, explorando la influencia del dopaje en tejidos.

Se puede observar en las pruebas realizadas, en el tubo de impedancia, con telas dopadas sin plenum, que hay un pequeño cambio pero prácticamente todos los tejidos textiles dopados analizados no muestran grandes diferencias con los mismos sin dopar debido a su espesor. En cambio mediante el uso de un plenum sí que se observan cambios significativos, como es el caso del tejido textil Felice, donde se consigue un aumento en la absorción a medias frecuencias.

Cabe destacar que la heterogeneidad de las muestras dopadas no ha sido un parámetro a considerar en este trabajo previo. Como futura línea de investigación queda pendiente evaluar no solamente la homogeneidad de los tejidos de base dopada, sino también la densidad de dopaje, distribución, tamaño de las microcápsulas, método de dopado, etc.

5. Agradecimientos

Este trabajo está subvencionado por el Ministerio de Economía e Innovación (MINECO) y por el Fondo Europeo (FEDER) a través del proyecto FIS2015-65998-C2-2 y por los proyectos GVA AICO/2016/060 y ACIF/2017/073 por la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana.

6. Referencias

- [1] Padhye, R., and Nayak R. (2016). Acoustic Textiles. *Textile Science and Clothing Technology*. Melbourne, Victoria, Australia: Springer. DOI: 10.1007/978-981-10-1476-5_1
- [2] Bonet Aracil, M. Á., Monllor, P., Capablanca, L., Gisbert, J., Díaz, P., and Montava I. (2015). A comparison between padding and bath exhaustion to apply microcapsules onto cotton. *Cellulose*, Vol. 22, pp. 2117–2127. DOI: 10.1007/s10570-015-0600-8
- [3] Monllor, P., Capablanca, L., Gisbert, J., Díaz, P., Montava, I., and Bonet, M. Á. (2010). Improvement of Microcapsule Adhesion to Fabrics. *Textile Research Journal*. Vol. 80(7), pp. 631–635. DOI: 10.1177/0040517509346444
- [4] Ré, M. I., and Biscans, B. (1999). Preparation of microspheres of ketoprofen with acrylic polymers by a quasi-emulsion solvent diffusion method. *Powder Technology*, Vol. 101(2), pp. 120–133. DOI: 10.1016/S0032-5910(98)00163-6
- [5] André-Abrant, A., Taverdet, J. -L., and Jay, J. (2001). Microencapsulation par évaporation de solvant. *European Polymer Journal*. Vol. 37(5), pp. 955–963.
- [6] Kim, J. W.; Ko, J.-Y., Jun, J.-B., Chang, I.-S., Kang, H. H., and Suh, K.-D. (2003). Multihollow Polymer Microcapsules by Water-in-Oil-in-Water Emulsion Polymerization: Morphological study and Entrapment Characteristics. *Colloid Polymer Science*. Vol. 281(2), pp. 157–163. DOI: 10.1007/s00396-002-0763-3
- [7] Hong Z., Bo L., and Guangsu H. (2006). Sound absorption behavior of multiporous hollow polymer micro-spheres. *Materials Letters*, Vol. 60, pp. 3451–3456. DOI:10.1016/j.matlet.2006.03.030
- [8] Hong, Z., Bo, L., and Guangsu, H. (2006). Sound Absorption Characteristics of Polymer Microparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 101, pp. 2675–2679. DOI: 10.1002/app.23911
- [9] Zhi, C., and Longa, H. (2016). Sound Absorption Properties of Syntactic Foam Reinforced by Warp-knitted Spacer Fabric. *Cellular Polymers*, Vol. 35(5), pp. 271–286. DOI: 10.1177/026248931603500503
- [10] UNE-EN ISO 10534-2. (2002). Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method. *Acoustics*.
- [11] Ingard, K. U., and Dear, T. A. (1985). Measurement Of Acoustic Flow Resistance. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 103(4), pp. 567–572. DOI: 10.1016/S0022-460X(85)80024-9

Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules¹



Atiánzar, R.¹; Bonet-Aracil, M.²; Gisbert-Payá, J.²; del Rey, R.²; Picó, R.¹

¹ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras – IGIC, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

² Departamento de Ingeniería Textil y Papelera – DITEXPA, Universitat Politècnica de València, Alcoy Valencia, Spain

³ Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

roatna@doctor.upv.es

PACS: 43.58.Bh

Premio Andrés Lara para jóvenes investigadores 2019

I-INCE Classification of Subject Number: 35

Resumen

El desarrollo de nuevos tejidos textiles con microcápsulas depositadas en sus fibras está en auge dentro de la industria textil. El objetivo de este estudio se centra en analizar la influencia del dopaje de diferentes tejidos textiles de algodón con microcápsulas en el coeficiente de absorción sonora. Para determinar las propiedades acústicas de los nuevos materiales de absorción sonora, se utilizaron técnicas clásicas para la caracterización de materiales; el coeficiente de absorción sonora en incidencia normal y la resistencia al flujo de aire basada en el trabajo de Ingard&Dear. Se presenta un análisis comparativo entre la absorción sonora de tejidos de algodón con la misma densidad de hilo y diferente concentración de microcápsulas y diferentes densidades de hilo con el mismo porcentaje de dopaje. Los resultados muestran que la concentración de microcápsulas en correlación con la densidad de hilo tiene una influencia significativa en el coeficiente de absorción sonora.

Abstract

The development of new textile fabrics with microcapsules deposited on their fibers is on the rise within the textile industry. The aim of this study is focused on analyzing the influence of doping different cotton textile fabrics with microcapsules on the sound absorption coefficient. In order to determine the acoustic properties of the new sound absorbing materials, classical techniques for materials characterization were used: the sound absorption coefficient at normal incidence and the airflow resistance based on the Ingard&Dear work. A comparative analysis between the acoustic absorption of cotton fabrics with the same yarn density and different concentration of microcapsules and different yarn densities with the same doping percentage is presented. Results show that the concentration of microcapsules in correlation with the yarn density has a significant influence in the sound absorption coefficient.

Keywords: sound absorption; cotton textile fabrics; microcapsules.

1. Introduction

Noise pollution means the presence of any kind of noise or vibration that may cause nuisance, harm or risk on people and the environment [1].

In the last few years, according to the World Health Organization (WHO) [2], noise pollution has become very

important due to the detection of psychological and physiological problems on the population because of the excess of sound produced mainly by human activities [3]. A few examples of this are tachycardia, pupil dilation, fatigue, hearing loss, stress, headache, less blood supply, decreased working capacity, and cardiovascular disorders.

¹ Artículo publicado en inglés por haber sido presentado y premiado en INTER-NOISE 2019.

Traditionally, with the aim of reducing noise pollution, absorbent materials such as glass wool or mineral wool were used, which are difficult to recycle [4]. All these materials have in common characteristics of materials that absorb sound. At present, this trend is changing and proof of this are the European Research and Innovation programs (H2020 and H2030) [5-6]. Nowadays, research should pay attention to develop new absorbent materials in order to replace other materials more aggressive towards the environment [7]. The idea is to use natural fibers from recycled materials instead of petroleum derivatives, which can become acoustic materials applicable to environment, construction, transport, industry and other areas [8-11].

In the textile industry, many wastes are generated during manufacturing processes. It is a good idea to reuse such wastes to manufacture new fabrics, in combination with natural fibers or other types of fibers. For that purpose, different techniques such as knitting, weaving or nonwoven are used [12, 13]. The acoustic properties of fabrics may vary depending on the method of preparation, their nature, fibers and pore treatment, yarn density and humidity conditions.

Textile fabrics have been widely used in public spaces [14,15], such as museums, theaters, opera houses and other spaces with the objective of providing the most sound quality by using carpets or curtains as an example. At present, the consumption of textile fabrics is increasing rapidly throughout the world due to the appearance of new areas of application in construction, transport and industry [16].

The most commonly used textiles for acoustic purposes are nonwovens and due to its lack of aesthetic appeal, these textiles are covered with woven fabrics in order to produce a pleasant appearance [17]. In 1990, Shoshani showed in [18] that some intrinsic parameters analyzed of nonwoven fiberwebs and woven fabrics, like number of fiberwebs layers, fiber contents and the opening angle between individual panels, have a small effect on the sound absorption coefficient at low frequencies, but a significant effect at high frequencies. In 2007, Na et al. investigated in [19] the sound absorption properties of micro-fiber fabrics. With the same thickness, micro-fiber fabrics have higher sound absorption than traditional textile fabrics due to its greater surface area, resulting in higher airflow resistance. In 2012, Chevillotte studied in [20] a porous multilayer controlled by a woven fabric in order to enhance the sound absorption performance. The results evidenced an improvement of sound absorption at low frequencies, and recently, Segura-Alcaraz et al. researched in [21] the best combination fabric-nonwoven and the results presented showed a good interaction between both of them obtaining thermal effects of the

nonwoven and resonant effects of the fabric causing a significant variation in the sound absorption coefficient.

Due to the rapid evolution in textile engineering, Nelson G. (1991) considered the use of microcapsules (MICs) in textile fabrics for the first time [22]. With MICs is possible to confer new properties to textile fibers in order to improve acoustic properties with respect to traditional nonwoven textiles [23, 24].

MICs are micrometric particles composed of one or more active ingredients that consist of a membrane (outer layer) that encompasses the active compound in the nucleus [25]. Microencapsulation is used to alter the physical properties of the volatile substance used in order to make it more manageable and to protect it from multiple external factors such as sunlight, evaporation, humidity, alkalinity, unwanted rubbing action or the combination between them [26]. The most known industrial methods for adhering microcapsules onto textile fabrics are bath exhaust, padding, spraying or coating.

Since the introduction of microencapsulation in the textile sector many modern applications were developed. Some examples are uniforms, gloves and military tents with microencapsulated insecticide, fabrics with durable fragrances, T-shirts with microcapsules to absorb UV rays, ski suits, clothing with thermo-changeable dyes and thermal regulation of car seats [27, 28].

Unlike microspheres, the MICs are particles composed of one or more active agents in their interior, whose membrane (external part) protects the nucleus (active principle). In this contribution, we evaluate the influence of doping cotton fabrics with MICs by measuring the sound absorption coefficients with an impedance tube and using an air-cavity between fabric sample and the rigid end. A comparative analysis of cotton (CO) fabrics with the same yarn density and with different content of microcapsules is presented. The effect of the different yarn densities with the same doping percentage are also studied. Through the doping of the textile fabrics with MICs, it is possible to control the sound absorption.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Cotton has been widely used in the textile industry for its biodegradable natural fibre, permeability, softness, comfort and high wettability [29]. In this study, CO fabric samples were obtained with a chemically and optically bleached. Two cotton fabrics from the same family but with different grammage, dyeing and yarn density have been analyzed in this manuscript. It was a twill weaved fabric with 115 g/m² and 210 g/m² and no chenille was included (see Fig. 1).

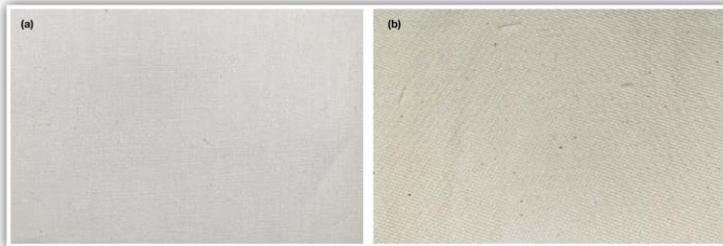


Figure 1. Cotton textile fabrics used in this study. Left: CO fabric with a yarn density of 115 g/m²; Right: CO fabric with a yarn density of 210 g/m².

2.2. Adhering microcapsules on fabrics

Microcapsules were deposited on the surface of the fabric by padding. It is an impregnation technique, which consists of a rapid immersion process of the textile sample and two squeezing rolls press the liquid from both sides in the treatment bath, to force the substrate to pass through the fibres. The squeeze roll speed and pressure were regulated in order to obtain 80% wet pick-up [30]. The padding process was made with a horizontal foulard (2608 TEPA). The microcapsules applied on the woven fabrics are resistant to breakage and rubbing under normal conditions.

The MICs used have as active principle Lavender essential oil fragrance, which were supplied by InnovaTec S&C S. L., and its size varies from 3 µm to 6 µm. CO samples were prepared in a treatment bath depending on

the MIC concentrations: 5 g/L, 15 g/L, and 25 g/L. To complete the adhesion process between fibres and MICs, the CO samples were dried in a horizontal infrared dryer during 180 s at a temperature of 105° C.

MICs are imperceptible to the human eye due to its micrometric size. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) mod. ZEISS ULTRA 55 was used to observe the surface of the fabrics with high resolution (see Fig. 2). With this technique, it is possible to visualize the shape of the membrane of each microcapsule (smooth or rough), their structure, their size and their location [31, 32]. Each cotton sample was fixed on standard sample holder and the sputter-coated with a thin film of gold/platinum metal under vacuum conditions. This process was done in a Sputter Coater BAL-TEC mod. SCD005.

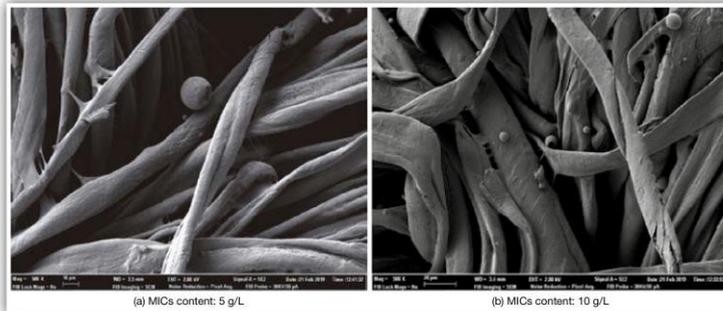


Figure 2. FESEM micrographs of cotton fabrics examined with suitable accelerating voltage of 2 kV and 500X magnifications. (a) Sample surface of CO fabric doped with MICs content of 5 g/L; (b) Sample surface of CO fabric doped with MICs content of 10 g/L.

2.3. Experimental setup

In the Higher Polytechnic School of Gandia at the Universitat Politècnica de València the measurement campaign was carried out. In order to characterize acoustically the cotton fabrics, two different methods were used: the standard ISO 10534-2:1998 [33], in order to determine the normal incidence sound absorption coefficient and the guidance proposed by Ingard&Dear in order to measure specific airflow resistance [34].

2.3.1. Sound absorption coefficient

According to the standard procedure detailed in [33], this method requires an impedance tube, two fixed microphone positions and a digital signal analysis system (Pulse LabShop v.22.2.0.197).

The impedance tube used is a rigid, methacrylate, smooth, transparent and airtight duct with circular cross section of 4 cm. At one end of the tube, a sound source

(Beyma CP800Ti loudspeaker) is placed; at the other end, an air-cavity of 10 cm is mounted (see Fig. 3). The pressure signal in each position is recorded by using two free-field Brüel&Kjær pressure microphones (type 4190 1/2-inch). The usable frequency range is limited from 100 Hz to 3150 Hz based on the distance between microphones, the precision of the signal processing equipment and the tube inner diameter [33]. In order to ensure incident plane waves $\lambda \gg 1.7D$. In Fig. 4a the experimental setup used in this test can be seen in considerable detail.

The transfer function from microphone position one to two, H_{12} , is defined as the complex ratio between the pressures registered in these positions:

$$H_{12} = \frac{p_2(\omega)}{p_1(\omega)} = \frac{e^{-jkx_2} + r e^{jkx_2}}{e^{-jkx_1} + r e^{jkx_1}}, \quad (1)$$

where r is the reflection coefficient, p_1 and p_2 are the acoustic pressures recorded by each microphone, k is

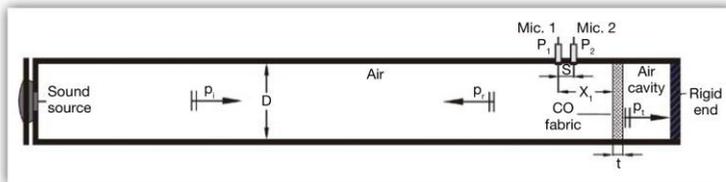


Figure 3. Schematic diagram of the impedance tube with an air-cavity of 10 cm used to measure the normal incidence sound absorption coefficient in accordance with the standard ISO 10534-2:1998. D is the tube inner diameter, p_i is the sound pressure of the incident wave, p_r is the sound pressure of the reflected wave, p_t is the sound pressure of the transmitted wave, and t is the sample thickness.

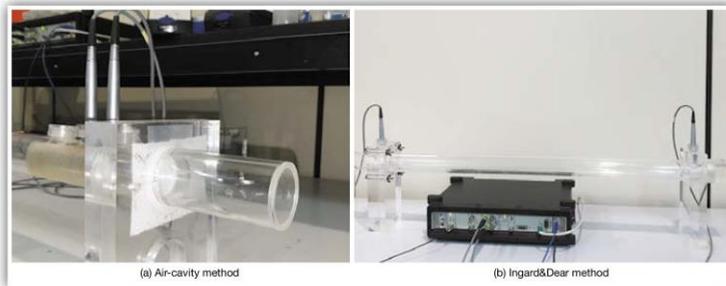


Figure 4. Experimental setup using the impedance tube. (a) Measurement of normal incidence sound absorption coefficient with an air-cavity; (b) Measurement of the airflow resistance according to Ingard&Dear method.

the wave number, x_1 and x_2 are the distances between both microphones to the CO sample.

The complex reflection coefficient, r , is obtained from the Eq. 1 and it can be observed as follows:

$$r = \frac{H_{12} - H_1 e^{2jk_0s}}{H_1 - H_{12}} \quad (2)$$

where $H_1 = e^{jk_0s}$ is the transfer function of the incident wave, s is the distance between both microphones ($s = 3.2$ cm), $H_{12} = e^{-jk_0s}$ is the transfer function of the reflected wave, k_0 is the wave number, $j = \sqrt{-1}$ and x_1 is the distance between the sample and the microphone placed further away from it.

The specific acoustic impedance, Z , is calculated from the Eq. 2 as follows:

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

where R is the real part, X is the imaginary part and ρc_0 is the characteristic impedance.

From Eq. 3 is calculated the normal incidence sound absorption coefficient (α), which represents the quotient between the acoustic energy absorbed by the surface of the sample and the incident acoustic energy for an acoustic plane wave at normal incidence can be obtained by

$$\alpha_n = 1 - |r|^2 \quad (4)$$

2.3.2. Airflow resistance

The airflow resistance evaluate the difficulty of an air stream to flow through the CO fabric per unit thickness (see Fig. 4b). The experimental setup is based on the indirect method proposed by Ingard&Dear obtaining the value of the specific airflow resistance under certain limitations [34].

In this method, the length of the impedance tube must be an odd multiple of a quarter wavelength of the sound in order to resonate. At low frequencies, and on the odd frequencies of $\lambda/4$, the airflow reactance is small compared to the airflow resistance, so the following simplification can be done:

$$\theta \approx \left| \frac{p_1}{p_2} \right| = \left| \frac{1}{H_{12}} \right| \quad (5)$$

It is possible to obtain the airflow resistance finding the minimum of the imaginary part of the pressure ratio p_1/p_2 . For all cotton fabrics, the minima were observed at 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 700 Hz and 900 Hz, approximately. Thus, it is possible to calculate the average values of the airflow resistivity, σ , (airflow resistance divided by the sample thickness) as follows:

$$\sigma = \left(\frac{\rho_0 c_0}{t} \right) \left| \operatorname{Im} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right| \left[\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad (6)$$

3. Results and discussion

This study aimed to explore the effect of doping cotton textile fabrics on the sound absorption. A study of different concentration of microcapsules with the same yarn density was performed and the results of sound absorption and impedance are presented in Fig. 5. A comparative analysis with the same doping percentage and different yarn density was accomplished (see Fig. 6).

Table 1 shows the physical differences in yarn density and thickness of the two CO fabrics studied. Also, the airflow resistivity values of each cotton sample untreated or doped with microcapsules are presented with their standard deviation, according to the procedure described in [34].

Table 1. Physical parameters of the cotton samples untreated and doped with different MICs concentration.

Type of CO fabrics	Thickness (mm)	Yarn density (g/m ²)	Airflow resistivity (kPa-s/m ²)
Untreated	0.32		12721305
5 g/L	0.29	115	14411448
15 g/L	0.34		11921215
25 g/L	0.32		12551298
Untreated	0.64		634640
5 g/L	0.66	210	620627
15 g/L	0.66		621622
25 g/L	0.69		583595

3.1. Cotton fabrics with the same yarn density and different MICs concentration

In Fig. 5a and Fig. 5c, the normal incidence sound absorption coefficient of the CO fabrics studied with an air cavity is shown. In Fig. 5a, the untreated CO fabric shows an increase in the sound absorption below the inferior frequency cutoff ($f_c = 250$ Hz) of the impedance tube compared to doped CO fabrics with different MICs content. In the mid frequencies up to the upper frequency cutoff ($f_u = 1600$ Hz) of the impedance tube, all doped CO fabrics have an α value higher than the untreated CO. At mid frequencies, CO fabric doped with 25 g/L presents the highest sound absorption coefficient (around 0.84) and no shift of the resonance peak is observed. At high frequencies, the error associated to the measurement (shown in bars in the figures) is quite high and no clear conclusions can be derived. In Fig. 5c,

Sound absorption of doped cotton textile fabrics with microcapsules

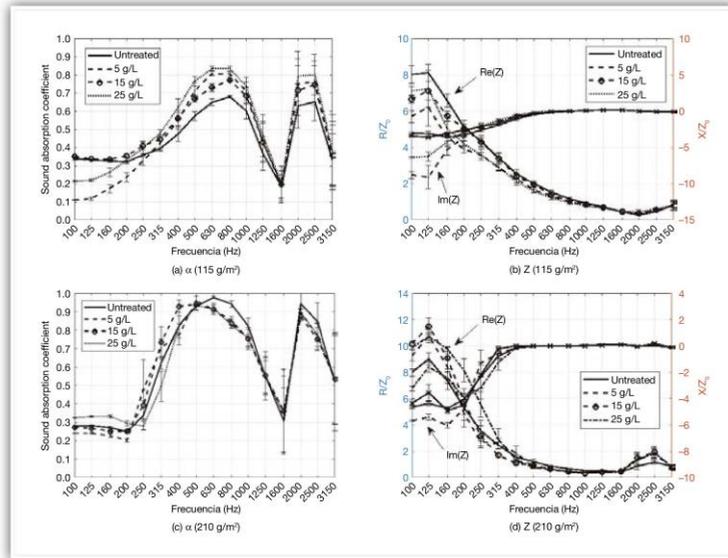


Figure 5. Results of the normal incidence sound absorption coefficient and the specific acoustic impedance of the CO fabrics with different saturations of doping are presented. Also, measurements considering the thickness of an air cavity of 10 cm behind the cotton sample studied. The dispersion percentage is measured in order to study the variability of the data and it is expressed as error bars.

MICs concentration has an influence on the position of the peak of sound absorption coefficient. It can be seen that there is a shift towards low frequencies. At mid frequencies, untreated CO has an α higher than 0.9. The sound absorption coefficient in doped CO fabrics is slightly lower. There is an improvement of the sound absorption when the MICs concentration varies in Fig. 5a. In Fig. 5b and Fig. 5d, the characteristic impedance of CO samples as a function of frequency is shown for both textile fabrics.

3.2. Cotton fabrics with different yarn densities and the same doping percentage

Fig. 6 shows in all cases studied (untreated and doped cotton with different MICs concentration: 5 g/L, 15 g/L and 25 g/L) that the lower the fabric yarn density, the lower is the sound absorption coefficient achieved at mid frequencies. The greatest difference is observed for the

untreated case (Fig. 6a), where the cotton fabric with a yarn density of 210 g/m² has an improvement in α around 0.4. Also, it can be clearly seen how the resonance frequency shifts towards lower frequencies when the yarn density is increased, independently of MICs concentration. In the cases Fig. 6a and Fig. 6c below f_c , CO fabric with lower yarn density possess high sound absorption. The sound absorption curve of cotton fabric with a yarn density of 115 g/m² reveals an increase trend at mid frequencies, in related with the increase of the volume fraction of microcapsules.

4. Conclusions

In this work, the sound absorption properties of CO samples with different fabric yarn densities and different microcapsules concentration have been evaluated in an impedance tube with an air cavity of 10 cm. It can be

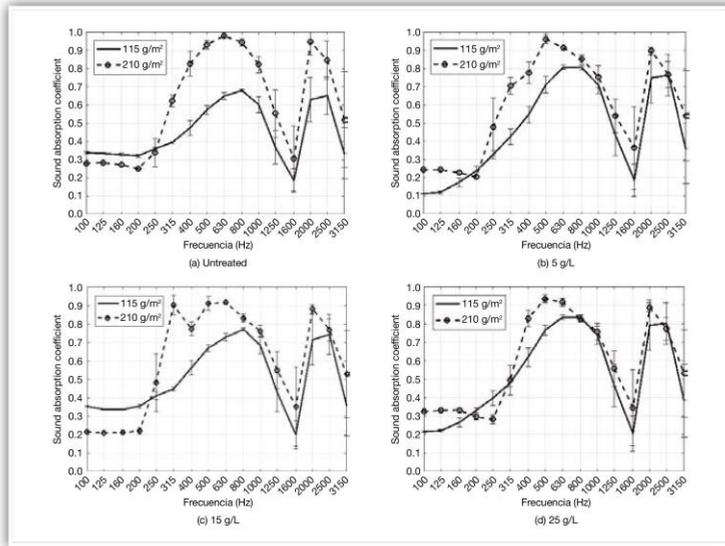


Figure 6. Normal incidence sound absorption coefficient of the cotton textile fabric with different yarn densities. Also, measurements considering the thickness of an air cavity of 10 cm behind the cotton sample studied. Error bars expressed the deviation percentage of the measures.

seen that these CO fabrics present high sound absorption at mid frequencies.

The CO fabric absorption results have been analysed under the hypothesis of homogeneity and assuming the same MICs size distribution in all doped samples.

The results show that the sound absorption is altered by doping CO fabrics with MICs. Both MICs concentration and fabric yarn density have an influence on the frequency of maximum sound absorption.

Although more tests are needed to clearly assess the effect of microcapsules on the sound absorption, the results obtained show that MICs can be useful to control the absorption properties of textile fabrics.

5. Acknowledgements

Authors acknowledge the support of the Ministry of Economy and Innovation (MINECO) and European Union FEDER through project FIS2015-65998-C2-2 and by

projects AICO/2016/060 and ACIF/2017/073 by Regional Ministry of Education, Culture and Sport of the Generalitat Valenciana and with the support of European Structural Investment Funds (ESIF-European Union).

6. References

- [1] Harris, C.M. (1994). *Noise Control in Buildings*. McGraw-Hill Inc., New York.
- [2] Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D. H., and World Health Organization. (1999). *Guidelines for community noise*. Geneva, Switzerland, WHO.
- [3] Passchier-Vermeer, W., and Passchier, W. F. (2000). Noise exposure and public health. *Environmental Health Perspectives*, vol. 108(1), pp. 123–131. DOI: 10.1289/ehp.00108s1123
- [4] Ballagh, K. O. (1996). Acoustical Properties of Wool. *Applied Acoustics*, vol. 48(2), pp. 101–120. DOI: 10.1016/0003-682X(96)0042-8

- [5] Portal Español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Horizonte 2020. Available online: <https://eshorizonte2020.es/> (accessed on 1 October 2019).
- [6] Portal Español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Horizonte 2030. Available online: <https://h2030.es/> (accessed on 1 October 2019).
- [7] Arenas, J. P., and Crocker, M. J. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. *Sound and Vibration*, vol. 44(7), pp. 12–17.
- [8] Benkreira, H., Khan, A., and Horoshenkov, K.V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chemical Engineering Science*, vol. 66(18), pp. 4157–4171. DOI: 10.1016/j.ces.2011.05.047
- [9] Del Rey, R., Alba, J., Arenas, J. P., and Sanchis, V. J. (2012). An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Applied Acoustics*, vol. 73(6), pp. 604–609. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.12.009
- [10] Maderuelo-Sanz, R., Nadal-Gisbert, A. V., Crespo-Amorós, J. E., and Parres-García, F. (2012). A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Applied Acoustics*, vol. 73, 402–408. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.12.001
- [11] Liu, D., Xia, K., Chen, W., Yang, R., and Wang, B. (2012). Preparation and design of green sound-absorbing materials via pulp fibrous models. *Journal of Composite Materials*, vol. 46(4), pp. 399–407. DOI: 10.1177/0021998311429881
- [12] Del Rey, R. M., Bertó Carbó, L., Alba Fernández, J., and Sanchis Rico, V. J. (2012). Obtención de soluciones acústicas a partir de reciclado textil mediante tecnología. WET-LAID. Avances en ingeniería medioambiental, vol. 6, pp. 73–86 (book chapter), Editorial Marfil. ISBN 978-84-268-1637-5
- [13] Rushforth, I. M., Horoshenkov, K. V., Mirafitab, M., and Swift, M.J. (2005). Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics*, vol. 66(6), pp. 731–749. DOI: 10.1016/j.apacoust.2004.10.005
- [14] Hanna, Y. I., and Kandil, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*, vol. 34(4), pp. 281–291. DOI: 10.1016/0003-682X(91)90011-3
- [15] Houtsma, A. J. M., Martin, H. J., Hak, C. C. J. M., and van Donselaar, C. J. (1996). Measuring the effectiveness of special acoustic provisions in a concert hall. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100(4): 2803. DOI: 10.1121/1.416542
- [16] Pachye, R., and Nayak R. (2016). Acoustic Textiles. Textile Science and Clothing Technology, Melbourne, Victoria, Australia (Springer). ISBN 978-981-10-1474-1.
- [17] Midha, V. K., and Chavhan Md. V. (2012). Nonwoven sound absorption textiles. *International Journal of Textile and Fashion*, vol. 2(2), pp. 45–55.
- [18] Shoshani, Y., and Rosenhouse, G. (1990). Noise Absorption by Woven Fabrics. *Applied Acoustics*, vol. 30(4), pp. 321–333. DOI: 10.1016/0003-682X(90)90081-5
- [19] Na, Y., Lancaster, J., Casali, J., and Cho, G. (2007). Sound Absorption Coefficients of Micro-fiber Fabrics by Reverberation Room Method. *Textile Research Journal*, vol. 77(5), pp. 330–335. DOI: 10.1177/0040517507078743
- [20] Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, vol. 73(1), pp. 56–60. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.07.005
- [21] Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., and Bonet Aracil, M. Á. (2018). The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. *Autex Research Journal*, vol. 18(3), pp. 269–280. DOI: 10.1515/aut-2018-0006
- [22] Nelson, G. (1991). Microencapsulation in textile coloration and finishing. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, vol. 21, pp. 72–85. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1991.tb00082.x
- [23] Bonet Aracil, M. Á., Monllor, P., Capablanca, L., Gisbert, J., Díaz, P., and Montava I. (2015). A comparison between padding and bath exhaustion to apply microcapsules onto cotton. *Cellulose*, vol. 22(3), pp. 2117–2127. DOI: 10.1007/s10570-015-0600-8
- [24] Monllor, P., Capablanca, L., Gisbert, J., Díaz, P., Montava, I., and Bonet, M. Á. (2010). Improvement of Microcapsule Adhesion to Fabrics. *Textile Research Journal*, vol. 80(7), pp. 631–635. DOI: 10.1177/0040517509346444
- [25] Ghosh, S. K. (2006). Functional coatings and microencapsulation: A general perspective. *Functional Coatings*, pp. 1–28. DOI: 10.1002/3527608478.ch1
- [26] Deasy, P. B. (1984). Microencapsulation and related drug processes. United States, New York: Marcel Dekker, vol. 20, pp. 234–237.

- [27] Aggarwal, A. K., Dayal, A., and Kumar, N. (1998). Microencapsulation processes and applications in textile processing. *Colourage*, vol. 45(8), pp. 15–24.
- [28] Samson, R., McKinney, J., and Russell, J. (1993). Fabrics with insect repellent tent fabric. US Patent 5, 198, 287.
- [29] Gao, D., Lyu, L., Lyu, B., Ma, J., Yang, L., and Zhang, J. (2017). Multifunctional cotton fabric loaded with Ce doped ZnO nanorods. *Materials Research Bulletin*, vol. 89, pp. 102–107. DOI: 10.1016/j.materresbull.2017.01.030
- [30] Monllor, P., Sánchez, L., Cases, F., and Bonet, M. Á. (2009). Thermal Behavior of Microcapsulated Fragrances on Cotton Fabrics. *Textile Research Journal*, vol. 79(4), pp. 365–380. DOI: 10.1177/0040517508097520
- [31] Ré, M. I., and Biscans, B. (1999). Preparation of microspheres of ketoprofen with acrylic polymers by a quasi-emulsion solvent diffusion method. *Powder Technology*, vol. 101(2), pp. 120–133. DOI: 10.1016/S0032-5910(98)00163-6
- [32] Hong, K., and Park, S. (1999). Melamine resin microcapsules containing fragrant oil: synthesis and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 58(2), pp. 128–131. DOI: 10.1016/s0254-0584(98)00263-6
- [33] ISO 10534-2. (1998). Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method. International Organization for Standardization.
- [34] Ingard, K. U., and Dear, T. A. (1985). Measurement of Acoustic Flow Resistance. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 103(4), pp. 567–572. DOI: 10.1016/S0022-460X(85)80024-9



Envíese a: **Revista Española de Acústica - SEA**
e-mail: secretaria@sea-acustica.es
<http://www.sea-acustica.es>

Estoy interesado en:

- **ASOCIARME A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**
- **SUSCRIBIRME A LA REVISTA DE ACÚSTICA**

Apellidos: _____ Nombre: _____

Dirección para correspondencia: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

Centro de trabajo: _____

Puesto de trabajo: _____

Dirección: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

Anexo B

Listado de conferencias

Atiénzar–Navarro, Roberto; Bonet–Aracil, Marilés; Gisbert–Payá, Jaime; Rey Tormos, Romina María del; Picó Vila, Rubén. (2019). *Effect of the variables associated with the microcapsules on sound absorption after their application to textile fabrics*. En el *48th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-noise 2019)*. (1–10). Madrid, Spain: Institute of Noise Control Engineering.

Atiénzar–Navarro, Roberto; Picó Vila, Rubén; Rey Tormos, Romina María del. (2018). *Numerical modeling and experimental characterization of sound absorption in acoustic textiles*. En las VI Jornadas de Modelización Matemática. Valencia, España.

Atiénzar–Navarro, Roberto; Picó Vila, Rubén; Rey Tormos, Romina María del; Gisbert–Payá, Jaime. (2018). *Absorción Acústica de Nuevos Tejidos Textiles*. En *TECNIACUSTICA 2018. XI Congreso Iberoamericano de Acústica. X Congreso Ibérico de Acústica. 49º Congreso Español de Acústica*. Cádiz, España: Sociedad Española de Acústica.

Anexo C

Premios

1. 49º Congreso Español de Acústica–2018 (Cádiz, Spain)
Premio Andrés Lara para Jóvenes Investigadores Acústicos
2. 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering–2019 (Madrid, Spain)
Premio Andrés Lara para Jóvenes Investigadores Acústicos
3. Finalista de la 32º **Premio de la AEQCT** al mejor estudio textil o químico textil de aplicación a la industria.



Cinco de los investigadores premiados en Tecniacústica 2018.



Recogida del premio Andrés Lara en el congreso Inter-Noise 2019.