

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Empleo de textiles en aplicaciones de absorción sonora

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

M^a DEL PILAR SEGURA ALCARAZ

Dirigida por:

M^a ÁNGELES BONET ARACIL

JORGE GABRIEL SEGURA ALCARAZ

IGNACIO MONTAVA SEGUÍ

Diciembre 2020

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores de tesis, Jorge Gabriel Segura Alcaraz, M^a Ángeles Bonet Aracil e Ignacio Montava Seguí, por su guía y ayuda para avanzar ante las dificultades que han ido apareciendo.

Al departamento de Ingeniería Textil y Papelera y a la unidad docente de Alcoy del departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, por facilitarme los medios necesarios para realizar todas las actividades que han sido necesarias.

A Jaime Ramis Soriano, por recibirme en el laboratorio de Grupo de Acústica Aplicada del IUFACyT de la Universidad de Alicante.

También deseo agradecer el apoyo a mi familia, a la cual he robado tantas horas.

Y a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado en la realización de este trabajo.

Índice

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Justificación.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Planteamiento del problema	3
1.4	La absorción acústica	3
1.4.1	Materiales absorbentes acústicos.....	5
1.4.2	Mecanismos de absorción sonora de los materiales absorbentes fibrosos.....	9
1.4.3	Los modelos de transmisión de sonido en materiales acústicos	10
1.5	Los materiales textiles en tratamientos de absorción acústica.....	11
1.5.1	Fibras en forma de no tejidos	11
1.5.2	Tejidos.....	14
1.5.3	Combinación de tejido y no tejido	17

Capítulo 2	Publicaciones	25
2.1	Adaptación del artículo: textiles in architectural acoustic conditioning: a review.....	26
2.1.1	Introduction	26
2.1.2	Sound absorption	28
2.1.3	Textile materials in room acoustics	31
2.1.4	Conclusions	35
2.2	Adaptación del artículo: The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven.....	40
2.2.1	Introduction	41
2.2.2	Experimental.....	43
2.2.3	Results and discussion	47
2.2.4	Conclusions	61
2.3	Adaptación del artículo: The effect of the combination of multiple woven fabric and nonwoven on acoustic absorption	66
2.3.1	Introduction	67
2.3.2	Experimental.....	68
2.3.3	Results and discussion	73
2.3.4	Conclusions	84
2.4	Adaptación del artículo: Sound absorption of textile material using a microfibras resistive layer	87
2.4.1	Introduction	88
2.4.2	Experimental.....	88
2.4.3	Results	90
2.4.4	Conclusions	93

2.5	Adaptación del artículo: Optimization of the sound absorption of a textile material	95
2.5.1	Introducción	96
2.5.2	Materiales y métodos	97
2.5.3	Experimental	99
2.5.4	Resultados	100
2.5.5	Conclusiones	105
2.6	Adaptación de la comunicación: Estudio de la absorción acústica de un tejido con capas resistivas de tejido de microfibra	108
2.6.1	Introducción	109
2.6.2	Métodos experimentales.....	109
2.6.3	Resultados y discusión	111
2.6.4	Conclusiones	112
2.7	Adaptación de la comunicación: Influencia de la aplicación de una resina acrílica en la absorción acústica de un material textil compuesto	114
2.7.1	Introducción	114
2.7.2	Métodos experimentales.....	115
2.7.3	Resultados y discusión	116
2.7.4	Conclusiones	119
2.8	Adaptación de la comunicación: Influencia del recubrimiento con carbón activado en la absorción acústica de un material compuesto a base de tejido de yute	
	120	
2.8.1	Introducción	121
2.8.2	Métodos experimentales.....	121
2.8.3	Resultados y discusión	123
2.8.4	Conclusiones	125

2.9	Adaptación de la comunicación: Influencia del recubrimiento con polvo de turmalina en la absorción acústica de un material compuesto a base de yute.....	127	
2.9.1	Introducción.....	128	
2.9.2	Métodos experimentales	128	
2.9.3	Resultados y discusión.....	130	
2.9.4	Conclusiones.....	131	
2.10	Adaptación de la comunicación: Application of PCM binded with resine on a composite material made of a polyester nonwoven and a jute fabric resistive layer.....	133	
2.10.1	Introduction	134	
2.10.2	Materials	134	
2.10.3	Methods	135	
2.10.4	Results and discussion	135	
2.10.5	Conclusions	137	
Capítulo 3		Discusión general de los resultados	139
3.1	Desde el diseño textil.....	140	
3.1.1	Posibilidades estéticas de los distintos tejidos estudiados	140	
3.1.2	Aportación de la adición de volumen a la lámina textil.....	143	
3.1.3	Comparación entre los distintos resultados obtenidos dependiendo del tipo de tela y del espesor de no tejido	144	
3.2	Desde la aplicación de los resultados	146	
3.2.1	Límites del estudio: frecuencias estudiadas	146	
3.2.2	Comportamiento a diferentes frecuencias.....	146	
3.2.3	Posibles aplicaciones	147	
3.3	Resultados pendientes de publicación	149	
3.3.1	Desplazamiento de las curvas	149	

3.3.2	Influencia de la aplicación de tejido según el espesor de no tejido	153
3.3.3	Efecto negativo de la capa resistiva de tejido sobre el coeficiente de absorción de sonido del no tejido.....	155
Capítulo 4	Conclusiones	157
Capítulo 5	Acciones futuras	163

Resumen

Esta memoria de tesis presenta una contribución al estudio de los materiales textiles en el campo de la absorción sonora. En concreto, se ha trabajado con la asociación de una capa absorbente fibrosa constituida por una estructura laminar no tejida cuya composición es poliéster y una capa resistiva a base de tejido de calada también compuesta de poliéster. El objetivo de este trabajo consiste en evaluar las variaciones que provocan los cambios en distintos parámetros de construcción de la capa resistiva, sobre el comportamiento del conjunto ante el sonido.

Para abordar el problema se emplean distintos tejidos de calada, tales como telas simples, múltiples, acolchadas y rizo, con diferentes parámetros de construcción. Se mide el coeficiente de absorción de sonido al aplicarlas a diferentes espesores de estructura no tejida de poliéster, empleando el tubo de ondas estacionarias.

Tras analizar los resultados obtenidos, se observan diferencias en los coeficientes de absorción de sonido-alcanzados, las cuales se explican atendiendo al espesor del no tejido, pero también-se observa la influencia de las características constructivas de los tejidos empleados.

Finalmente, se emplea el diseño de experimentos para obtener la combinación óptima de parámetros que proporciona el mayor coeficiente de absorción de sonido para un tipo de tejido dado en todas las frecuencias estudiadas.

Se concluye que, la modificación en la absorción de sonido de una estructura no tejida al aplicar una capa resistiva de tejido de calada, es lo suficientemente significativa como para ser tomada en cuenta a la hora de diseñar productos textiles para acondicionamiento acústico y que el diseño de experimentos constituye una herramienta de gran utilidad a este fin.

Abstract

This thesis report presents a contribution to the study of textile materials in the field of sound absorption. Specifically, we have worked with the association of a fibrous absorbent layer consisting of a polyester nonwoven and a resistive layer based on openwork fabric. The objective of this work is to evaluate the variations that cause the changes in different construction parameters of the resistive layer, on the behaviour of the whole before the sound.

To address the problem, different openwork fabrics are used, such as single, multiple, quilted and curl fabrics, with different construction parameters. The absorption coefficient is measured when applied to different thicknesses of polyester nonwoven, using the standing wave tube.

Differences are observed in the sound absorption coefficients obtained, which are explained according to the thickness of the nonwoven, but also to the constructive characteristics of the fabrics used.

Finally, the design of experiments is used to obtain the optimal combination of parameters that provides the highest sound absorption coefficient for a given type of tissue at all frequencies studied.

It is concluded that the modification in the sound absorption of a nonwoven when applying a resistive layer of openwork fabric is significant enough to be taken into account when designing textual products for acoustic conditioning and that the design of experiments constitutes a very useful tool for this purpose.

Resum

Aquesta memòria de tesi presenta una contribució a l'estudi dels materials tèxtils en el camp de l'absorció sonora. En concret, s'hi ha treballat amb l'associació d'una capa absorbent fibrosa constituïda per un no teixit de polièster i una capa resistiva a base de teixit de calada de composició polièster. L'objectiu d'aquest treball consisteix a avaluar les variacions que provoquen els canvis en diferents paràmetres de construcció de la capa resistiva, sobre el comportament del conjunt davant el so.

Per a abordar el problema s'empren diferents teixits de calada, com ara teles simples, múltiples, encoixinats i ris, amb diferents paràmetres de construcció. Es mesura el coeficient d'absorció en aplicar-les a diferents grossàries de no teixit de polièster, emprant el tub d'ones estacionàries.

S'observen diferències en els coeficients d'absorció de so obtinguts, les quals s'expliquen atenent la grossària del no teixit, però també a les característiques constructives dels teixits emprats.

Finalment, s'empra el disseny d'experiments per a obtenir la combinació òptima de paràmetres que proporciona el major coeficient d'absorció de so per a un tipus de teixit donat en totes les freqüències estudiades.

Es conclou que la modificació en l'absorció de so d'un no teixit en aplicar una capa resistiva de teixit de calada és prou significativa per a ser tinguda en compte a l'hora de dissenyar productes tèxtils per a condicionament acústic i que el disseny d'experiments constitueix una eina de gran utilitat a aquest efecte.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Justificación

Desde la antigüedad ha existido preocupación por las molestias que ocasiona el ruido. Pero es a partir de la revolución industrial cuando el nivel de ruido producido por el hombre ha crecido hasta alcanzar los niveles de hoy en día. Los motores de motocicletas, coches, camiones o aviones, la maquinaria de obra pública, incluso cualquier concentración humana, son elementos cotidianos generadores de ruido ambiental. Del mismo modo, en espacios cerrados como edificios industriales, espacios educativos, pabellones deportivos, centros comerciales, restaurantes, etc., también se percibe un alto nivel de ruido, que afecta en ocasiones a la inteligibilidad de la palabra, y causa molestias muy frecuentes como dolores de cabeza. De acuerdo con la OMS (Berglund, Lindvall, & Schwela, 2000), el ruido excesivo perjudica la salud humana, pudiendo alterar el sueño, causar efectos psicofisiológicos y cardiovasculares, reducir el rendimiento y provocar cambios en el comportamiento social.

1.2 Objetivos

Los textiles se emplean en la actualidad como materiales de acondicionamiento acústico en diversos sectores como transporte, industria y construcción. Estas aplicaciones comprenden su uso como materiales absorbentes de sonido en frecuencias medias y altas. El objetivo principal de este trabajo es estudiar un material compuesto formado por un tejido de calada y un no tejido para determinar qué resultados producen las variaciones de distintos parámetros del tejido y seleccionar los valores que nos conduzcan a un resultado más adecuado a las distintas aplicaciones posibles del material, como acondicionamiento acústico de: cabinas de pasajeros en transporte aéreo, ferroviario, marítimo y terrestre; salas y espacios públicos como restaurantes, aulas, pabellones deportivos, salones de actos, etc. en arquitectura; o salas de máquinas, equipamientos e instalaciones, en la industria.

A este objetivo se añaden otros, como verificar la influencia del espesor de la capa del no tejido, comprobar la influencia de las características estructurales del tejido, evaluar la influencia de la aplicación de distintos acabados sobre el tejido y, finalmente, valorar el empleo de técnicas estadísticas en el diseño y análisis a la hora de realizar los experimentos.

Para abordar el estudio del material objeto de este trabajo, en primer lugar, se requiere conocer el fenómeno de la absorción acústica, el cual se describe brevemente en este primer capítulo, junto a los antecedentes.

En el segundo capítulo se incluyen los artículos y comunicaciones correspondientes a esta tesis, comenzando por un artículo de revisión sobre los materiales textiles en acondicionamiento acústico. A continuación, en el apartado 2.2, se estudia el efecto de la combinación de una capa de tejido de calada con ligamento tafetán, y un no tejido, empleando distintos espesores de no tejido y variando el tamaño de los poros inter-hilo del tejido mediante el empleo de diferentes densidades de urdimbre y trama. Seguidamente, en el punto 2.3, se utiliza un tejido de calada a base de telas múltiples, estudiándose la influencia del número de capas, así como de la densidad de trama. A continuación, en el apartado 2.4, se estudia el empleo de una capa resistiva formada por un tejido de rizo a base de hilos de microfibra. Posteriormente, en el punto 2.5, se analiza la aplicación de una tela acolchada sobre un no tejido, teniendo en cuenta el diseño de experimentos para la obtención de la combinación óptima de densidad de trama y pasadas de relleno. Los apartados 2.7 a 2.9 los componen comunicaciones en congresos en las que se explora el empleo de tejido de microfibras, la fibra de yute, y el recubrimiento de los tejidos mediante la aplicación de microesferas con PCM, partículas de carbón y de turmalina por medio de resina.

A continuación, en el capítulo tres, se hace una discusión global de los resultados desde el diseño textil y desde la aplicación de los mismos, y se incluyen algunos resultados pendientes de publicación.

Finalmente, en el capítulo cuatro se resumen las conclusiones, y en el capítulo cinco se proponen algunas acciones futuras.

1.3 Planteamiento del problema

El sonido es una forma de energía que se manifiesta a nuestro alrededor de forma cotidiana. Tiene dos vertientes: la física, que lo define como una onda de presión que se transmite a través de un medio elástico, a través de sus partículas y la fisiológica, que explica como esta onda se percibe por parte del oyente (Jaramillo, 2007). En ocasiones el sonido es neutro o agradable, pero otras veces es molesto y fuente de malestar, dependiendo de la apreciación subjetiva del oyente. Se considera ruido toda energía acústica susceptible de alterar el bienestar fisiológico o psicológico, interfiriendo y perturbando el desarrollo normal de las actividades cotidianas (Guía de Aplicación del DB HR, s. f.). El ruido afecta la calidad de vida y también la salud humana (Instituto Nacional de Medicina y Seguridad en el Trabajo, 2009).

La necesidad básica de confort del ser humano incluye el confort acústico. La acústica arquitectónica trata lo relacionado con los sonidos en la construcción y su entorno. Los elementos que permiten el mencionado confort acústico se encuentran divididos en dos grandes funciones: aislamiento y acondicionamiento. El aislamiento estudia la transmisión de ruidos y vibraciones entre espacios. Por su parte, el acondicionamiento acústico persigue la obtención de las condiciones acústicas adecuadas al uso de los recintos, suponiéndolos aislados del exterior, mediante la definición de formas y revestimientos de las superficies interiores de los mismos.

Los materiales textiles pueden añadir a sus usos tradicionales el de absorbentes acústicos, y para ello es necesario conocer su comportamiento en este campo.

1.4 La absorción acústica

Una de las formas de disminuir el ruido en un espacio determinado consiste en el empleo de materiales que, por su disposición, composición o forma, reduzcan la energía sonora existente en el mismo. Para poder diseñar un material capaz de modificar el ambiente sonoro, en primer lugar, debemos conocer cómo se comporta el sonido. En nuestro caso, en un espacio cerrado.

Supongamos que un frente de ondas sonoras con una energía E_i alcanza un obstáculo (de tamaño acorde a su longitud de onda) de modo que encuentra un frente de discontinuidad, entre el medio gaseoso por cual viajaba y el medio sólido que constituye el obstáculo. En ese punto, una parte de la energía lo atravesará (E_t), otra parte se transmitirá al elemento sólido y viajará a su través convertido en vibración (E_v), otra parte se degradará en forma de energía calorífica (E_a) y, por último una parte se reflejará tal como se muestra en la figura 1.4.1 y se resume en las ecuaciones 1.4.1 y 1.4.2.

$$E_i = E_a + E_r + E_t \quad \text{Ecuación 1.4.1}$$

Dividiendo miembro a miembro por E_i :

$$1 = \alpha + \beta + \gamma \quad \text{Ecuación 1.4.2}$$

Donde:

$\alpha = E_a/E_i$ Coeficiente de absorción acústica

$\beta = E_r/E_i$ Coeficiente de reflexión

$\gamma = E_t/E_i$ Coeficiente de trasmisión o coeficiente de transmisividad

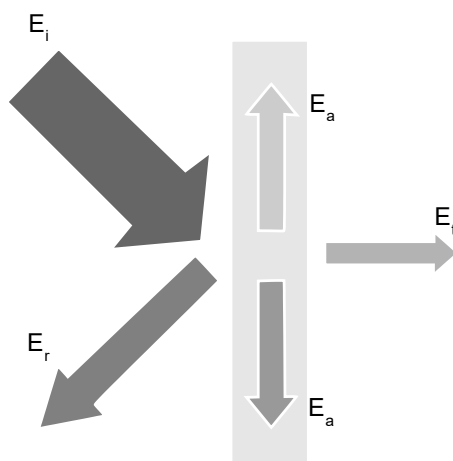


Figura 1.4.1. Energía incidente (E_i), reflejada (E_r), transmitida (E_t) y absorbida (E_a).

La parte reflejada de la onda sonora depende del material de la superficie del sólido y también de su disposición. El sentido de los materiales absorbentes radica en la disminución de esta energía reflejada.

Para caracterizar la respuesta en frecuencia de los sistemas absorbentes planos se emplea el coeficiente de absorción acústica. Es una magnitud adimensional, que depende de la frecuencia del sonido y se define como la relación entre la energía absorbida y la energía total incidente. La respuesta absorbente de un material se puede definir para incidencia normal o difusa, obteniéndose a partir de medidas según procedimientos normalizados.

Cuando un oyente se encuentra en un recinto cerrado no sólo percibe el sonido que llega hasta él directamente de la fuente como sonido directo. Además, percibe de forma indirecta el sonido reflejado. Suponiendo un modelo de rayos de propagación, la parte de la

onda reflejada, (primeras reflexiones) inicia un nuevo camino según el ángulo con el que haya incidido en la pared, atravesando de nuevo el aire, hasta alcanzar una nueva superficie, donde incide de nuevo, reflejándose (segundas reflexiones) transmitiéndose o absorbiéndose. Se forma así un campo sonoro indirecto que produce la sensación de reverberación.

Una de las formas para evitar la reflexión no deseada del sonido en una pared, suelo o techo, consiste en el empleo de superficies recubiertas con materiales absorbentes, como se ha mencionado anteriormente. Se trata de materiales diseñados para aumentar las pérdidas de energía.

Si aplicamos una capa de material fibroso, formado por multitud de canales laberínticos, sobre una pared rígida, cuando la onda sonora viaja a través del material, las irregularidades existentes en las fibras provocan multitud de reflexiones de forma más o menos aleatoria. Las ondas reflejadas chocan entre sí, anulándose unas a otras, dentro del propio material, hasta atravesarlo y llegar a la pared rígida. En esta pared, una parte se reflejará volviendo a atravesar el material fibroso, y encontrando en su avance los nuevos frentes de ondas que van entrando, hasta volver a entrar en el recinto.

1.4.1 Materiales absorbentes acústicos

El término “material acústico” se emplea para aquellos materiales producidos específicamente para proporcionar altos niveles de absorción (Arenas & Crocker, 2010). Para el estudio de los materiales absorbentes acústicos se seguirá la clasificación que se muestra en la Figura 1.4.2.

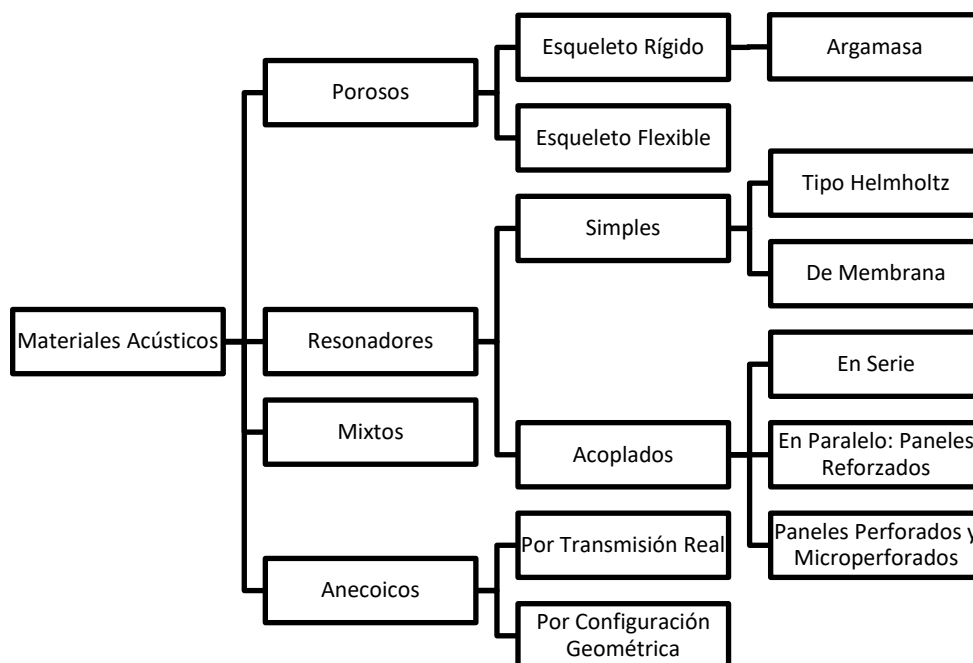


Figura 1.4.2. Esquema de Materiales Absorbentes acústicos. Fuente (Recuero López, 2000) modificado.

Los absorbentes porosos de esqueleto rígido están formados por paneles, tableros o argamasa que se aplica mediante paleta o se proyecta sobre una superficie para formar una película de un grosor determinado. Forman poros, comunicados entre sí. El material más empleado es el yeso, que se utiliza como aglutinante, al cual se añade perlita, vermiculita o también fibras minerales. Por su parte, los absorbentes porosos de esqueleto flexible están constituidos por láminas textiles como lana de roca y de vidrio o guatas de distintas fibras (absorbentes fibrosos). También por espumas de celda abierta. En este caso, tanto el aire de los poros como el esqueleto están sometidos a vibraciones.

Los absorbentes resonadores están compuestos por estructuras capaces de absorber un pico de energía correspondiente a su frecuencia de resonancia, gracias al movimiento resonante de una parte del sistema. El resonador de Helmholtz, el más simple, está formado por un elemento en forma de esfera, unida al exterior mediante una abertura llamada cuello del resonador. La onda sonora hace vibrar el aire del cuello del resonador, que se comporta como una masa resonante. Absorbe un margen de frecuencias estrecho que depende del diseño de la cavidad y del cuello. Para ampliar el rango de frecuencias absorbidas, se utilizan los resonadores acoplados, por ejemplo, en forma de paneles perforados. Los paneles perforados se pueden realizar en diferentes materiales, como plástico, vidrio, madera, etc., pero los más utilizados son los de chapa metálica perforada, con perforaciones de diámetro superior a 1mm. Se instalan a cierta distancia de la pared

rígida, y en este espacio puede instalarse un relleno fibroso para aumentar la absorción acústica. Cuando las perforaciones alcanzan tamaños submilimétricos, permiten evitar el contenido de material de relleno. La mayor desventaja de este tipo de materiales es el coste de realizar las perforaciones, mediante punzonado, estampado o láser, las cuales, para aumentar la banda de absorción deben tener una relación diámetro-profundidad lo mayor posible.

Los absorbentes de membrana se componen de un panel flexible y no poroso que se instala a una distancia de la superficie rígida. Al incidir la onda sonora sobre él, entra en vibración de forma que la absorción es máxima a la frecuencia de resonancia.

Los absorbentes anecoicos se basan en la variación progresiva de sus características geométricas. Están formados por numerosos ángulos y cuñas de forma que, cuando algún sonido se refleja en ellas, vuelve a incidir en otra superficie que puede ser, a su vez, absorbente.

Los absorbentes mixtos combinan distintas formas de absorción en una misma estructura. Son los más utilizados.

En la figura 1.4.3 se muestran las curvas de absorción de distintos tipos de materiales absorbentes acústicos.

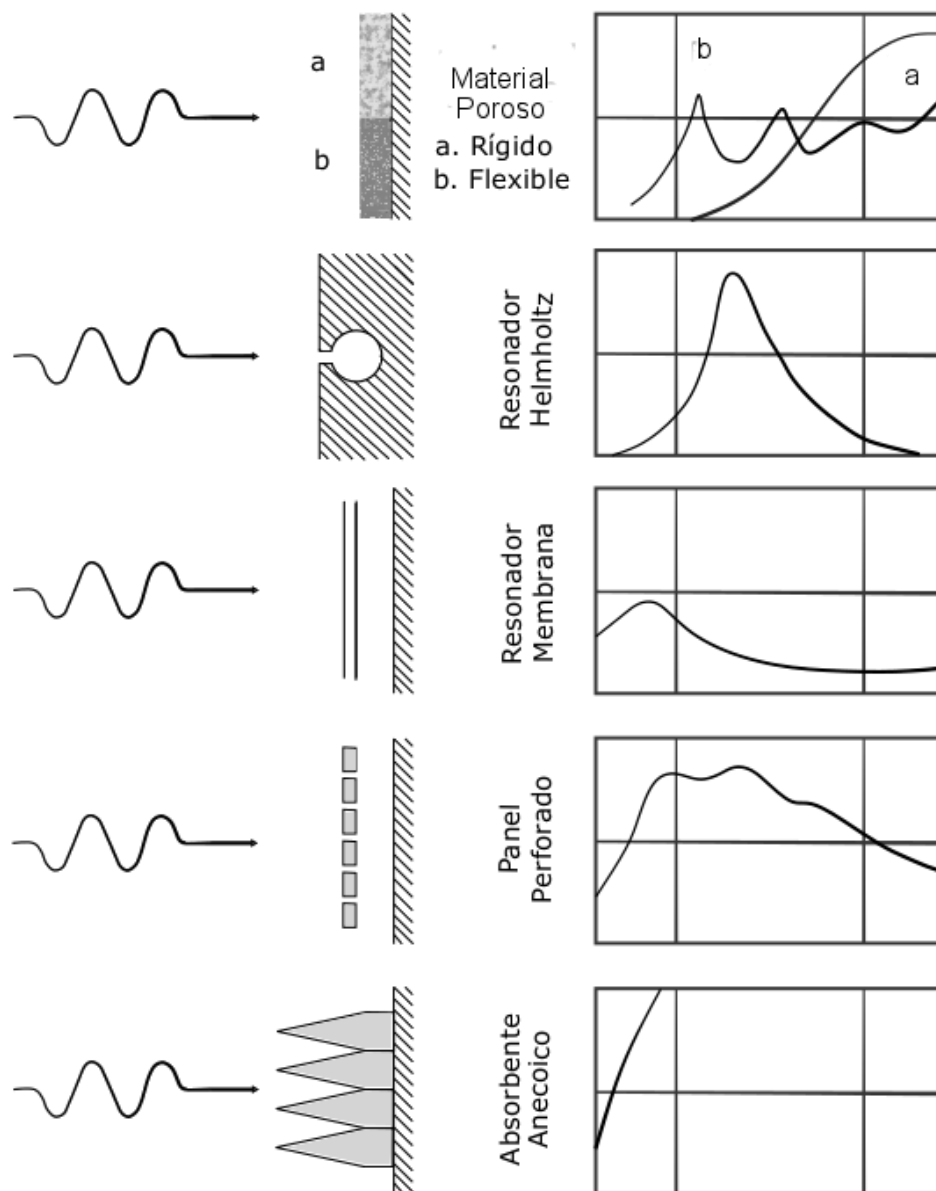


Figura 1.4.3. Absorbentes acústicos y curvas de absorción típicas. Fuente (Crocker, 2007).

1.4.2 Mecanismos de absorción sonora de los materiales absorbentes fibrosos

Los absorbentes fibrosos se emplean para frecuencias medias y altas, ya que sólo pueden absorber componentes de frecuencia cuyas longitudes de onda no son mayores que unas 4-8 veces el grosor de su capa (Fuchs, 2013). El mecanismo general en la absorción acústica de los absorbentes fibrosos consiste en la transformación de la energía sonora en calor por fricción, en la superficie frontera de incidencia entre la fibra y el aire perturbado por la onda. A ello contribuyen varios factores (Kinsler y Frey, 1999), como las irregularidades superficiales en el material fibroso que producen efectos de difracción de la onda sonora incidente. Asimismo, existen pérdidas por conducción de calor entre las fibras y las partículas de aire perturbadas por la onda que resultan de la conducción de energía térmica entre las condensaciones a temperaturas más altas hasta las rarefacciones a temperaturas más bajas.

También aparecen mecanismos de absorción de sonido a nivel molecular interno. Estos mecanismos son conocidos como absorción de sonido molecular o de relajación. Para ello se tiene en cuenta la estructura interna de las moléculas y las interacciones entre ellas que conducen a vibraciones internas, rotaciones, ionizaciones y ordenamientos de corto alcance. Este enfoque se ha aplicado con éxito a gases con moléculas poliatómicas. El aire que permanece en los poros del material está compuesto principalmente por oxígeno y nitrógeno molecular, así como otros gases, incluyendo vapor de agua y dióxido de carbono. Según esta teoría, se reconoce que, además de los tres grados de libertad de traslación que posee cada molécula, también hay grados internos de libertad asociados con la rotación y la vibración. El tiempo necesario para que la energía se transfiera del movimiento de traslación de la molécula a estados internos en comparación con el período del proceso acústico determina cuánta energía acústica se convertirá en energía térmica durante las transiciones. Si el período de excitación acústica es largo en comparación con el tiempo de relajación del estado energético interno, entonces el estado de energía interno puede estar completamente cargado; el desfase es finito pero pequeño, por lo que la fracción de energía perdida es muy pequeña en cada período del movimiento. Por otro lado, si el período acústico es mucho más corto que el tiempo de relajación, el estado de energía interno no puede estar muy cargado antes de que se inviertan las condiciones, y la pérdida de energía durante cada período también será pequeña. Sin embargo, en períodos cercanos al tiempo de relajación, la pérdida de energía por período es máxima (Kinsler y Frey, 1999).

Por otro lado, para que un absorbente de tipo fibroso pueda conseguir pérdidas por rozamiento, es necesario que la velocidad de las partículas de aire sea alta. La absorción de este tipo de materiales es máxima cuando la velocidad es máxima y permite el máximo rozamiento. La velocidad con que se mueve el aire debido a una onda sonora varía con la frecuencia y con la distancia a la pared rígida, siendo nula en los límites del recinto (Isbert, 1998). La distancia a la que la amplitud de la velocidad de partícula es máxima viene dada por la ecuación 1.4.3.

$$d = \frac{\lambda}{4}$$

Ecuación 1.4.3

Donde:

d es la distancia a la pared rígida

λ es la longitud de onda del sonido cuando se propaga en el aire existente entre el material y la pared.

Por este motivo, tapizar las paredes con un material fibroso simplemente, no es lo más efectivo. Sin embargo, si el material se separa una distancia determinada de la pared, dejando una cámara de aire o plenum, permite disminuir la frecuencia de máxima absorción. También es posible emplear espesores muy elevados de materiales fibrosos para absorber frecuencias más bajas.

1.4.3 Los modelos de transmisión de sonido en materiales acústicos

Para conocer y predecir el comportamiento frente al sonido de los materiales que permita su empleo en aplicaciones acústicas se han realizado gran cantidad de estudios destinados a su caracterización. Estos estudios en muchos casos buscan la obtención de un modelo que permita predecir la propagación del sonido a través de dichos materiales. Existen tres tipos principales de modelos: difásicos, de fluido equivalente y de presión uniforme (Juliá Sanchis, 2008), (Jaouen, s. f.).

Los modelos difásicos explican la propagación de las ondas y sus interacciones, tanto en las fases fluidas como en las sólidas, de un material acústico poroso. Se basan en el trabajo de Biot (Biot, 1956a) (Biot, 1956b), en el que desarrolla una teoría de la propagación de la onda elástica dentro de un medio poroso isotrópico saturado con un fluido.

Los modelos de fluido equivalente consideran que bajo una frecuencia específica, condiciones de límite y/o condiciones de excitación, la fase sólida (o esqueleto) del medio poroso puede considerarse como rígido e inmóvil. En tales casos, no se propaga ninguna onda en la fase sólida y el comportamiento vibro-acústico completo del material puede ser simplificado en comparación con los modelos difásicos. Este modelo se desarrolló por Zwicker y Kosten (Zwicker & Kosten, 1949) basándose en la teoría de Kirchoff sobre la propagación del sonido en tubos estrechos de sección circular. Los modelos de presión uniforme consideran el caso contrario, es decir, dependiendo del rango de frecuencia estudiado, se puede utilizar un modelo de presión difásico o uniforme. A bajas frecuencias, cuando la longitud de onda es mucho mayor que el espesor de la muestra de material, puede considerarse una aproximación de presión uniforme dentro de la muestra. En frecuencias más altas, debe utilizarse un modelo difásico.

1.5 Los materiales textiles en tratamientos de absorción acústica

Los materiales textiles, debido a su naturaleza fibrosa son capaces de retener aire en su interior. Además, las formas de obtener láminas textiles, así como las posibilidades de diseño, son infinitas. Es posible emplear fibras de características muy distintas: naturales, artificiales o sintéticas, originales o recicladas... Una vez elegida la fibra, existe la opción de unirlos directamente, formando no tejidos, mediante distintos métodos de consolidado como por punzonado, hidroligado, térmico o químico. También se pueden obtener hilos de distintos grosores y texturas a partir de las fibras. Estos hilos pueden ser tejidos mediante diferentes sistemas, como los géneros de punto por urdimbre, por trama, o el tisaje de calada. Las láminas textiles obtenidas pueden sufrir numerosos tratamientos posteriores como retardantes al fuego, o recubrimientos por espumado, flocado, etc. que modifican sus prestaciones, así como su aspecto. La variedad es amplia.

Los materiales textiles se han utilizado en acondicionamiento acústico desde los inicios de la acústica moderna. Entre 1900 y 1915, Wallace Clement Sabine publicó una serie de artículos en los que inició la ciencia de la acústica arquitectónica (Beranek & Mellow, 2012). Empleó, entre otros, alfombras y cojines para llegar a definir el concepto de reverberación. Sin embargo, tiene que pasar casi un siglo para que aparezca de nuevo interés en el empleo de elementos textiles (de fibras no minerales) con fines acústicos.

De entre todas las posibilidades mencionadas para la obtención de láminas textiles, este trabajo se centra en la combinación de no tejidos e y tejidos de calada, ambos de poliéster.

1.5.1 Fibras en forma de no tejidos

Los materiales porosos formados por fibras minerales se han utilizado desde los años veinte del siglo XX, en un principio, por sus características de aislamiento térmico, en la construcción. Debido a su triple función como aislamiento acústico, térmico y resistencia al fuego, su uso se ha extendido a sectores como el transporte (ferroviario, aeronáutico, naval y automoción), para aislamiento de pisos, paredes y divisiones, y para fabricación de silenciadores. También en la industria se emplean en el aislamiento de maquinaria, conducciones y silenciadores. Cada uno de estos sectores tiene unas exigencias que están recogidas en su normativa específica y ha adaptado terminología propia. Así, por ejemplo, el sector de la construcción tiende a denominar lanas minerales a estructuras laminares no tejidas compuestas por fibras de origen mineral como la fibra de vidrio. Sin embargo, en el argot textil, la denominación de lana corresponde a “*Fibra del vellón de oveja o cordero (Ovis aries) o mezcla de fibras del vellón de oveja o cordero y pelo de los animales: alpaca, llama, camello, cabra cachemira, cabra angora, conejo angora, vicuña, yak, guanaco, cabra cashgora, castor y nutria*”, tal y como se cita en el

Reglamento (UE) No 1007/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a las denominaciones de las fibras textiles (Consejo, 2011). Así pues, en este documento, el término “lana” se empleará siguiendo la terminología propia del sector textil, salvo cuando se recurra a citar terminología propiamente empleada en normativa o referencias.

Por otro lado, las estructuras no tejidas de fibras minerales presentan algunos inconvenientes, como por ejemplo la dificultad de su manipulación, que puede ocasionar desprendimiento de fibras, y riesgos para la salud de los trabajadores principalmente, como se contempla en la publicación de la Organización Internacional del Trabajo acerca de la seguridad en la utilización de “*lanas aislantes*” de fibra vítrea sintética (fibra de vidrio, lana mineral de roca y lana mineral de escorias) (OIT, 2001).

Estos inconvenientes se pueden evitar con el empleo de otros materiales, a base de fibras de origen natural o sintético. Las fibras de origen natural tienen la ventaja de ser biodegradables y reciclables, junto al factor económico, en muchos casos ventajoso. Desde los años 2000, se está descubriendo la aplicación como absorbente acústico de gran variedad de fibras naturales, y su combinación con materiales sintéticos. Así, pensando en la automoción se exploran materiales compuestos basados en no tejidos con mezclas de algodón, lino, kenaf, etc. junto a aglutinantes como Biomax®, Ácido Poliláctico (PLA), Acetato de Polivinilo (PVAc), y el bio-copolíester Eastar® (PTAT) (Kamath, 2004), y también kenaf con ácido poliláctico (Chin, Yahya, Che Din, & Ong, 2018). Por otro lado, en la construcción también se buscan materiales más sostenibles como las fibras naturales (algodón, celulosa, cáñamo, lana, arcilla, etc.) y los materiales reciclados (caucho, plástico, alfombras, corcho, etc.), (Asdrubali, 2006). Y en general, los llamados biocomposites verdes centran la atención en la actualidad para aplicaciones acústicas (Berardi & Iannace, 2017).

Entre las fibras de tallo como yute, lino, ramio, sisal y cáñamo, la más económica es el yute, el cual ofrece buenas posibilidades de absorción acústica, en forma de fibra o en forma de composite junto con látex (Mohanty & Fatima, 2010) (Fatima & Mohanty, 2011) (Fatima & Mohanty, 2012) y junto a paneles microperforados (P. V. Bansod, Sai Teja, & Mohanty, 2017). También el ramio y el lino a junto sus mezclas, proporcionan buenos niveles de absorción de sonido (W. D. Yang & Li, 2012) (Küçük & Korkmaz, 2012) así como la mezcla de cáñamo y lino (Piégay, Glé, Gourdon, Gourlay, & Marceau, 2018). Otros trabajos estudian no tejidos a base de fibra de kenaf (Ramis, Alba, Del Rey, Escuder, & Sanchís, 2010) (Lim, Putra, Nor, & Yaakob, 2018), fibra de coco (Yuhazri & Sihambing, 2010) (Romina Del Rey, Alba, Arenas, & Ramis, 2013), kapok (Xueting Liu, Yan, & Zhang, 2015a) (Xueting Liu, Yan, & Zhang, 2016).

Mención aparte merecen algunas materias de origen animal, como las plumas (Huda & Yang, 2009) (Casadesús et al., 2019) o el plumón (S. Yang, Yu, & Pan, 2011), las cuales, además, son adecuadas para la aplicación de proceso airlaid (Dieckmann, Dance, Sheldrick, & Cheeseman, 2018). También la lana de oveja, que resulta comparable a las estructuras no tejidas de fibras minerales en cuanto a coeficientes de absorción acústica (Romina del Rey, Uris, Alba, & Candelas, 2017), y se puede preparar en forma de tablero

mezclando lana con fibras de bajo punto de fusión (Qui & Enhui, 2018). Además, es posible obtener no tejido bajo la perspectiva de la sostenibilidad, empleando fibras recicladas de lana, procedentes de mermas de procesos textiles de confección y utilizando chitosán para la consolidación de este no tejido. Los resultados muestran la viabilidad de obtener estas estructuras y su capacidad de aislamiento acústico (Rubino et al., 2019).

Para complementar este apartado de fibras naturales es interesante recordar algunas fibras lignocelulósicas, disponibles en gran abundancia, procedentes sobre todo de restos agrícolas, no empleadas tradicionalmente en procesos textiles, que se suelen emplear como parte de composites, y que han proporcionado buenos resultados en aplicaciones acústicas (Yuhazri & Sihambing, 2010), (Yahya & Sheng Chin, 2017). Entre ellas, la paja de arroz (H. S. Yang, Kim, & Kim, 2003), (Seddeq, Aly, Marwa A, & Elshakankery, 2013), (Seddeq et al., 2013), (Buratti, Belloni, Lascaro, Merli, & Ricciardi, 2018) (H. S. Yang et al., 2003), la hoja de té (Ersoy & Küçük, 2009), la palmera del azúcar (Ismail, Ghazali, Mahzan, & Zaidi, 2010), (Yahya & Sheng Chin, 2017), la fibra de plátano (Tholkappiyan, Saravanan, Jagasthitha, Angeswari, & Surya, 2014), (Abdullah, Azharia, & Salleh, 2015), (Singh & Mukhopadhyay, 2020) y el composite formado con fibra de plátano y resina epoxi (Mishra, Bhanupriya, & Nath, 2018), caña de azúcar (Putra et al., 2013), (Othmani et al., 2016), (Othmani et al., 2017), la pipa de girasol (Mati-Baouche, De Baynast, Michaud, Dupont, & Leclair, 2016) los frutos vacíos de la palma de aceite (Or, Putra, & Selamat, 2017). Otros productos agrícolas que proporcionan buenos resultados son la fibra de la esponja vegetal (Koruk & Genc, 2015). Incluso un arbusto silvestre como la retama, también se puede emplear para producir paneles acústicos, mediante el necesario procesamiento (Berardi, Iannace, & Di Gabriele, 2017). Muchos de estos productos agrícolas tienen el inconveniente de la presencia de humedad y proliferación de hongos. Este problema se puede solucionar mediante el pretratamiento y la adición de cargas granulares al producto final (Mamtaz, Fouladi, Al-Atabi, & Namasivayam, 2016), (Mamtaz et al., 2017).

Las fibras sintéticas son el segundo grupo de materiales textiles empleados en acústica, después de las fibras minerales. Como se ha mencionado, este trabajo se basa en el uso de fibra de poliéster. En 1995 se desarrolla un modelo que predice la absorción acústica del poliéster según la relación entre el número de fibras y el volumen del material (Narang, 1995a). En 2000 se aplica la teoría de Zwikker y Konsten a no tejidos de fibras acrílicas, de poliéster y de algodón (Yakir Shoshani & Yakubov, 2000), encontrando las características intrínsecas para proporcionar la máxima absorción de estas tres materias. Más adelante, se añade la descripción de cómo el tipo de fibra, el tamaño de la fibra, la sección transversal de la fibra, el grosor del material, la densidad, la resistencia al flujo de aire y la porosidad pueden cambiar el comportamiento de absorción de los no tejidos (Jayaraman, 2005). El poliéster es una fibra que cada día es más reconocida como material para acondicionamiento acústico (Watanabe, Minemura, Nemoto, & Sugawara, 1999), (Ul-Islam, 2018), (Ramamoorthy & Rengasamy, 2019). Las propiedades más interesantes del poliéster para su empleo como material acústico son su baja densidad, flexibilidad, limpieza, durabilidad, baja absorción de humedad, no es una fibra tóxica, y

no es atacada por mohos ni bacterias. Además, al ser una fibra sintética, en su proceso de producción es posible controlar parámetros como forma y tamaño de la sección de la fibra, fibras huecas, rizado, superficie de la fibra más o menos pulida, así como emplear distintos aditivos para aumentar por ejemplo su resistencia a las radiaciones UV, al fuego, etc. También es posible su obtención a partir del reciclado, por ejemplo, de botellas de PET. En este sentido, el poliéster reciclado ha sido ampliamente estudiado, para conocer cómo afectan los parámetros de fibra y de unión de las mismas (Lee & Joo, 2003), comparando el poliéster obtenido a partir del reciclado de botellas con el procedente de chip puro de poliéster con buenos resultados (Del Rey, Alba, Ramis, & Sanchís, 2011). También llaman la atención las mezclas de poliéster con otros materiales, como el reciclado de orillos de poliéster y polipropileno con adición de serrín (Ching Wen Lou, Lin, & Su, 2005), el poliéster reciclado con kenaf (Jayaraman, 2005) o los desperdicios de lana y poliéster reciclado (Patnaik, Mvubu, Muniyasamy, Botha, & Anandjiwala, 2015).

1.5.2 Tejidos

Tal y como se ha indicado en la introducción, dentro de las láminas textiles tejidas, existen dos grandes tipos que son los tejidos de punto y los de calada.

Los tejidos de punto se obtienen mediante la formación de mallas cuando los hilos se entrelazan. Este entrelazado puede ser de dos formas: por urdimbre y por trama.

Los géneros de punto por urdimbre permiten la obtención de varias capas de distintos materiales en un único tejido y de espesor controlable. También es posible obtener tejidos multiaxiales, y los materiales obtenidos presentan una gran estabilidad dimensional, incluso con calados. Generalmente emplean hilos de filamento continuo, aunque algunas máquinas también admiten los de fibra discontinua. En 2007 se investiga la absorción del sonido de un tejido spacer, que puede utilizarse en la tapicería de los automóviles, con mayor capacidad de absorción acústica que un tejido de género de punto convencional y sus derivados. Para su análisis, se considera como un absorbente de panel microperforado (Dias, Monaragala, & Lay, 2007), (Dias, Monaragala, Needham, & Lay, 2007). En los tejidos múltiples de género de punto por urdimbre, con el aumento del número de capas, las características de absorción acústica mejoran en estructuras de hasta ocho capas (Liu & Hu, 2010). Asimismo, el tejido hecho con un grado de inclinación menor del hilo espaciador tiene una capacidad de absorción de sonido superior (Long & Chen, 2015). Posteriormente se emplea la evaluación estadística y el análisis bidireccional de la varianza para analizar la importancia del efecto combinado de varios parámetros de fabricación en la resistividad del flujo de aire y el coeficiente de reducción de ruido (Arumugam, Mishra, Militky, & Tomkova, 2017).

Los géneros de punto por trama producen telas elásticas y muy flexibles. Pueden emplear hilos de fibra discontinua o de filamento continuo. En 2006 se estudia la absorción de sonido de tejidos simples de género de punto por trama, superponiendo varias capas de tejido (Dias & Monaragala, 2006). Se aplica un modelo teórico que supone los poros circulares, deduciendo que la absorción aumenta al reducir el tamaño de los poros y la

porosidad. Dicha absorción mejora a partir de los 1000 Hz, aumentando con la frecuencia en el rango estudiado. En 2010 se obtiene un modelo mixto para el empleo de este tipo de tejidos (Ghahremani Honarvar, Asghar, Jeddi, & Tehran, 2010), (Liu, Yan, & Zhang, 2015b).

Los tejidos de calada se obtienen mediante el entrecruzamiento de dos series de hilos perpendiculares. Su uso en acústica suele ser de forma suspendida en cortinas, con mayor o menor fruncido, pantallas y telones. En este caso, para su estudio se asimilan a una membrana porosa con una cámara de aire entre la misma y la pared (o superficie acústica dura posterior). Otro modo de empleo es como recubrimiento de otros materiales no tejidos o espumas a los que aportan sus características estéticas.

La relación entre el coeficiente de absorción de sonido de una cubierta tejida a distintas frecuencias y algunos parámetros de fabricación como el contenido de fibra, el número de hilos, o el factor de cobertura, así como de otros como el espacio de aire detrás del tejido y la influencia del lavado en la capacidad de absorción de sonido del tejido se estudia en 1990 (Y. Shoshani & Rosenhouse, 1990). Se observa que la absorción aumenta a frecuencias alrededor de 4000 Hz. Por otro lado, se estudia el efecto de una cámara de aire detrás y entre las capas de una cortina para obtener la máxima efectividad. Para ello se realiza una cortina con dos tejidos de alta porosidad separados, y se varía la distancia entre ellos para obtener la máxima efectividad para una aplicación específica (Hanna & Kandil, 1991). En 1999 Kang y Fuchs presentan un método teórico para el cálculo de la absorción de una membrana microperforada montada sobre una cavidad hermética. Para ello consideran que un tejido de fibra de vidrio de estructura abierta o una membrana microperforada, con una cámara de aire detrás, forma un sistema resonante. La impedancia acústica de este sistema se obtiene utilizando la analogía electroacústica, en la que el sistema resonante contiene el elemento de resistencia de masa en serie con la reactancia de la cámara de aire. El elemento de resistencia de masa consiste en la membrana y las aberturas conectadas en paralelo. Encuentran que el coeficiente de absorción de un tejido de fibra de vidrio o una membrana microperforada montada a 100 mm de una pared rígida puede ser superior a 0,4 en 3-4 octavas. Con dos capas del material, este rango puede extenderse a 4-5 octavas. Posteriormente se presenta un modelo para el cálculo del coeficiente de absorción del sonido a incidencia oblicua, también para estructuras a base de tejidos finos de filamento continuo, con cámara de aire, a partir de la resistencia al flujo de aire del tejido y de su densidad superficial (Pieren, 2012a).

Por otro lado, se propone un modelo híbrido que describe las propiedades acústicas de placas con macro perforaciones, las cuales se recubren con tejidos de poros microscópicos (Ruiz, Cobo, Dupont, Martin, & Leclaire, 2012). Este modelo utiliza la teoría de Maa sobre los paneles micro perforados y la teoría de Johnson-Champoux-Allard para mallas. Se obtienen resultados similares empleando en las perforaciones tejidos micrométricos de filtración y un tejido de cortina.

Más adelante, se estudia el efecto de varios parámetros de los tejidos, como el tipo de ligamento, la densidad de trama, el grosor del tejido, el sistema de hilado y la profundidad de la cámara de aire en la parte posterior de los tejidos. Los resultados ilustran que, el

coeficiente de absorción del sonido en tafetán, sarga 2/1, sarga 3/1, sarga 2/2, teletón y raso tiende a disminuir en el orden nombrado. Para una densidad de trama determinada, se encuentra que un número de hilo de 24,5 tex proporciona el tejido de mayor absorción. Los hilados por rotor debido a su sustancial volumen estructural y también a la presencia de fibras de envoltura muestran una mayor absorción que sus equivalentes en hilatura de anillos e hilos compactos (Soltani & Zarrebini, 2012).

Buscando la aplicación práctica de los tejidos en forma de cortina, se realiza un estudio sobre la absorción acústica de cortinas en cámara reverberante (R. Del Rey, Alba, Blanes, & Marco, 2013). En él se tienen en cuenta las condiciones de montaje, planteando diferentes plenums y distintos vuelos y se analiza la influencia de estos cambios en la absorción sonora. Los resultados muestran que, con un plenum determinado, el coeficiente de absorción aumenta al aumentar el vuelo, hasta un nivel máximo. Asimismo, se observa que las diferentes telas estudiadas proporcionan niveles de absorción acústica similar en las mismas condiciones de distancia a la pared y vuelo.

En 2013, se estudian las características acústicas de los tejidos en relación con sus parámetros estructurales y permeabilidad al aire. (Soltani & Zarrebini, 2013). Se utilizan muestras con diversas densidades de urdimbre y torsión de hilo. El efecto del grosor del tejido también se analiza, utilizando para ello muestras de tres y seis capas. Los resultados indican que el mayor coeficiente de absorción acústica lo proporcionan las telas tejidas con una densidad de trama de 30 hilos/cm. Asimismo, las muestras tejidas con menor torsión del hilo de trama absorben la onda sonora más eficientemente. Se observa que las muestras de tres y seis capas tejidas a bajas densidades de trama muestran aumentos significativos de absorción en comparación con aquellas tejidas a altas densidades de trama.

Con posterioridad, se amplían los modelos existentes al caso de las cortinas con vuelo, utilizando un enfoque semi empírico (Pieren & Heutschi, 2015). Los modelos consideran diferentes condiciones de soporte, de diferentes tejidos y con diferentes grados de rizado.

Otra forma de instalación de cortinas es en forma de estores enrollables, generalmente fabricados en tejido de poliéster y recubiertos con resinas acrílicas. Recientemente se ha estudiado la influencia del contenido de acrílico en el material de revestimiento, el tipo de tejido y las estructuras que se producen por el proceso de revestimiento. Aumentar el contenido de acrílico en la resina hasta un 40% aumenta el valor de absorción de sonido, pero al aumentar más allá de esta proporción se produce generalmente una reflexión del sonido del tejido (Demiryürek & Aydemir, 2017).

Por otra parte, se estudian los tejidos con ligamentos de relieve en cámara reverberante, comprobando que las telas con ligamentos de relieve obtienen menor coeficiente de absorción acústica que otras telas, debido principalmente a estructuras menos densas en espesores mayores y a estructuras internas más abiertas (Barburski, Blaszcak, & Pawliczak, 2018).

Más recientemente se estudia el comportamiento de absorción acústica una serie de tejidos de algodón con ligamento esterilla y distintas densidades. Se establecen múltiples

modelos de regresión lineal para caracterizar la relación entre el comportamiento acústico y varios parámetros físicos, incluyendo el grosor, el diámetro, la ratio de perforación, la densidad superficial, la rigidez y la permeabilidad al aire. Se emplea el tejido con plenum de 0, 1, 2 y 3 cm. Se deduce que el grosor, el diámetro, el peso y la rigidez de los tejidos tienen efectos insignificantes en las propiedades acústicas (Tang, Kong, & Yan, 2018).

En relación al estudio de la influencia de los acabados textiles sobre las características acústicas de los mismos, en 2020 se evalúa la influencia de la concentración de microcápsulas sobre un tejido. Se observa que la variación en la concentración de las mismas influye sobre el coeficiente de absorción de sonido del tejido (Atiénzar-Navarro, Bonet-Aracil, Gisbert-Payá, del Rey, & Picó, 2020).

1.5.3 Combinación de tejido y no tejido

Hemos visto cómo los tejidos, para poder ser empleados en aplicaciones de acondicionamiento acústico necesitan, bien aumentar su grosor a base de superponer capas, como los géneros de punto por urdimbre, o bien tener una cámara de aire posterior como en el caso de las cortinas y estores. Otra opción consiste en superponer un tejido a un no tejido. De esta forma se aprovechan las características estéticas del tejido y el bajo precio del no tejido.

Esta combinación es ensayada en 1991 (Shoshani, 1991), observándose que la combinación proporcionaba coeficientes de absorción acústica significativamente más altos que los del no tejido de forma individual, siendo este aumento entre 20% y 40% en frecuencias inferiores a 500 Hz. También se comprueba que la mayor absorción se obtenía al situar la capa de tejido en la cara más cercana a la fuente de sonido. Posteriormente, en 2012, cuando el empleo de pantallas resistivas o placas perforadas frente a un material poroso está ya extendido, se describe cómo la capa resistiva formada por un tejido “aguas arriba” de un no tejido puede emplearse para controlar la absorción de sonido de la capa porosa, e incluso puede perjudicar dicha absorción (Chevillotte, 2012). Como resultado, se señala que la capa resistiva aguas arriba puede controlar la absorción acústica del material multicapa poroso, anulando al mismo tiempo las propiedades acústicas de la capa aguas abajo, incluso pudiendo ser perjudicial. Para ello se emplea un no tejido a base de fibra de vidrio y un tejido con una densidad de urdimbre de 15 h/cm. La aplicación del tejido produce un aumento de la absorción a bajas frecuencias y una disminución a altas frecuencias. La selectividad en la absorción del sonido aumenta al descender la ratio de perforación del tejido, ya que la estructura de dos capas considerada tiende a actuar como un resonador de Helmholtz. Por último, abre el paso a la mejora de la absorción acústica de cualquier material poroso con un rendimiento de absorción acústica deficiente mediante una capa resistiva convenientemente diseñada.

En este punto enlaza el presente trabajo, el cual, basándose en un material poroso para uso no acústico, estudia las variaciones de la capa resistiva de tejido, en base a parámetros de producción.

Referencias

- Abdullah, A. H., Azharia, A., & Salleh, F. M. (2015). Sound absorption coefficient of natural fibres hybrid reinforced polyester composites. *Jurnal Teknologi*, 76(9), 31-36.
- Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. *Sound and Vibration*, 12-17. Recuperado de <http://www.sandv.com/downloads/1007croc.pdf>
- Arumugam, V., Mishra, R., Militky, J., & Tomkova, B. (2017). Noise attenuation performance of warp knitted spacer fabrics. *Textile Research Journal*.
- Asdrubali, F. (2006). Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. *EURONOISE 2006 - The 6th European Conference on Noise Control: Advanced Solutions for Noise Control*, 1-10.
- Atiénzar-Navarro, R., Bonet-Aracil, M., Gisbert-Payá, J., del Rey, R., & Picó, R. (2020). Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules. *Applied Acoustics*, 164.
- Bansod, P. V., Sai Teja, T., & Mohanty, A. R. (2017). Improvement of the sound absorption performance of jute felt-based sound absorbers using micro-perforated panels. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 36(4), 376-389.
- Bansod, P. V. V., & Mohanty, A. R. R. (2016). Inverse acoustical characterization of natural jute sound absorbing material by the particle swarm optimization method. *Applied Acoustics*, 112, 41-52.
- Barburski, M., Blaszczyk, J. R., & Pawliczak, Z. (2018). Influence of designs of weaves on acoustic attenuation of fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 152808371876994.
- Beranek, L. L., & Mellow, T. J. (2012). *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press is an imprint of Elsevier. Recuperado de <http://elsevier.com/locate/permissions>,
- Berardi, U., & Iannace, G. (2017). Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. *Applied Acoustics*, 115, 131-138.
- Berardi, U., Iannace, G., & Di Gabriele, M. (2017). The Acoustic Characterization of Broom Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 14(6), 858-863.
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (2000). New WHO Guidelines for Community Noise. *Noise & Vibration Worldwide*, 31(4), 24-29.
- Biot, M. A. (1956a). Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- Biot, M. A. (1956b). Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *J. Acoust. Soc. Am.*
- Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F., & Ricciardi, P. (2018). Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. *Construction and Building*

- Materials*, 171, 338-349.
- Casadesús, M., Álvarez, M. D., Garrido, N., Molins, G., Macanás, J., Colom, X., ... Carrillo, F. (2019). Environmental impact assessment of sound absorbing nonwovens based on chicken feathers waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 489-499.
- Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73(1), 56-60.
- Chin, D. D. V. S., Yahya, M. N. Bin, Che Din, N. Bin, & Ong, P. (2018). Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel (BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA). *Applied Acoustics*, 138, 179-187.
- Consejo, D. O. del P. E. y del. Reglamento UE n 10072011 del Parlamento Europeo y del Consejo 27 de septiembre de 2011 (2011). Unión Europea: D.O. del Parlamento Europeo y del Consejo.
- Cox, T. T. J., & D'antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. Psychological Science*.
- Crocker, M. J. (Ed.). (2007). *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley & Sons.
- Del Rey, R., Alba, J., Blanes, M., & Marco, B. (2013). Absorción acústica de cortinas textiles en función del vuelo. *Materiales de Construcción*, 63(312), 569-580.
- Del Rey, R., Alba, J., Ramis, J., & Sanchís, V. J. (2011). Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico. *Materiales de Construcción*. 304, 547-558.
- Del Rey, Romina, Alba, J., Arenas, J. P., & Ramis, J. (2013). Evaluation of two alternative procedures for measuring airflow resistance of sound absorbing materials. *Archives of Acoustics*, 38(4), 547-554.
- del Rey, Romina, Uris, A., Alba, J., & Candelas, P. (2017). Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications. *Materials*, 10(11).
- Demiryürek, O., & Aydemir, H. (2017). Sound absorbing properties of roller blind curtain fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 47(1), 3-19.
- Dias, T., & Monaragala, R. (2006). Sound absorption in knitted structures for interior noise reduction in automobiles. *Measurement Science and Technology*, 17(9), 2499-2505.
- Dias, T., Monaragala, R., & Lay, E. (2007). Analysis of thick spacer fabrics to reduce automobile interior noise. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 1979-1991.
- Dias, T., Monaragala, R., Needham, P., & Lay, E. (2007). Analysis of sound absorption of tuck spacer fabrics to reduce automotive noise. *Measurement Science and Technology*, 18(8), 2657-2666.
- Dieckmann, E., Dance, S., Sheldrick, L., & Cheeseman, C. (2018). Novel sound absorption materials produced from air laid non-woven feather fibres. *Heliyon*, 4(9).
- Ersoy, S., & Küçük, H. (2009). Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. *Applied Acoustics*, 70(1), 215-220.

- Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72(2-3), 108-114.
- Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2012). Noise Control of Home Appliances — The Green Way. *Noise & Vibration Worldwide*, 43(7), 26-34.
- Fuchs, H. V. (2013). *Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Guía de Aplicación del DB HR. (s.f.). Recuperado 9 de abril de 2020, de <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/menu-guia-aplicacion-db-hr.html>
- Hanna, Y. I., & Kandil, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*.
- Huda, S., & Yang, Y. (2009). Feather fiber reinforced light-weight composites with good acoustic properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 17(2), 131-142.
- Instituto Nacional de Medicina y Seguridad en el Trabajo (Spain), R., Maqueda Blasco, J., Ordaz Castillo, E., Asúnsolo del Barco, Á., Silva Mato, A., Bermejo García, E., & Gamo González, M. F. (2009). *Medicina y seguridad del trabajo. Medicina y Seguridad del Trabajo* (Vol. 55). Instituto Nacional de Medicina y Seguridad del Trabajo. Recuperado de http://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0465-546X2009000200004&script=sci_arttext&tlng=en
- Intini, F., & Kühtz, S. (2011). Recycling in buildings: An LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 306-315.
- Isbert, A. C. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* (Vol. 4). Univ. Politèc. de Catalunya
- Ismail, L., Ghazali, M. I., Mahzan, S., & Zaidi, A. M. A. (2010). Sound absorption of Arenga Pinnata natural fiber. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 43, 804-806.
- Jaouen, L. (s.f.). *Propagation models* APMR. Recuperado 13 de abril de 2020, de <https://apmr.matelys.com/PropagationModels/index.html>
- Jaramillo, A. M. (2007). *Acústica: la ciencia del sonido*. Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Jayaraman, K. A. (2005). Acoustical Absorptive Properties of Nonwovens. *fitfibers.com*. Recuperado de <http://fitfibers.com/wp-content/uploads/2018/06/04dg-acoustic-absorption.pdf>
- Juliá Sanchis, E. (2008). *Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica. PhD Thesis. Riunet*. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain).
- Kamath, M. G. (2004). Processing and Evaluation of Cotton-based Composites for Automotive and Other Applications. *Graduate Thesis*.
- Kinsler, L., Frey, A., Acoustics, A. C. Edition, 4th, & 1999, Fundamentals of acoustics.

adsabs.harvard.edu.

- Koruk, H., & Genc, G. (2015). Investigation of the acoustic properties of bio luffa fiber and composite materials. *Materials Letters*, 157, 166-168.
- Küçük, M., & Korkmaz, Y. (2012). The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites. *Textile Research Journal*, 82(20), 2043-2053.
- Lee, Y., & Joo, C. (2003). Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. *Autex Research Journal*, 3(2), 78-84.
- Lim, Z. Y., Putra, A., Nor, M. J. M., & Yaakob, M. Y. (2018). Sound absorption performance of natural kenaf fibres. *Applied Acoustics*, 130, 107-114.
- Liu, Xinjin, Liu, J., & Su, X. (2015). A computational model for the sound absorption coefficients of multi-layer non-wovens. *Textile Research Journal*, 85(15), 1553-1564.
- Liu, X, Yan, X., & Zhang, H. (2015a). Sound absorption model of kapok-based fiber nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 85(9), 969-979.
- Liu, X, Yan, X., & Zhang, H. (2015b). Sound absorption model of kapok-based fiber nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 85(9), 969-979.
- Liu, X, Yan, X., & Zhang, H. (2016). Effects of pore structure on sound absorption of kapok-based fiber nonwoven fabrics at low frequency. *Textile Research Journal*, 86(7), 755-764.
- Liu, Y., & Hu, H. (2010). Sound Absorption Behavior of Knitted Spacer Fabrics. *Textile Research Journal*, 80(18), 1949-1957.
- Long, H. R., & Chen, S. (2015). Effect of structural parameters on the sound absorption properties of warp-knitted spacer fabrics. *Industria Textila*.
- Lou, C W. (2005). Recycling Polyester and Polypropylene Nonwoven Selvages to Produce Functional Sound Absorption Composites. *Textile Research Journal*, 75(5), 390-394.
- Lou, Ching Wen, Lin, J. H., & Su, K. H. (2005). Recycling Polyester and Polypropylene Nonwoven Selvages to Produce Functional Sound Absorption Composites. *Textile Research Journal*, 75(5), 390-394.
- Mamtaz, H., Fouladi, M. H., Al-Atabi, M., & Namasivayam, S. N. (2016). Acoustic absorption of natural fiber composites. Hindawi Limited.
- Mamtaz, H., Fouladi, M. H., Nuawi, M. Z., Namasivayam, S. N., Ghassem, M., & Al-Atabi, M. (2017). Acoustic absorption of fibro-granular composite with cylindrical grains. *Applied Acoustics*, 126, 58-67.
- Mati-Baouche, N., De Baynast, H., Michaud, P., Dupont, T., & Leclaire, P. (2016). Sound absorption properties of a sunflower composite made from crushed stem particles and from chitosan bio-binder. *Applied Acoustics*, 111, 179-187.
- Mishra, S. P., Bhanupriya, & Nath, G. (2018). Synthesis and analysis of acou-physical properties of banana biocomposite. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 310). Institute of Physics Publishing.

- Mohanty, A. R., & Fatima, S. (2010). Jute as an acoustical material for noise control of a domestic dryer. En *17th International Congress on Sound and Vibration 2010, ICSV 2010* (Vol. 5).
- Mozhdeh Ghahremani Honarvar, Ali Asghar Asgharian Jeddi, & Amani Tehran, M. (2010). Noise Absorption Modeling of Rib Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*, 80(14), 1392-1404.
- Narang, P. P. (1995a). Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 45(4), 335-358.
- Narang, P. P. (1995b). Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 45(4), 335-358.
- Nick, A., Becker, U., & Thoma, W. (2002). Improved acoustic behavior of interior parts of renewable resources in the automotive industry. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(3), 115-118.
- OIT, O. I. del T. (2001). *Seguridad en la utilización de las lanas aislantes de fibra vítrea sintética (lana de vidrio, lana mineral de roca y lana mineral de escorias)*. Recuperado de http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed%7B_%7Dprotect/@protrav/@safe/work/documents/normativeinstrument/wcms%7B_%7D146635.pdf
- Or, K. H., Putra, A., & Selamat, M. Z. (2017). Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. *Applied Acoustics*.
- Othmani, C., Taktak, M., Zain, A., Hantati, T., Dauchez, N., Elnady, T., Haddar, M. (2017). Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes. *Applied Acoustics*, 120, 90-97.
- Othmani, C., Taktak, M., Zein, A., Hentati, T., Elnady, T., Fakhfakh, T., & Haddar, M. (2016). Experimental and theoretical investigation of the acoustic performance of sugarcane wastes based material. *Applied Acoustics*, 109, 90-96.
- Patnaik, A., Mvubu, M., Muniyasamy, S., Botha, A., & Anandjiwala, R. D. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy and Buildings*, 92, 161-169.
- Piégay, C., Glé, P., Gourdon, E., Gourlay, E., & Marceau, S. (2018). Acoustical model of vegetal wools including two types of fibers. *Applied Acoustics*, 129, 36-46.
- Pieren, R. (2012a). Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Textile Research Journal*, 82(9), 864-874.
- Pieren, R. (2012b). Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Textile Research Journal*, 82(9), 864-874.
- Pieren, R. (2012c). Sound Absorption Modelling of Thin, Lightweight Curtains. *Euronoise 2012*, (c), 815-820. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/263007740>
- Pieren, R., & Heutschi, K. (2015). Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method. *Applied Acoustics*, 92, 27-41.
- Pieren, R., Schäffer, B., Schoenwald, S., & Eggenschwiler, K. (2016). Sound absorption of

- textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Textile Research Journal*, 88(1), 004051751667333.
- Putra, A., Abdullah, Y., Efendy, H., Farid, W. M., Ayob, M. R., & Py, M. S. (2013). Utilizing sugarcane wasted fibers as a sustainable acoustic absorber. En *Procedia Engineering* (Vol. 53, pp. 632-638). Elsevier Ltd.
- Qui, H., & Enhui, Y. (2018). Effect of Thickness, Density and Cavity Depth on the Sound Absorption Properties of Wool Boards. *Autex Research Journal*, 18(2), 203-208.
- Ramamoorthy, M., & Rengasamy, R. S. (2019). Study on the effects of denier and shapes of polyester fibres on acoustic performance of needle-punched nonwovens with air-gap: comparison of artificial neural network and regression modelling approaches to predict the sound absorption coefficient of nonw. *Journal of the Textile Institute*, 110(5), 715-723.
- Ramis, J., Alba, J., Del Rey, R., Escuder, E., & Sanchís, V. J. (2010). Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf. *Materiales de Construcción*, 60(299), 133-143.
- Recuero López, M. (2000). *Ingeniería acústica*. Paraninfo.
- Rubino, C., Aracil, M. B., Gisbert-Payá, J., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., Cantó, M. Z., & Martellotta, F. (2019). Composite eco-friendly sound absorbing materials made of recycled textilewaste and biopolymers. *Materials*, 12(23).
- Ruiz, H., Cobo, P., Dupont, T., Martin, B., & Leclaire, P. (2012). Acoustic properties of plates with unevenly distributed macroporations backed by woven meshes. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- Seddeq, H. S., Aly, N. M., Marwa A, A., & Elshakankery, M. H. (2013). Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials. *Journal of Industrial Textiles*, 43(1), 56-73.
- Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., & Bonet-Aracil, M. (2018). The Use of Fabrics to Improve the Acoustic Absorption: Influence of the Woven Fabric Thread Density over a Nonwoven. *Autex Research Journal*.
- Shoshani, Y. K. (1991, enero). Noise absorption by a combination of woven and nonwoven fabrics. *Journal of the Textile Institute*.
- Shoshani, Y., & Rosenhouse, G. (1990). Noise absorption by woven fabrics. *Applied Acoustics*, 30(4), 321-333.
- Shoshani, Yakir, & Yakubov, Y. (2000). Generalization of Zwicker and kosten theory for sound absorption in flexible porous media to the case of variable parameters. *Journal of Computational Acoustics*, 08(03), 415-441.
- Singh, V. K., & Mukhopadhyay, S. (2020). Banana fibre-based structures for acoustic insulation and absorption. *Journal of Industrial Textiles*.
- Soltani, P., & Zarrebini, M. (2013). Acoustic performance of woven fabrics in relation to structural parameters and air permeability. *Journal of the Textile Institute*, 104(9), 1011-1016.

- Soltani, P., & Zarrebini, M. (2012). The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics. *Textile Research Journal*, 82(9), 875-882.
- Tang, X., Kong, D., & Yan, X. (2018). Multiple regression analysis of a woven fabric sound absorber. *Textile Research Journal*, 004051751875800.
- Tang, X., & Yan, X. (2017). Multi-layer fibrous structures for noise reduction. *Journal of the Textile Institute*, 108(12), 2096-2106.
- Tang, X., Zhang, X., Zhuang, X., Zhang, H., & Yan, X. (2018). Sound absorption properties of nonwoven fabric based multi-layer composites. *Polymer Composites*.
- Tholkappian, E., Saravanan, D., Jagasthitha, R., Angeswari, T., & Surya, V. T. (2014). Prediction of acoustic performance of banana fiber-reinforced recycled paper pulp composites. *Journal of Industrial Textiles*, 45(6), 1350-1363.
- Ul-Islam, S., & Butola, B. S. (Eds.). (2018). *Advanced textile engineering materials*. John Wiley & Sons.
- Watanabe, K., Minemura, Y., Nemoto, K., & Sugawara, H. (1999). Development of high-performance all-polyester sound-absorbing materials. *JSAE review*, 20(3), 357-362.
- Yahya, M. N., & Sheng Chin, D. D. V. (2017). A Review on the Potential of Natural Fibre for Sound Absorption Application. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 226, p. 012014).
- Yang, H. S., Kim, D. J., & Kim, H. J. (2003). Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*, 86(2), 117-121.
- Yang, S., Yu, W., & Pan, N. (2011). Fractal phenomenon in sound absorbing behavior of down fiber assembly. *Textile Research Journal*, 81(11), 1139-1144.
- Yang, W. D., & Li, Y. (2012). Sound absorption performance of natural fibers and their composites. *Science China Technological Sciences*.
- Yuhazri, M., & Sihambing, H. (2010). The Potential of Agriculture Waste Material for Noise Insulator Application toward Green Design and Material. *Civil & Environmental Engineering*, 10(05), 10-15.
- Zwikker, C., & Kosten, C. W. (1949). *Sound absorbing materials*. Elsevier..

Capítulo 2

Publicaciones

En el presente capítulo se incluyen los artículos y publicaciones a partir de los trabajos realizados.

En primer lugar, aparece una revisión documental que ayuda a comprender el estado de la técnica en cuanto al empleo de materiales textiles de distintos tipos en acústica arquitectónica.

A continuación, se muestran una serie de artículos dedicados a la aplicación de distintos tipos de tejido como capa resistiva sobre una capa de no tejido, de varios espesores. Se trata de tejidos de poliéster, de calada de una y varias capas, tejidos de microfibra mezcla de poliéster y poliamida, así como tejidos de yute.

Finalmente aparecen algunos tratamientos de acabado que es posible aplicar sobre los tejidos y que modifican su absorción acústica. Estos tratamientos se aplican empleando resina acrílica y son recubrimientos con carbón activado y con polvo de turmalina.

2.1 Adaptación del artículo: textiles in architectural acoustic conditioning: a review

Artículo aceptado para su publicación, en: “Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, Bonet-Aracil, M J., Montava, & Ernesto. I., (En prensa). Textiles In Architectural Acoustics: A review. *The Journal of the Textile Institute*”.

Abstract

Environmental noise is a problem of increasing interest in advanced societies. Different types of textiles have properties which are suitable for the construction of elements able to condition sound in rooms. The use of these elements can foster acoustic comfort in all kind of rooms, both public and private. This work is a review of the possibilities and trends of textile materials in the field of acoustic conditioning.

The use of textile materials for acoustic conditioning is widely extended. On the other hand, many efforts have been done in the last decades to understand the sound absorption mechanisms and to design materials and devices able to customize the sound space. Many of these new developments have used materials like wood, metal, plastic. Textiles can be thought as fully designable materials and potential base of composites, providing their unique technical and aesthetical characteristics to any ensemble.

2.1.1 Introduction

Sound is produced when a solid element transmits a vibration to the air molecules close to it and a pressure wave is generated and transmitted through the air particles. These

pressure waves, called sound waves are perceptible by the human ear when their frequencies are between approximately 20 Hz and 20 kHz. The frequency response of hearing is most sensitive in the speech frequency range, between 2 and 3 kHz (McGeown, 2007). In the standard ISO 226:2003 (ISO 226:2003, 2003) there are some curves that show combinations of pure tones in terms of frequency and sound pressure level, which are perceived as equally loud by the human auditory system. In these curves the different sensitivity of the ear depending on the frequency of the sound is shown. At medium frequencies, the sensibility is high and at lower and higher frequencies it is low (Crocker, 1998), (Cremer, Müller, & Translated by Schultz, 1982).

Sound is a spherical pressure wave. It can be transmitted, reflected or absorbed to a greater or lesser percentage, and arrives to the receiver from various directions, forming the diffuse sound field. Room acoustics enables to achieve acoustic comfort by means of actions on the structures forming rooms like walls, ceiling and floor. In figure 2.1.1 functions of room acoustics are shown.

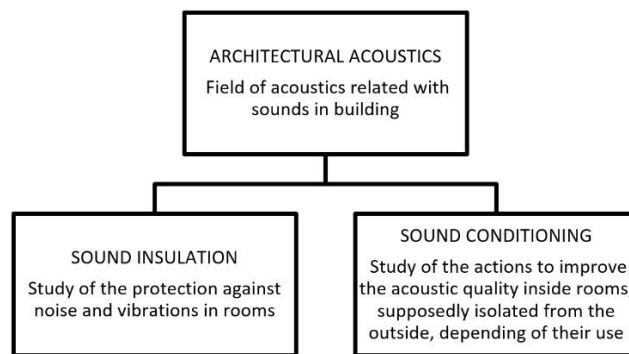


Figure 2.1.1. Functions of architectural acoustics (Fuchs, 2013), (Arenas & Crocker, 2010), (Beranek, 1986).

Acoustic isolation avoids sounds to exit from the room or to enter from the outside. Standards for building acoustics isolation are becoming more restrictive and there is a trend towards a common framework through Europe (Rasmussen & Machinbarrena, s.f.).

Acoustic conditioning seeks the distribution of the reflected energy as a function of time and frequency, given the intended use of the room. If all surfaces in a room are acoustically reflective, the amplitude of the acoustic waves increases at the room resonance frequencies, which depend on the dimensions and geometry of the room, producing the reverberation effect. The parameter used to control the reverberation resonances in the room is the reverberation time, usually defined as the length of time in which sound decays a certain number of decibels.

The function of sound conditioning is usually associated with architecture, but it is also important in the transport field.

2.1.2 Sound absorption

Many materials in different configurations can be used as acoustic absorbers, as shown in figure 2.1.2. The dash line boxes show the modification of the original classification made by the authors.

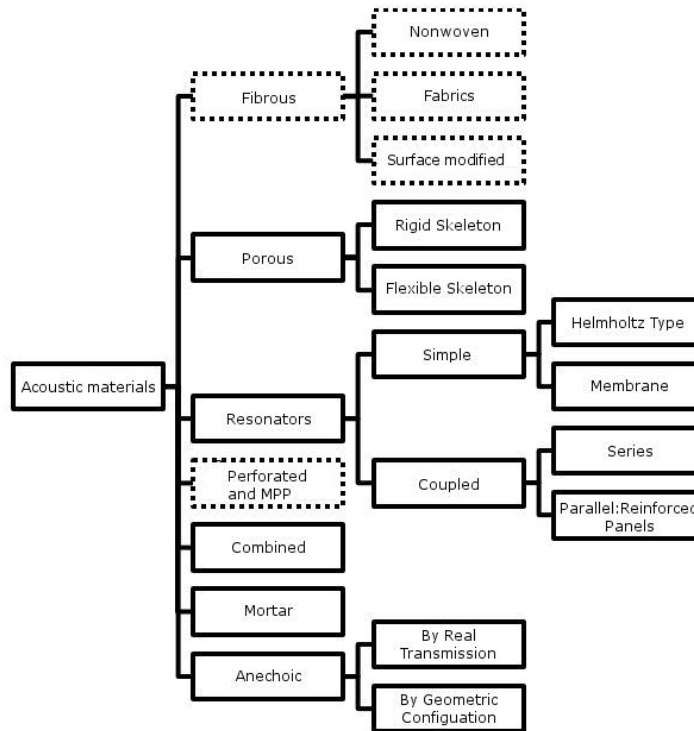


Figure 2.1.2. Scheme of acoustic absorbent materials. Source: (Recuero López, 2000) modified by authors.

Sound absorbers transform sound energy into another energy. Porous and fibrous materials transform energy mainly in heat, due to viscous processes. The sound wave produces vibration, the air contained in open pores or among fibres, vibrates, producing friction against the fibre surface and dissipation of the sound waves energy, transformed in heat. There are also losses due to thermal conduction. The place in the room where the porous or fibrous absorber is placed is important.

Another way to transform sound energy into mechanical energy is by means of resonators (Fuchs, 2013). Regarding membrane resonators, the sound wave transmits its energy to a non-porous and flexible plate, which vibrates and dissipates energy by the internal friction of its particles.

Instead of using a solid material like fibres or a membrane, it is possible to take advantage from the vibration of air. An element used for sound absorption is the Helmholtz resonator. It is formed by a cavity with a neck which is connected to the exterior. This mechanism uses the spring-mass effect: the air in the neck acts like a mass, and the air of the cavity acts like the spring. A peak of absorption is obtained at the resonance frequency. The walls of the cavity dissipate vibrations by friction. The absorption in this case presents a very narrow curve, centred at the resonance frequency. Its advantage is its capacity to absorb at low frequencies.

An associated resonators system can be obtained with a micro perforated panel. This sort of acoustic absorption device was described by Maa (Maa, 1975) and refined subsequently. A micro perforated panel is made of a fine plate of material like metal, plastic, etc. in which many little holes are drilled. The size of the perforation is sub millimetre and an air gap is left at the back of it. The small size of perforation increases the resistance of the panel to the sound passing through, generating energy losses by frictional effects.

It is possible to widen the range of absorbed frequencies of resonators by different techniques, like for instance installing arrays of resonators tuned at different frequencies or placing porous material in the cavity.

Recently some efforts are performed to obtain new materials, they are called metamaterials. These materials are characterized by effective properties (Venegas, Stephen Elliott, Umnova, & Moardman, 2014). They are usually made by a periodic array of local resonators with a subwavelength scale pattern. Metamaterials can be obtained (Mei et al., 2012) by using different type of resonators. It is an innovative field and there is an increasing interest on it, with new studies and researches appearing every day (Mei et al., 2012), (M. Yang, Ma, Wu, Yang, & Sheng, 2014), (M. Yang et al., 2015), (Ma & Sheng, 2016), (Wu, Yang, & Sheng, 2018).

The sound absorption coefficient α is used to characterize the response in frequency of the plane absorbing systems. It is a dimensionless magnitude defined as the ratio of sound energy absorbed to the total incident energy. The absorbing response of a certain material can be defined for normal or diffuse incidence, being obtained by measurements according to standard procedures. Some methods need a reverberation chamber, as the one described in ISO 354 (ISO, 2003). This method is based in the fact that acoustic materials receive waves from different angles, randomly.

Other methods use the acoustic impedance tube method, at normal incidence, as the one described in ISO 10534-2 (ISO, 2002). This is one of the most widely used methods for acoustic characterization of materials (Juliá Sanchis, 2008), (Parikh et al., 2002), (Jimenez-Espadafor, Becerra Villanueva, García, Trujillo, & Blanco, 2011), (Miravete, 2000), (Tsai, 1988), (Hull, 2003) as it needs a small sample size. Plane waves are generated in the tube by the sound source, and the pressure in two near positions is measured. The sound absorption coefficient for normal incidence α can be obtained by the equation 2.1.1:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \text{Equation 2.1.1}$$

Where:

r is the normal incidence reflection coefficient, obtained by equation 2.1.2.

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1} \quad \text{Equation 2.1.2}$$

Where:

H_{12} = complex transference function,

H_R = transference function from the reflected wave,

k_0 = complex wavenumber

x_1 = distance between sample and microphone.

Another parameter directly related to the reflection coefficient is the specific acoustic impedance Z , which shows how the surface of a material behaves against the sound pressure. It is obtained by equation 2.1.3. The higher the acoustic impedance, the lower the acoustic absorption.

$$Z = \frac{1+r}{1-r} \quad \text{Equation 2.1.3}$$

The sound absorption coefficient is represented as a function of frequency. Figure 2.1.3 shows different values of absorption of a 45 mm polyester nonwoven from 400 to 4000 Hz. A value of 1 would mean that the material absorbs all the acoustic energy.

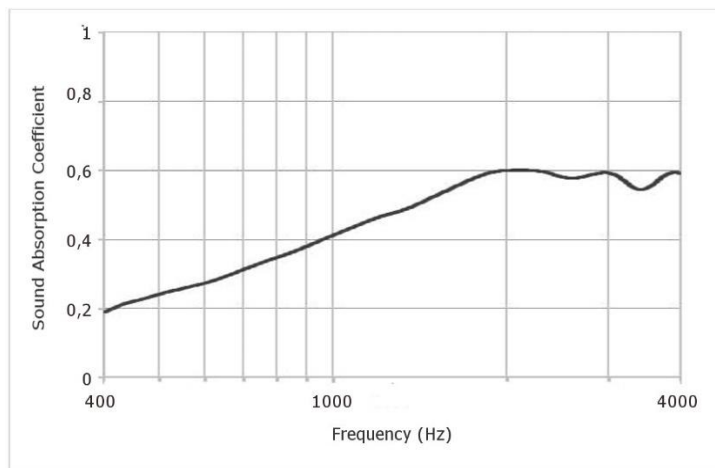


Figure 2.1.3. Sound absorption coefficients of a 45mm thick polyester nonwoven. Source: Authors measurement.

2.1.3 Textile materials in room acoustics

Since ancient times, textiles have had more functions than just decorative. They have been used as a barrier against light, or as thermal isolation elements. For instance, the Pazyryk carpet (400 a. C.) currently in the Hermitage museum in Saint Petersburg was used by central Asia nomadic tribes in their tents. Nowadays, the acoustic properties of textile products are well known (Nayak & Padhye, 2016), (Alonso & Martellotta, 2015), (Alonso & Martellotta, 2016), (Kang & Fuchs, 1999).

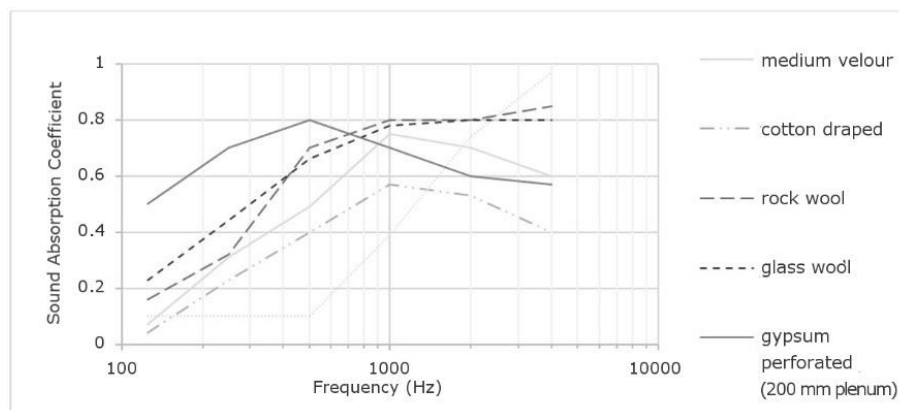


Figure 2.1.4. Sound absorption coefficients of various materials. Authors elaboration from different sources.

The effect of sound absorption of a textile material is related to its location and the covered surface area in the room. The textile can be placed directly on the room boundaries, or as a part of upholstered furniture and decorations, producing acoustic absorption and influencing the room acoustic conditioning.

On the other hand, a textile layer can be placed near the room surfaces with an air gap or plenum, like curtains. In this case, the maximum absorption takes place at a frequency for which the distance to the wall is a quarter of its wavelength. As the distance is increased, the frequency at which the absorption is maximum, decreases.

2.1.3.1 Nonwovens

Nonwovens are produced in roll or panels, and can be made of different kind of fibres (Arenas & Crocker, 2010): mineral like stone and glass wool, ceramic and graphite; vegetal like cotton, hemp, kenaf, wood, etc.; animal like wool; and synthetic cellulosic like bamboo or polymeric like polyester, polypropylene, para-aramid, etc.

There are numerous studies of nonwovens in the form of waddings or “wools”. The purpose of many of them is to find a propagation model in the fibrous sound absorbers, existing two options (Cox & D’antonio, 2009): macroscopic models Delany and Bazley (Delany & Bazley, 1970), Garai and Pompoli (Garai & Pompoli, 2005) and micro

structural models. Microstructural methods have evolved since those based on a rigid frame like Johnson et al. (Johnson, Koplik, & Dashen, 1987), Champoux et al. (Champoux & Allard, 1991), (Stinson & Champoux, 1992), Allard et al. (J. F. Allard, Bourdier, & L'Esperance, 1987), (J. Allard & Champoux, 1992), (Jean F. Allard & Atalla, 2009), Kino and Ueno (Kino & Ueno, 2008). On the other hand there are some proposed models that take into account the elastic frame of the material like Biot (Biot, 1956), (Biot, 1956), Shoshani and Yakubov (Yakir Shoshani & Yakubov, 1999), (Yakir Shoshani & Yakubov, 2000a), (Yakir Shoshani & Yakubov, 2000b).

Some existing works describe acoustic properties of nonwovens made of different natural fibres, like cashmere, down, kenaf, kapok, milkweed and oil palm empty fruit bunch fibres, jute (Berardi & Iannace, 2015), (Küçük & Korkmaz, 2012), (S. Yang, Yu, & Pan, 2010), (Ramis, Alba, Del Rey, Escuder, & Sanchís, 2010), (Ganesan & Karthik, 2016), (X. Liu, Yan, & Zhang, 2015), (X. Liu, Yan, & Zhang, 2016), (Or, Putra, & Selamat, 2017), (Fatima & Mohanty, 2011), etc. These studies demonstrate that sound absorption coefficients near to 1 can be achieved between 1000 and 6000 Hz using nonwovens made of natural fibres.

The use of nonwovens based on rayon and cotton precursors, after carbonized and activated can provide a sound absorption coefficient near 0,8 with good absorption between 500 and 7000 Hz (Jiang, Chen, & Parikh, 2009), (Chen & Jiang, 2007).

2.1.3.2 Knitted fabrics

Knitted fabrics are obtained by forming loops when interlacing yarns. There are different processes to form these loops: warp knit and weft knit.

Warp knit fabrics

In the field of textile technical applications, warp knitting technology has advantages like the possibility to obtain numerous layers of different materials in a single fabric, great dimensional stability and different possible thicknesses, as well as the production of multi-axial fabrics.

Mesh fabrics have a structure that may resemble partially to the acoustic absorption behaviour of a micro perforated panel, with the advantage of lightweight. Liu and Hu studied multi-layered warp and weft knitted fabrics (Y. Liu & Hu, 2010). It is possible to obtain a sound absorption coefficient around 0,8 in the frequency range between 1000 and 6000 Hz with eight layers. Chen and Long (Long & Chen, 2015) varied parameters of the warp knitted fabric like thickness, inclination and diameter of the spacer yarn and surface layer structure, obtaining values of sound absorption coefficient over 0,5 at frequencies above 3000 Hz with one layer of fabric.

Weft knit fabrics

Dias and Monaragala (Dias & Monaragala, 2006) measured the sound absorption of simple and double weft knitted fabrics and compare these measurements with a theoretical

model, obtaining sound absorption coefficients over 0,1 and 0,15 at frequencies above 2500 Hz with a maximum thickness of 3,1 mm.

2.1.3.3 *Woven fabrics*

Woven fabrics are used as materials for covering other acoustic materials, due to their aesthetic properties. Various studies have been carried out on the acoustic properties of different woven fabrics in order to find a model that explains their acoustic absorption. These models show that a woven fabric with an air gap present a behavior analogue to a resonator, with an acoustic absorption curve with peaks up to 0,9 at different frequencies between 250 and 4000 Hz. Shoshani and Rosenhouse (Shoshani & Rosenhouse, 1990) investigated the relation between noise absorption coefficients of a woven fabric cover and its intrinsic parameters like content of fibres, yarn count, cover factor, air gap behind the fabric, and how the effect of the cleaning process affects the sound absorption capacity of the fabric. Kang and Fuchs (Kang & Fuchs, 1999) introduced a model which combines membrane and micro perforated panels, mounting up to two layers of glass fibre fabric at 0,1m from a rigid wall. Pieren (Pieren, 2012) studied simple fabrics with an air gap, obtaining a model for oblique sound absorption coefficient suitable for fine fabrics plus an air gap, using the air flow resistivity and the areal surface of the fabric. The theoretical model simulates accurately the experimental results.

In the field of acoustic woven fabrics there are some studies based on experimental measurements of physical structural properties like thickness, air gap, porosity, density, yarn regularity and fineness, among others. These studies show the importance of certain fabric structure parameters and the air gap, in the acoustic absorption coefficient. The results agree with those obtained with the theoretical model presented above.

Hanna and Kandil (Hanna & Kandil, 1991) studied the effect of an air gap behind and between the layers of a double fabric curtain. Both layers were separated by a layer of air which was varied in order to increase effectiveness. Soltani and Zarrebini (Soltani, & Zarrebini, 2012), (Soltani & Zarrebini, 2013) verified the influence of porosity, fabric density, fabric thickness, weft thread fineness and twist, yarn irregularity and floats length, in the sound absorption coefficient of the fabric. Na et al measured the sound absorption coefficient of different microfiber fabrics obtaining higher values than those of conventional fabrics.

2.1.3.4 *Combination of fabric and nonwoven*

The use of porous materials like mineral wools shows some drawbacks like the difficulty in handling and the possibility of inhalation of detached fibres. One way to solve this problem is to cover the mineral wool with a layer of fabric. This layer can modify the sound absorption coefficient of the ensemble. Shoshani (Shoshani, 1991) studied the possibility that the lining fabric had some effect on the absorption. The result of the work showed that the absorption of the compound structure is significantly higher to that of the nonwoven fabrics by themselves. The highest sound absorption was achieved when

the fabric layer was placed the nearest to the sound source. In that case, the most significant contribution of the fabric to the sound absorption of the compound structure was between 20 to 40% in frequencies below 500 Hz. Chevillotte (Chevillotte, 2012) employed a resistive layer or a perforated plate before a porous material. The resistive layer of glass fibre fabric can be used to improve the sound absorption, but it can reduce this absorption at some frequencies. Sound absorption coefficient over 0,5 is obtained in the frequency range between 700 and 4000 Hz. Segura et al. (Segura Alcaraz, Bonet-Aracil, Segura Alcaraz, & Montava Seguí, 2017), (Segura-Alcaraz, Segura-Alcaraz, Montava, & Bonet-Aracil, 2018) studied the use of different fabrics as acoustic resistive layers over a polyester nonwoven and studied the influence of the fabric thread density concluding that it is possible to improve the acoustic absorption characteristics of the compound structure by choosing the appropriate combination of warp and weft count. Figure 2.1.5 shows the influence in the sound absorption coefficients of fabrics with different thread densities when placed on a nonwoven layer. In this figure, a 15 mm thick polyester nonwoven (which sound absorption coefficient is plotted in a dotted line at the bottom of the image) is covered by a plane weave fabric with different warp (W) and weft (P) densities in yarns/cm. The absorption of the two layered material is modified by changing the count of the fabric.

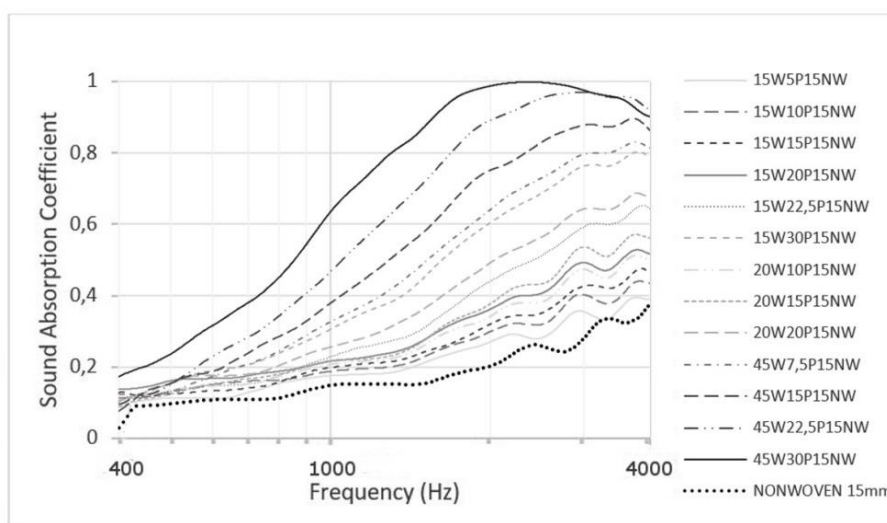


Figure 2.1.5. Sound absorption coefficient of a 15mm layer of polyester nonwoven plus a plain weave fabric of different warp and weft densities. Source: Authors own measurements.

Another possibility is the use of nanofibres to improve the acoustic properties of other textile structure, like in the work of Na et al. (Na, Agnhage, & Cho, 2012) who studied the effect of nanofibres veil layers placed over regular weft knitted fabrics. The effect of

nanofibres increases the sound absorption coefficient up to a maximum of 0,9, between 1000 and 4000 Hz, when increasing the number of veils.

2.1.4 Conclusions

This review shows the different researches and trends in the use of textiles for acoustical conditioning. The possibilities to use textile materials as acoustic absorber are multiple, as seen along this article. Their advantages over traditional acoustic materials are mainly based on the possibility of designing and manufacturing structured materials from microscopic to macroscopic scale.

Summarizing, the research trends in textiles for sound absorption are based in three areas:

- The search of new sustainable fibres. The use of recycled fibres like those obtained from PET bottles, cotton from jeans, jute from coffee or rice sacks. The research on eco-friendly materials, with low production costs, low density, and aesthetic value like natural fibres and crop wastes.
- The study of different woven and knitted structures. The production of two and three-dimensional structures using the nonwovens, weaving, knitting and other textile techniques. The study of different orientation of fibres.
- The development of composite materials by combining layers of different materials. Textile materials can be used in the design of new metamaterials, contributing with flexible, lightweight, thin, fully designable, and repeating structures.

References

- Allard, J., & Champoux, Y. (1992). New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- Allard, J. F., Bourdier, R., & L'Esperance, A. (1987). Anisotropy effect in glass wool on normal impedance in oblique incidence. *Journal of Sound and Vibration*.
- Allard, Jean F., & Atalla, N. (2009). *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*.
- Alonso, A., & Martellotta, F. (2015). The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective. En *22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015*.
- Alonso, Alicia, & Martellotta, F. (2016). Room acoustic modelling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. *Journal of Building Performance Simulation*, 9(5), 469-486.
- Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. *Sound and Vibration*, 12-17. Recuperado de <http://www.sandv.com/downloads/1007croc.pdf>

- Beranek, L. L. (1986). *Acoustics*. Published by the American Institute of Physics for the Acoustical Society of America.
- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94, 840-852.
- Biot, M. A. (1956). Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
- Champoux, Y., & Allard, J. F. (1991). Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics*, 70(4), 1975-1979.
- Chen, Y., & Jiang, N. (2007). Carbonized and Activated Non-wovens as High-Performance Acoustic Materials: Part I Noise Absorption. *Textile Research Journal*, 77(10), 785-791.
- Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73(1), 56-60.
- Cox, T. T. J., & D'antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Psychological Science.
- Cremer, L., Müller, H. A., & Translated by Schultz, T. J. (1982). *Principles and applications of room acoustics. Volume 1*. (Vol. 1). Westport, Connecticut USA: Peninsula Publishing.
- Crocker, J. (1998). *Handbook of acoustics*. Wiley.
- Delany, M. E. E., & Bazley, E. N. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105-116.
- Dias, T., & Monaragala, R. (2006). Sound absorption in knitted structures for interior noise reduction in automobiles. *Measurement Science and Technology*, 17(9), 2499-2505.
- Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72(2-3), 108-114.
- Fuchs, H. (2013). *Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control: Alternative solutions - Innovative tools - Practical examples*. *Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control: Alternative Solutions - Innovative Tools - Practical Examples*.
- Ganesan, P., & Karthik, T. (2016). Development of acoustic nonwoven materials from kapok and milkweed fibres. *Journal of the Textile Institute*.
- Garai, M., & Pompoli, F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*.
- Hanna, Y. I., & Kandil, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*.
- Hull, D. (2003). *Materiales compuestos*. Reverté Ed.
- ISO. (2002). ISO 10534-2. Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method.

- ISO 226:2003. (2003). Acoustics -- Normal Equal- Loudness-Level Contours. *Organisation Internationale de Normalisation (ISO)*.
- ISO 354. (2003). BS EN ISO 354:2003 — Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- Jiang, N., Chen, J. Y., & Parikh, D. V. (2009). Acoustical evaluation of carbonized and activated cotton nonwovens. *Bioresource Technology*, 100(24), 6533-6536.
- Jimenez-Espadafor, F. J., Becerra Villanueva, J. A., García, M. T., Trujillo, E. C., & Blanco, A. M. (2011). Optimal design of acoustic material from tire fluff. *Materials and Design*, 32(6), 3608-3616.
- Johnson, D. L., Koplik, J., & Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*.
- Juliá Sanchis, E. (2008). *Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica*. Riunet. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain).
- Kang, J., & Fuchs, H. V. (1999). Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space. *Journal of Sound and Vibration*, 220(5), 905-920.
- Kino, N., & Ueno, T. (2008). Evaluation of acoustical and non-acoustical properties of sound absorbing materials made of polyester fibres of various cross-sectional shapes. *Applied Acoustics*, 69(7), 575-582.
- Küçük, M., & Korkmaz, Y. (2012). The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites. *Textile Research Journal*, 82(20), 2043-2053.
- Liu, X., Yan, X., & Zhang, H. (2015). Sound absorption model of kapok-based fiber nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 85(9), 969-979.
- Liu, X., Yan, X., & Zhang, H. (2016). Effects of pore structure on sound absorption of kapok-based fiber nonwoven fabrics at low frequency. *Textile Research Journal*, 86(7), 755-764. h
- Liu, Y., & Hu, H. (2010). Sound Absorption Behavior of Knitted Spacer Fabrics. *Textile Research Journal*, 80(18), 1949-1957.
- Long, H. R., & Chen, S. (2015). Effect of structural parameters on the sound absorption properties of warp-knitted spacer fabrics. *Industria Textila*.
- Ma, G., & Sheng, P. (2016). Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons. *Science Advances*.
- Maa, D. Y. (1975). Theory and Design of Microperforated panel sound-absorbing constructions. *Scientia Sinica*.
- McGeown, J. G. (2007). *Physiology : a clinical core text of human physiology with self-assessment*. Churchill Livingstone.
- Mei, J., Ma, G., Yang, M., Yang, Z., Wen, W., & Sheng, P. (2012). Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound. *Nature Communications*.

- Miravete, A. (s. f.). *Materiales compuestos I y II. INO Reproducciones*.
- Na, Y., Agnhage, T., & Cho, G. (2012). Sound absorption of multiple layers of nanofiber webs and the comparison of measuring methods for sound absorption coefficients. *Fibers and Polymers*.
- Nayak, R., & Padhye, R. (2016). *Acoustic Textiles: An Introduction* (pp. 1-32). Springer
- Or, K. H., Putra, A., & Selamat, M. Z. (2017). Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. *Applied Acoustics*.
- Parikh, D. V., Calamari, T. A., Sawhney, A. P. S., Blanchard, E. J., Screen, F. J., Myatt, J. C., Stryjewski, D. D. (2002). Thermoformable Automotive Composites Containing Kenaf and Other Cellulosic Fibers. *Textile Research Journal*, 72(8), 668-672.
- Pieren, R. (2012). Sound Absorption Modelling of Thin, Lightweight Curtains. *Euronoise 2012*, (c), 815-820.
- Ramis, J., Alba, J., Del Rey, R., Escuder, E., & Sanchís, V. J. (2010). Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf. *Materiales de Construcción*.
- Rasmussen, B., & Machinbarrena, M. (s. f.). Building acoustics throughout Europe. Recuperado de <http://www.cost.eu/media/publications/Building-acoustics-throughout-Europe-Volume-1-Towards-a-common-framework-in-building-acoustics-throughout-Europe>
- Recuero López, M. (2000). *Ingeniería acústica*. Paraninfo.
- Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., & Bonet-Aracil, M. (2018). The Use of Fabrics to Improve the Acoustic Absorption: Influence of the Woven Fabric Thread Density over a Nonwoven. *Autex Research Journal*, 18(3), 269-279.
- Segura Alcaraz, M. P., Bonet-Aracil, M., Segura Alcaraz, J. G., & Montava Seguí, I. (2017). Sound absorption of textile material using a microfibrils resistive layer. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Shoshani, Y. K. (1991). Noise absorption by a combination of woven and nonwoven fabrics. *Journal of the Textile Institute*.
- Shoshani, Y., & Rosenhouse, G. (1990). Noise absorption by woven fabrics. *Applied Acoustics*, 30(4), 321-333. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(90\)90081-5](https://doi.org/10.1016/0003-682X(90)90081-5)
- Shoshani, Yakir, & Yakubov, Y. (1999). A Model for Calculating the Noise Absorption Capacity of Nonwoven Fiber Webs. *Textile Research Journal*.
- Shoshani, Yakir, & Yakubov, Y. (2000a). Generalization of Zwikker and Kosten theory for sound absorption in flexible porous media to the case of variable parameters. *Journal of Computational Acoustics*, 08(03), 415-441.
- Shoshani, Yakir, & Yakubov, Y. (2000b). Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs. *Applied Acoustics*, 59(1), 77-87.
- Soltani, P., & Zarrebini, M. (2013). Acoustic performance of woven fabrics in relation to structural parameters and air permeability. *Journal of the Textile Institute*, 104(9), 1011-1016.

- Soltani, P., Zarrebini, M., Zarrebini, M., Soltani, P., & Zarrebini, M. (2012). The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics. *Textile Research Journal*, 82(9), 875-882.
- Stinson, M. R., & Champoux, Y. (1992). Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- Tsai, S. (1988). *Diseño y análisis de materiales compuestos*. Reverté.
- Venegas, R., Stephen Elliott, A., Umnova, U., & Moardman, A. (2014). (3) Interpretación de las propiedades efectivas de metamateriales acústicos (p. 10). Valdivia Chile. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/319101166_Interpretacion_de_las_propiedades_efectivas_de_metamateriales_acusticos
- Wu, Y., Yang, M., & Sheng, P. (2018). Perspective: Acoustic metamaterials in transition. *Journal of Applied Physics*.
- Yang, M., Li, Y., Meng, C., Fu, C., Mei, J., Yang, Z., & Sheng, P. (2015). Sound absorption by subwavelength membrane structures: A geometric perspective. *Comptes Rendus - Mecanique*.
- Yang, M., Ma, G., Wu, Y., Yang, Z., & Sheng, P. (2014). Homogenization scheme for acoustic metamaterials. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 89(6).
- Yang, S., Yu, W., & Pan, N. (2010). Investigation of the sound-absorbing behavior of fiber assemblies. *Textile Research Journal*, 81(7), 673-682.

2.2 Adaptación del artículo: The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven

Artículo publicado en: “Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., & Bonet-Aracil, M. (2018). The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. *Autex Research Journal*, 18(3), 269-280. doi:10.1515/aut-2018-0006”

Abstract

Noise is frequently unnoticed but it is one of the causes of unhealthy for human being reducing peoples´ quality of life. There are many materials which can be considered as acoustic absorbents. Textiles can be used to both improve the acoustic quality of and to decorate the room where they have been placed. In this study, we used some fabrics with 15, 20 and 30 ends/cm and 15, 20, and 30 picks/cm. The acoustic absorption coefficient was measured when the fabric was added as a resistive layer on top of a nonwoven made of polyester fibre. Results evidence that these fabrics can be efficiently used to modify the acoustic absorption of the nonwoven. Sound absorption coefficients measured via impedance tube method show these modifications occur. The results show how it is

possible to improve the acoustic characteristics of a simple nonwoven to obtain sound absorption coefficients close to values of 1, at different frequencies by choosing a fabric with the appropriate combination of warp and weft count.

2.2.1 Introduction

Nowadays noise is considered unhealthy and its presence reduces the quality of life. Thus, it is considered among others a cause of discomfort for human beings. In order to reach as much comfort as possible in rooms different kinds of actuations can be implemented: isolation or conditioning. Some developed countries have published their own standards depending on the activity given to the room, such as NTP 503 (Tajadura-Jiménez, Larsson, Våljamäe, Västfjäll, & Kleiner, 2010), which describes the acoustic comfort for offices and how is it possible to achieve it. In order to obtain the optimal acoustic conditioning, the acoustic energy reflected by the limits of the room must be minimum.

The sound absorption is the phenomenon by which a material or structure absorbs some of the sound energy incident thereon. The term "acoustic material" is used for materials produced specifically to provide high levels of absorption (Arenas & Crocker, 2010).

The use of synthetic vitreous fibre wools like rock wool, glass wool, or slag wool to absorb noise is widely spread in construction or other applications which require acoustic isolation. Handling textiles made of mineral wools like rock wool is directly related with some leakage of those fibres. Furthermore, contact dermatitis can be produced by contamination of the skin by direct, indirect contact, or the deposition of airborne fibres (Lundgren, Moberg, & Lidén, 2014).

Lately, concern about respect for nature has been increasing and the use of environmentally sustainable materials is one of the desirable aspects in design. From this point of view, the polyester fibre-based textiles have some advantages such as:

- Low areal density
- Flexibility and ability to adapt to coat elements of all shapes
- Easy cleaning and durability
- Excellent aesthetic features

The textile materials are more frequently used for acoustic purposes are generally nonwovens known as "wools". There are numerous studies related with the use of these materials (Delany & Bazley, 1970), focused on finding a model of sound propagation through them (Attenborough, 1982), (Yang, Yu, & Pan, 2010) or on describing acoustic properties of nonwovens made of different fibres (Ramis, Alba, Del Rey, Escuder, & Sanchís, 2010), (Chen & Jiang, 2007), (Garai & Pompoli, 2005), and with different physical parameters (Narang, 1995), (Venegas & Umnova, 2016), (Küçük & Korkmaz, 2012). There are also several patents related with the use of nonwovens in sound absorption applications (Patent US2868684A, 1959), (Patent US5512715A, 1993) (Patent US 7757811, 2010), (Patent US8393438B2, 2013).

Since 1949 perforated panels have been used and developed (Zwikker & Kosten, 1949) however, perforated products have been merely used as a coating protector of the fibrous materials (Beranek, 1971), (Beranek, 1971). D.Y. Maa (D. Y. Maa, 1975) introduces the microperforated panels theory. When a material shows the lower size of the perforation it will present the higher resistance to the sound to go through, as a consequence of the energy loss due to viscous effect. They have demonstrated to be the best absorbent resonator despite of showing a range of frequencies not wide enough to be used in practical applications. Lately, new developments were obtained in order to improve the range of absorbed frequencies (Ruiz, Cobo, & Jacobsen, 2011), (Sakagami, Kobatake, Kano, Morimoto, & Yairi, 2011), (Carbajo, Ramis, Godinho, Amado-Mendes, & Alba, 2015), (D.-Y. Maa, 1998), (Jaime Pfretzschner, Cobo, Simón, Cuesta, & Fernández, 2006), (Cobo, Pfretzschner, Cuesta, & Anthony, 2004), (Liu & Herrin, 2010), (Toyoda, Mu, & Takahashi, 2010), (Takahashi & Tanaka, 2002), (Lee, Lee, & Ng, 2005), (Bravo, Maury, & Pinhède, 2012), (Li & Mechefske, 2010). Some of them were patented (US Patent 5700527A, 1997), (Li & Mechefske, 2010), (US Patent 6598701, 2003), (WO Patent 2006021605A1, 2006), (US Patent 2008264720A1, 2008).

One of the disadvantages of using microperforated panels is the cost of performing the micro perforations. With the use of knitted or woven structures, the size, the shape and the number of micro perforations is provided by the construction parameters of the fabric.

Weft knitted fabric used in the manufacture of carpets (Shoshani & Wilding, 1991) and plain knitted fabric (Dias & Monaragala, 2006) have been studied. Warp knitting has the advantage of including in the same structure up to eight layers of different materials, which allows to modify the thickness of the structure (Dias, Monaragala, & Lay, 2007), (Yanping Liu & Hong Hu, 2010).

Woven fabrics are used as aesthetic coating of different acoustic materials. In multilayer porous absorbers the front material has the necessary impedance matching that of air, and the inner layer attenuates the sound wave (Cox & D'antonio, 2009). In 1991, Yakir Shoshani (Y. K. Shoshani, 1991) demonstrated that if a woven fabric of high noise reflection coefficient is joined with a nonwoven of high noise absorption coefficient the contribution of the fabric to the sound absorption of the ensemble is most significant (20-40%) in the lower frequency range ($f < 500$ Hz). In 2012 Fabien Chevillotte (Chevillotte, 2012) published that a layer based on a woven textile screen can control the sound absorption of a porous multilayer made of an upstream resistive layer of glass screen and a downstream porous material of glass wool. Some patents describe an application comprised of a fabric with a nonwoven (US Patent 8322487B1, 2012), (US Patent 8365862, 2013.).

According to Soltani and Zarrebini (Soltani & Zarrebini., 2012), plain weave fabrics absorb sound better than other weaves, due to their higher density, greatest number of yarn inter-sections, shorter free-float length, and severe crimping of yarns in the plain weave. In our project, only plain and its derivative rib weave is used, as this weave provides the highest number of pores per surface unit. Besides, its shorter free-float length increases

the dispersion of the reflected wave and provides the greatest angle of inclination of the side surface for all the threads. This work studies the use of different combinations of a polyester nonwoven and a simple polyester woven fabric for acoustic conditioning. Woven fabrics are commonly added to nonwoven for aesthetics or other reasons. The aim of this paper is focused on the variation a fabric placed on the surface of a nonwoven can produce. We will demonstrate that the fabric acts as a resistive layer on top of the nonwoven and will determine the characteristics for the best combination fabric-nonwoven. The acoustic sound absorption coefficient is measured in a standing wave tube with no air gap behind. The parameters to vary are the thickness of the nonwoven and the fabric ends and picks. This variation will affect to the areal density of the fabric. But the main interest of this work is the variation of size of the obtained micro pores and their influence on the sound absorption of the ensemble. Thus, this will allow optimizing the acoustic conditioning by selecting the right distribution of yarns in the fabric by means of its weave and density.

2.2.2 Experimental

2.2.2.1 Materials

Nonwoven

The nonwoven is obtained by dry-laid method from stapled fibres with thermal bonding by employing some fibres in the mix with a lower melt point.

Table 2.2.1. Properties of nonwoven

Material	Density (g/m ²)	Thickness (mm)	Length of fibres (mm)	Linear density (dtex)
polyester (polyethylene terephthalate, PET)	160	15	63	12,33

Thicknesses of 15, 30 and 45 mm are obtained by overlaying two and three layers of nonwoven, without any gluing method. It is estimated that a total thickness higher than 45 mm is excessive for a realistic use of the assembly. Likewise, it is considered that the most desirable option relates to the minimum use of materials and the minimum thickness.

Fabric

The production of fabrics with different warp densities without making any change in the loom setting is achieved by weaving 2, 3, and 4-ply plain weave types with different balance, as shown in table 2.2.1. Once woven, the different plies are separated for study. This made it possible to obtain fabrics with a variety of warp densities without changing

the loom setting. The fabric is comprised of warp and weft as it is a wave. Warp and weft yarns were made of textured PET polyester. This kind of yarns improves the volume and increases the covering capacity.

Table 2.2.2. Properties of fabric yarns

Yarn	Material	Number of filaments	Yarn count (dtex)	Twist /meter
Warp	polyester (PET)	40	167	200
Weft	polyester (PET)	40	167	200

The production of fabrics with different warp densities without making any change in the loom setting is achieved by weaving 2, 3, and 4-ply plain weave types with different balance. Warp and filling ratio describe how yarns are distributed in each ply, as shown in table 2.2.3. Once woven, the different plies are separated for study. This made it possible to obtain fabrics with a variety of warp densities without changing the loom setting. The fabric is comprised of warp and weft as it is a wave. Warp and weft yarns were made of textured PET polyester. This kind of yarns improves the volume and increases the covering capacity.

Table 2.2.3. Weaving conditions for obtaining plain fabrics.

Type of weave	Number of plies	Warp ratio	Filling ratio	Resultant weave
1	2	1/1	1/1	Plain
2	2	1/3	1/1	Plain and Filling rib
3	3	1/1/1	1/1/1	Plain
4	3	1/1/2	1/1/1	Plain and Filling rib
5	4	1/1/1/1	1/1/1/1	Plain

Fabrics were used as they were obtained from the loom. No finishing or any other treatment was conducted. The weight in each square meter was studied according to the standard EN 12127: 1998. Textiles. Fabrics. Determination of mass per unit area using small samples. Standard deviation was lower than 4.

2.2.2.2 Methods

Fabrics production

A Smit GS 900 weaving machine with 9.600 warp yarns and a reed width of 160 cm, controlled by an electronic Jacquard Stäubli DX-100, was used to weave the fabric specimens used in this project. The filling density is electronically controlled.

Sound absorption coefficient

This research is conducted with the impedance tube method according to the Standard ISO 10534-2: Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Transfer function method. In this method, when a sound wave strikes the material perpendicularly, the measured sound absorption coefficient is known as the normal incidence sound absorption coefficient. It requires an impedance tube (between points 1 and 5 in figure 2.2.1), two microphones (see point 2 in figure 2.2.1) and a digital system for the signal treatment (see points 3 and 4 in figure 2.2.1). Figure 2.2.1 represents the apparatus used to measure the sound absorption coefficient where:

- 1) the sample to test is placed;
- 2) the two microphones (microphones G.R.A.S. model 40AO);
- 3) the data acquisition system (NI-9233);
- 4) the PC and
- 5) the sound source.

The values represented in this study are the average from 3 times. Every sample were measured 3 times for each fabric or for every combination of woven-nonwoven.

Plane waves in the tube are generated by a noise source (see point 5 in figure 2.2.1). And, interferential field decomposition is performed by measuring the sound pressure in two positions using microphones hanged on the wall. Then, the complex acoustic transfer function between the two microphones is calculated and it allows calculating the complex reflection factor of the sample, from which it is obtained the absorption coefficient at normal incidence. Impedance tube is a narrow, rigid and airtight duct which must meet certain characteristics described in the above standard.

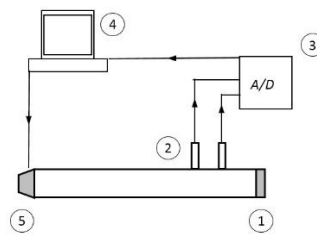


Figure 2.2.1. Scheme of the apparatus used to measure the sound absorption coefficient.

To perform the test, the sample is placed in one end of the impedance tube (see point 1 in figure 2.2.1). The sample should fit snugly to the sample holder without being

compressed or improperly adjusted or so firmly that it is convex. It is possible to use vaseline or interstices sealing wax, grease or cover the entire edge. Plane waves are generated, in the tube by the sound source (see point 5 in figure 2.2.1), and the pressure in two near positions is measured. Using a Matlab function designed for this purpose, the transfer function of the complex acoustic signals at two microphones, used in this case to calculate the absorption coefficient from normal incidence reflection coefficient, is determined. As explained in the above mentioned, ISO 10534-2 standard, this coefficient is determined according to equation 1:

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1} \quad \text{Equation 2.2.1}$$

Where:

r = acoustic reflection coefficient

H_{12} = complex transference function,

H_R = transference function from the reflected wave,

k_0 = complex wavenumber

x_1 = distance between sample and microphone.

Knowing this, then the sound absorption coefficient for normal incidence α can be obtained by the equation 2:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \text{Equation 2.2.2}$$

Image analysis

Nahita Zuzi eyepiece video camera USB 1.3 Mp. Programs Minisee was used to observe the fabrics and ScopePhoto 3.1 to capture, process and analyze images. Three different regions of each fabric were photographed. An area of the same size and position was defined. ScopePhoto allows to adjust color and by means of the tool Histogram, all pixels showing a luminosity under 130 are presumed to be pores and the percentage is directly taken from the screen. Standard deviation is lower than 4.

Specific resistance to air flow

Specific resistance to air flow is determined using the Standard UNE-EN-29053: Materials for acoustical applications; Determination of airflow resistance (ISO 9053). Method: direct-airflow method. This method consists of passing a slow air stream through a specimen and measuring the pressure loss between the two free sides of the specimen. Measurements are done at 5 different airflow velocities and extrapolation to an airflow velocity of 0,5 mm/s. 3 samples of each combination are measured.

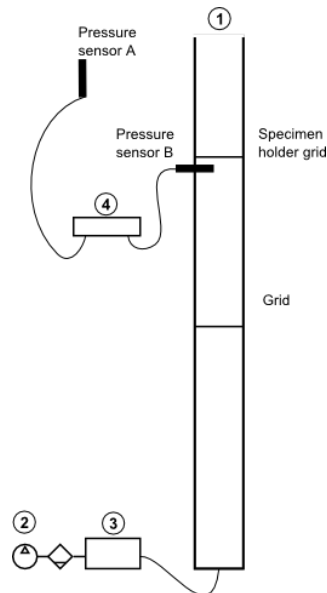


Figure 2.2.2. Scheme of the instruments used for specific resistance to air flow

Figure 2.2.2. Shows the scheme of the instrument for specific resistance to air flow where:

- 1) Measuring cell inside where the specimen is placed
- 2) Airstream production device
- 3) Air volume flow rate measuring unit
- 4) Differential pressure measuring device from upstream to downstream the specimen

The inner diameter of the cell is 101 mm. The specimen to test (fabric or fabric + nonwoven) is placed on a perforated grid (see label “specimen holder grid” in figure 2.2.2) at a height of 850 mm from the air entrance (at the bottom of the tube in figure 2.2.2) to allow passage of a laminar and unidirectional air flow through the specimen. A pneumatic compressor is used for the production of airflow compressor (see point 2 figure 2.2.2). The air flow rate should be less than $0,5 \times 10^{-3}$ m/s.

2.2.3 Results and discussion

2.2.3.1 Sound absorption from fabrics

Once the fabrics had been woven, they were characterised. Tables 4, 5 and 6 summarise the characteristics of the developed fabrics used at the present study, and the different appearance of the fabrics can be noticed. According to what should be expected, it can be observed that the higher number of ends or picks, the higher areal density (g/m^2), and

the open area (%) is slightly reduced. Furthermore, a considerable increase on the resistance to the air flow is appreciable. Figure 2.2.3, shows the fabric with different number of picks and 15 ends, whereas figure 2.2.4 is related with fabrics with 30 ends and figure 2.2.5 shows fabrics with 45 ends.

Table 2.2.4. Characteristics of fabrics with 15 warp/cm

WARP DENSITY (ends/cm)		15
WEFT DENSITY (picks/cm)	WEAVE	Plain
10	NAME	15end10pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	44,05
	OPEN AREA (%)	33,25
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	10
15	NAME	15end15pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	52,47
	OPEN AREA (%)	32,07
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	17
20	NAME	15end20pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	61,73
	OPEN AREA (%)	31,50
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	38

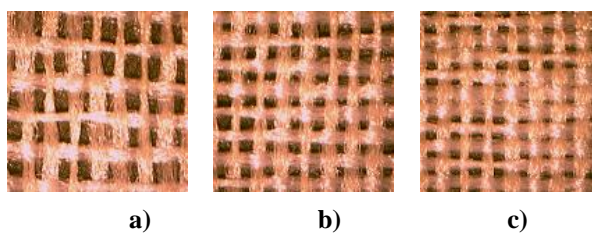



Figure 2.2.3; Fabrics with 15 ends. a) 10 picks; b) 15 picks; c) 20 picks

Table 2.2.5. Characteristics of fabrics with 30 warp/cm

WARP DENSITY (ends/cm)		30
WEFT DENSITY (picks/cm)	WEAVE	Rib
		
10	NAME	30end10pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	71,43
	OPEN AREA (%)	30,70
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	56
15	NAME	30end15pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	81,30
	OPEN AREA (%)	24,84
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	61
20	NAME	30end20pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	90,83
	OPEN AREA (%)	20,10
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	94

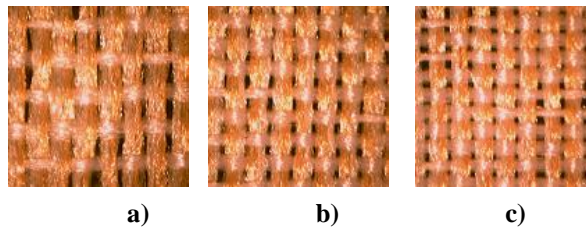



Figure 2.2.4; Fabrics with 30 ends. a) 10 picks; b) 15 picks; c) 20 picks

Table 2.2.6. Characteristics of fabrics with 45 warp/cm

WARP DENSITY (ends/cm)		45
WEFT DENSITY (picks/cm)	WEAVE	Rib 
	NAME	45end7,5pick
7,5	AREAL DENSITY (g/m ²)	111,82
	OPEN AREA (%)	6,10
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	99
15	NAME	45end15pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	116,88
	OPEN AREA (%)	7,10
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	105
22,5	NAME	45end22,5pick
	AREAL DENSITY (g/m ²)	131,15
	OPEN AREA (%)	3,5
	SPECIFIC RESISTANCE TO AIR FLOW (Pa·s/m)	155

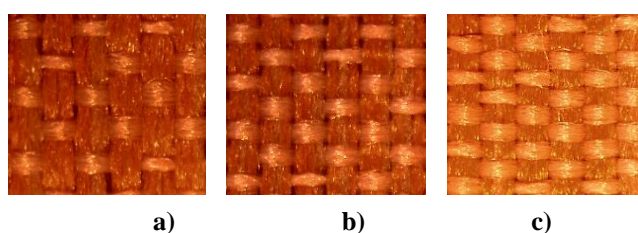


Figure 2.2.5; Fabrics with 45 ends. a) 10 picks; b) 15 picks; c) 20 picks

Once the fabrics have been characterised, it is important to establish which the sound wave behaviour is when passing throughout the different fabrics and if they can influence the nonwoven absorption. Consequently, the fabrics are placed on the top of the nonwoven, the essayed combinations of fabric and nonwoven are as shown in figure 2.2.6:

1) One layer of every fabric tested one by one. (see figure 2.2.6a)

2) One layer of fabric plus one layer of nonwoven, being the fabric layer on the side of the sound source. (see figure 2.2.6b, 2.2.6c and 2.2.6d).

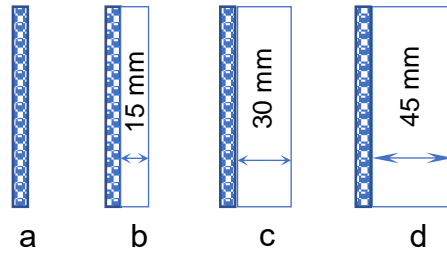


Figure 2.2.6. Scheme of fabric + nonwoven combinations. a) Fabric, b) fabric +nonwoven 15 mm thick. c) fabric +nonwoven 30 mm thick. d) fabric +nonwoven 45 mm thick.

An analysis of variance (ANOVA) is performed to determine if the factors A: warp density, B: pick density, and C: thickness have a significant effect on the Sound Absorption Coefficient (SAC) of the material. Being all P-values less than 0.05, the considered factors have significant effects in the absorption of the material at all frequencies, with a 95% of confidence.

Sound absorption of every fabric was measured. Figures 2.2.7 to 2.2.9 show results of the absorption coefficient in the range comprised between 400 and 4000 Hz when the fabric is tested without any nonwoven (see figure 2.2.6a). Plain fabrics with 15, 30 and 45 ends/cm and with weft densities, as shown in tables 2.2.4, 2.2.5, and 2.2.6, have been studied.

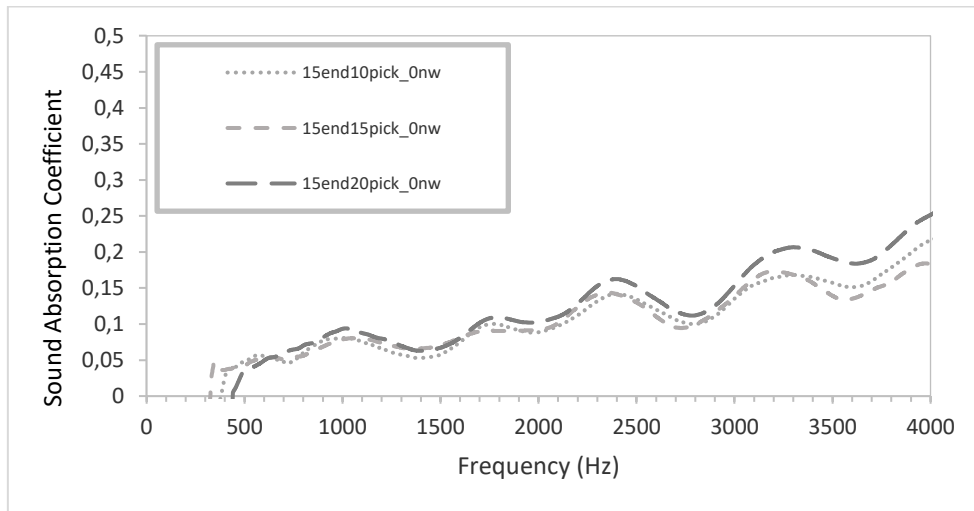


Figure 2.2.7. Sound absorption coefficient of 15 ends/cm plain fabrics

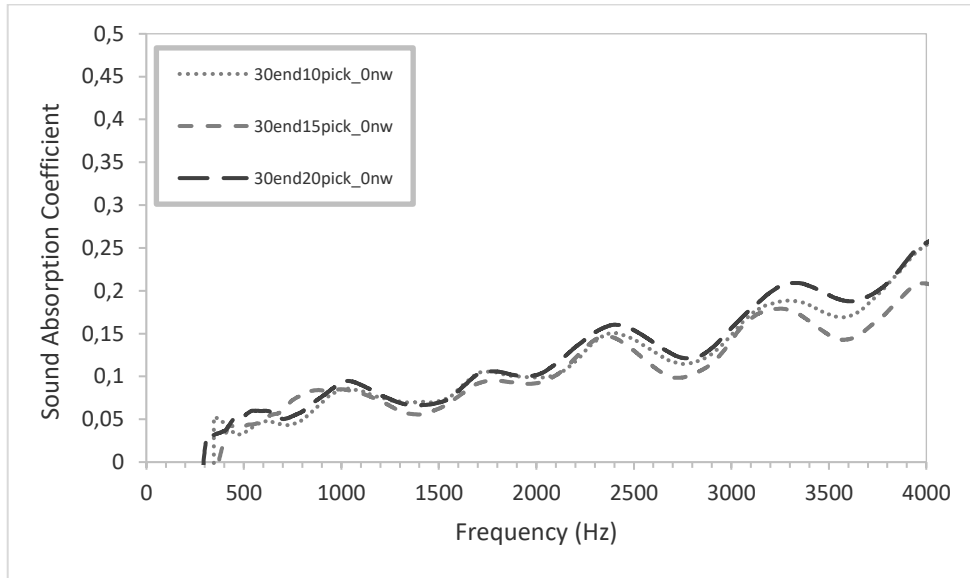


Figure 2.2.8. Sound absorption coefficient of 30 ends/cm plain fabrics

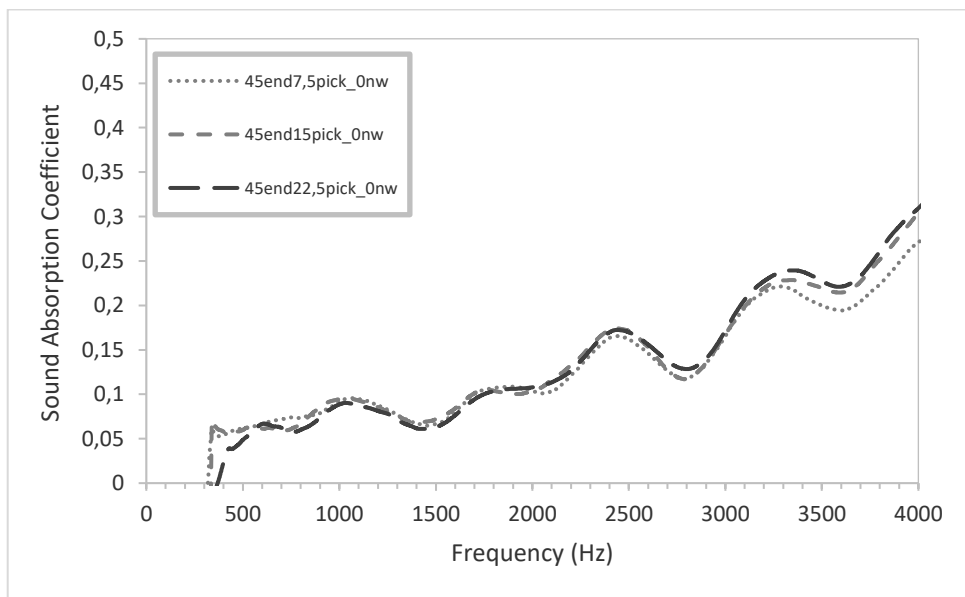


Figure 2.2.9. Sound absorption coefficient of 45 ends/cm plain fabrics

It is clearly observed that absorption coefficient is modified by the variation of ends and picks counts. Regardless the number of ends or picks, sound absorption begins to increase around 1000 Hz until 4000 Hz. Apart from the region in which the sound absorption begins to increase, a common behaviour is appreciated in all the figures (figures 2.2.7-2.2.9). The higher number of picks, the higher absorption. The highest value is reached when the fabric is comprised of 45 ends/cm. Thus, as it should be expected, the best fabric would be the one made of 45 ends and 22,5 picks.

Nevertheless, if it is desired to obtain a good absorbent material, the absorption coefficient must be higher than 0,5 (Crocker, 1998) and it can be clearly noticeable that the results showed do not end up reaching those values. Consequently, a nonwoven structure has been added in order to study as in Chevillotte (Chevillotte, 2013), if the fabrics can improve the results. Chevillotte studied the influence of a woven screen on a porous multilayer made of glass wool. As mentioned in the introduction, nonwovens are widely used for acoustic purposes. In our case, we choose a simple and conventional nonwoven made of polyester with a low absorption coefficient, which was not considered as an acoustic material in order to combine it with a polyester fabric and to study if results may transform it into a sound absorbing material.

2.2.3.2 Sound absorption including nonwoven

Absorption coefficient has been studied for nonwovens of different thickness (15 mm, 30 mm and 45 mm) and even with an empty tube. Figure 2.2.10 evidences that there is a resonant effect on the empty tube. Analysing results considering the absorption effect, it can apparently be said that, it is only the nonwoven with 45 mm the one which shows an absorption coefficient between 0.5 and 0.6 at frequencies higher than 650 Hz. This is because it is not a material specifically designed for sound absorption.

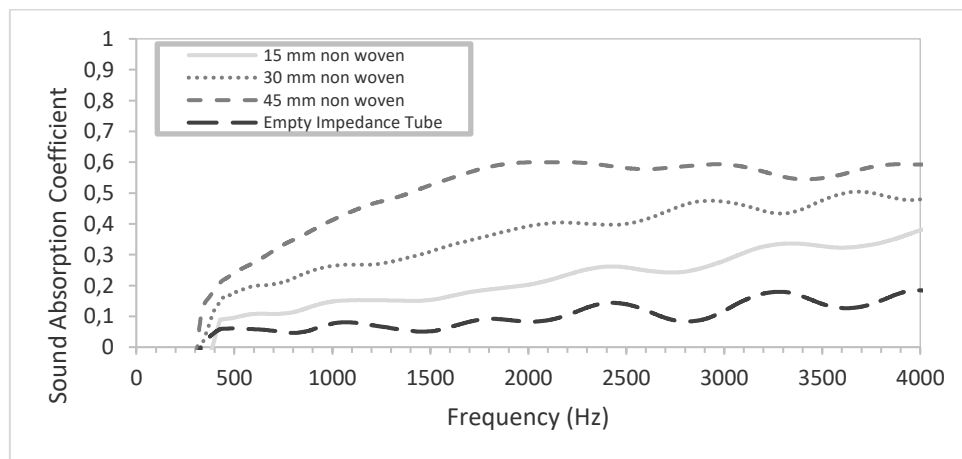


Figure 2.2.10. Sound absorption coefficient of the used non-woven at different layer thicknesses

Fabric and 15 mm nonwoven thickness

This part of the test has been conducted with a fabric placed upstream the sound source on a 15 mm thick nonwoven layer (as combination in figure 2.2.6b). Then, absorption coefficients were measured in the range of frequencies between 400 and 4000 Hz. Three fabrics were used with different ends 15, 30 and 45, figures 2.2.11 to 2.2.13 show results respectively.

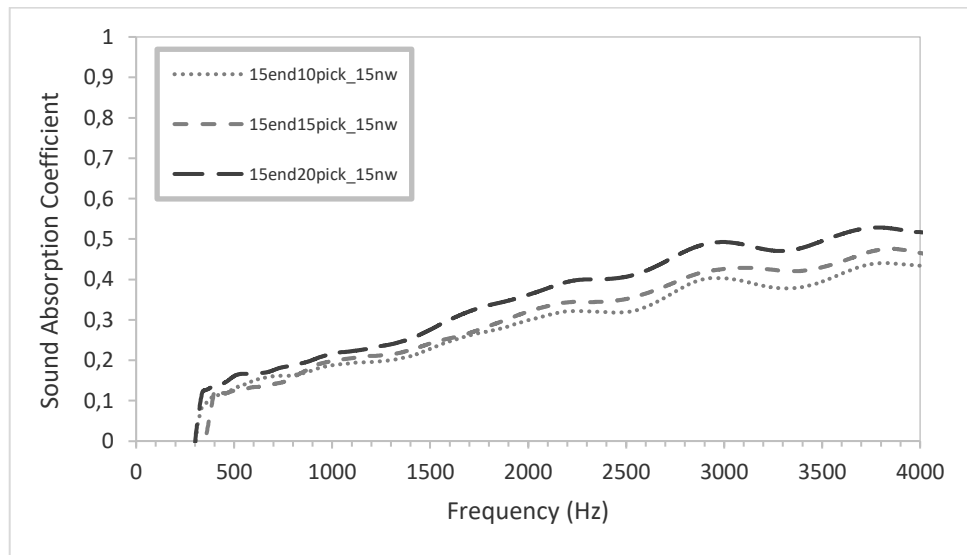


Figure 2.2.11. Sound absorption coefficient of 15 ends/cm plain fabrics added to a 15 mm non-woven layer

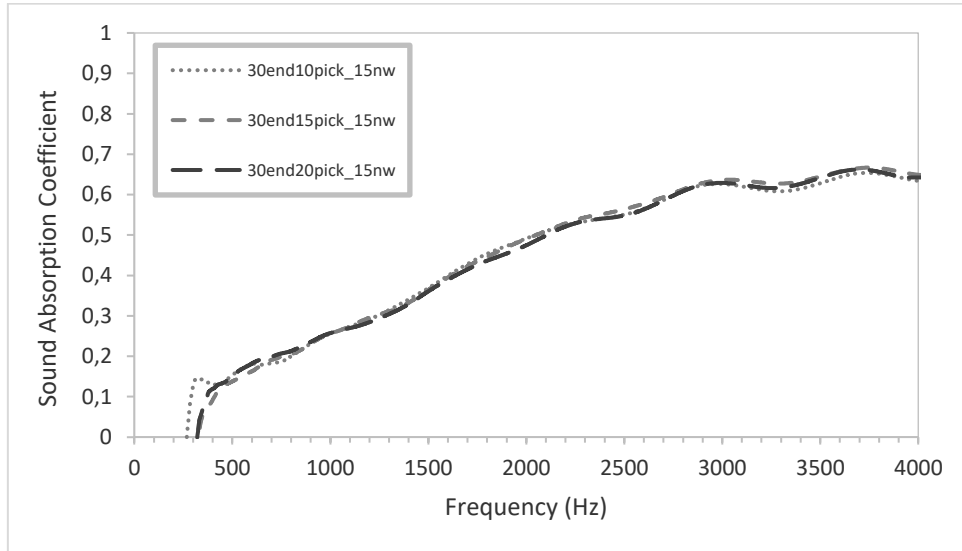


Figure 2.2.12. Sound absorption coefficient of 30 ends/cm plain fabrics added to a 15 mm non-woven layer

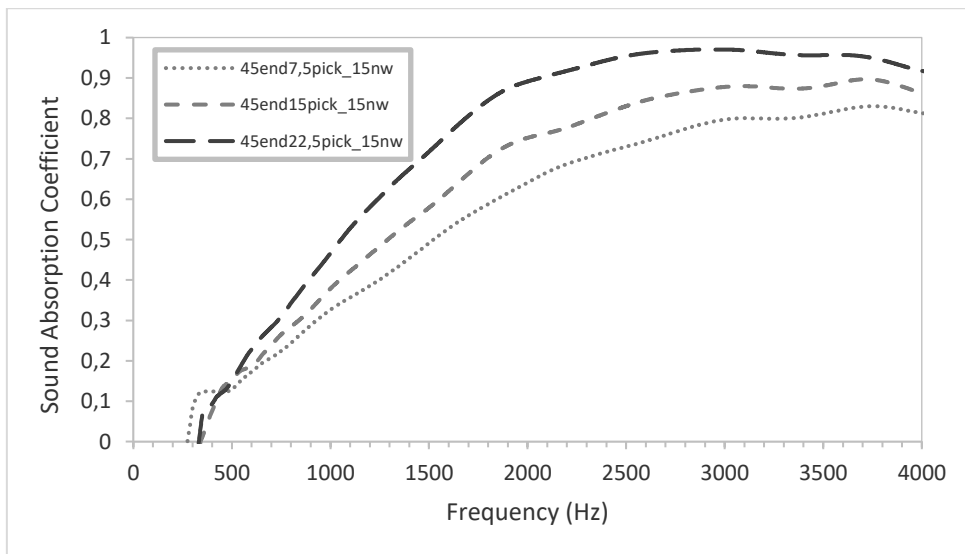


Figure 2.2.13. Sound absorption coefficient of 45 ends/cm plain fabrics added to a 15 mm non-woven layer

It is clearly observed from figures 2.2.11-2.2.13 that the initial absorption of the nonwoven is modified by the presence of a fabric on its surface.

In Figure 2.2.11, we can highlight the 15end30pick fabric that raises the sound absorption coefficient over 0.5 at frequencies around 1623.5 Hz and higher.

In Figure 2.2.12, it is shown how three fabrics with 30 ends/cm and 10,15 and 20 picks/cm have a very similar effect on sound absorption. This means that densities of picks higher than 10 picks/cm have no influence on the sound absorption for fabrics with 30 ends.

In Figure 2.2.13, fabrics with 45 ends/cm shows a noticeable increase in the absorption when the frequency is higher than 900 Hz. For instance, the 45end22,5pick fabric reaches a sound absorption coefficient of 0,5 at 1060 Hz and above, reaching a maximum of 0,97 at 2980 Hz.

Another effect of the increase of warp and weft density that is visible in Figure 2.2.7 is the decreasing of the frequency at which the maximum absorption is obtained.

Fabric and 30 mm nonwoven thickness

In this part of the test, a second nonwoven is added. Consequently, the distance to the end of the standing tube is doubled to 30 mm (as combination in figure 2.2.6c) instead of 15 mm, and the fabrics are located on the upper side nearest to the sound source.

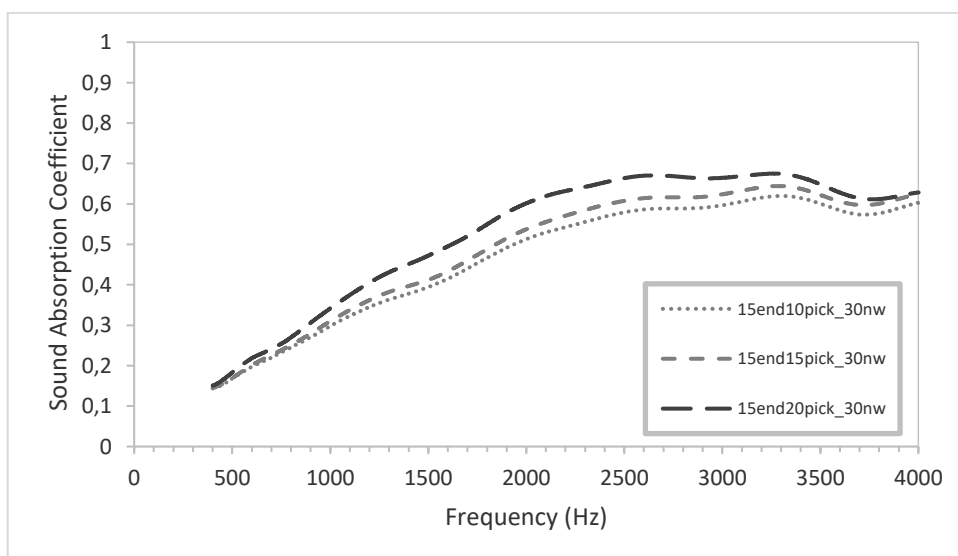


Figure 2.2.14. Sound absorption coefficient of 15 ends/cm plain fabrics added to a 30 mm non-woven layer

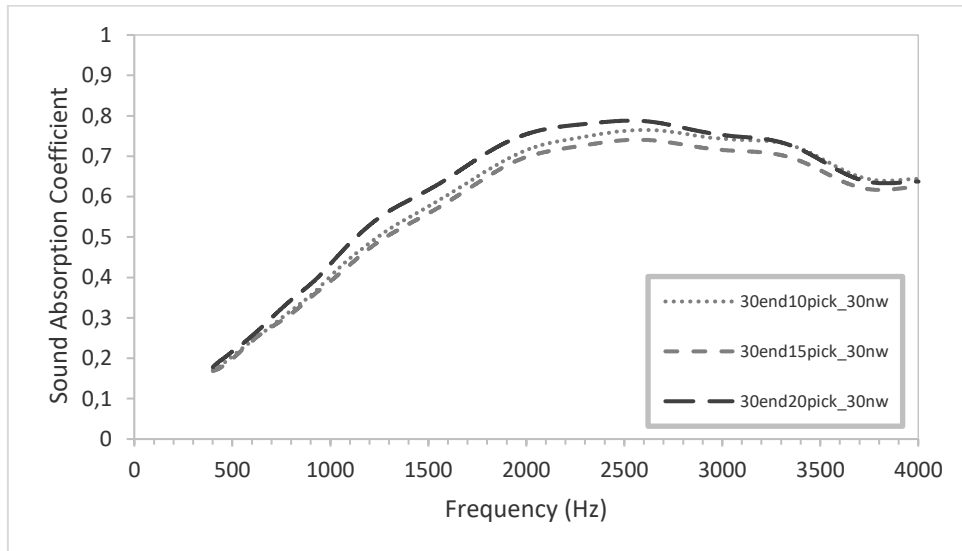


Figure 2.2.15. Sound absorption coefficient of 30 ends/cm plain fabrics added to a 30 mm non-woven layer

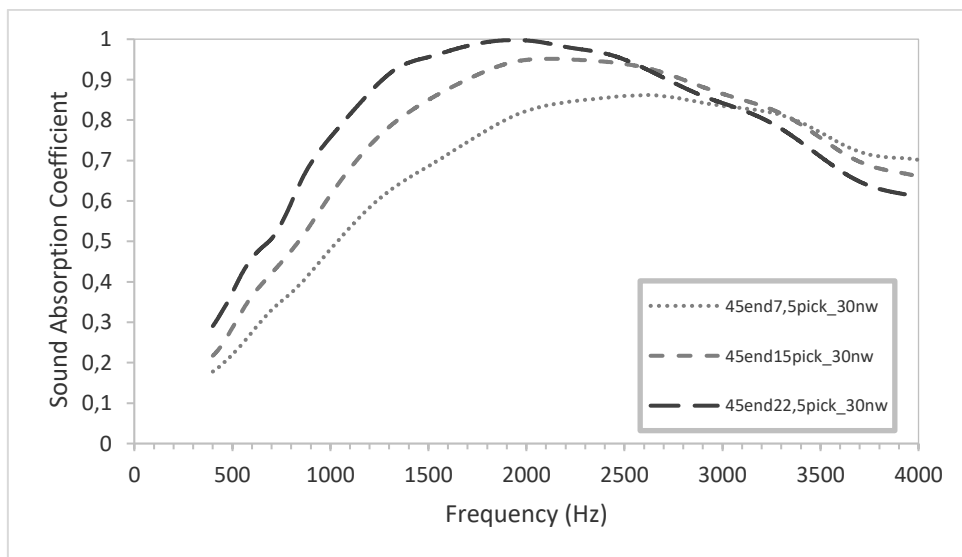


Figure 2.2.16. Sound absorption coefficient of 45 ends/cm plain fabrics added to a 30 mm non-woven layer

As it could be expected, an increase in the width on the nonwoven an increase in the absorption coefficient is reached, and the frequency for the maximum absorption is reduced.

In Figure 2.2.14, it can be observed that with the fabric 15end30pick, the 30 mm nonwoven can achieve a sound absorption coefficient over 0.5 from a frequency around 1088 and above. In figures 2.2.14, 2.2.15 and 16 this value is reached by all the fabrics at lower frequencies than that. For instance, as it could be observed in figure 2.2.16, the sample 45end22,5pick plus 30 mm nonwoven reaches it at 687 Hz, what makes it suitable to be considered as a sound absorber.

When considering the fabric with 15 ends/cm, the one with 20 picks/cm is the one with higher absorption even with one or two nonwovens. However, when two nonwovens are tested (30 mm), a considerable absorption at 500 Hz can be observed if compared with one nonwoven (15 mm). It must be noticeable that it is the fabric with 45 picks/cm the one that offers an important increase from 500 Hz.

In Figure 2.2.15, we can observe how the 30end10pick fabric added on a 30mm nonwoven shows better results than 30end15pick fabric.

Fabric and 45 mm nonwoven thickness

Finally, a third nonwoven is added to obtain 45 mm width (as combination in figure 2.2.6d). Figures 2.2.17, 2.2.18 and 2.2.19 show results for sound absorption when the fabric on the upper surface is made of 15, 30 and 45 ends/cm respectively.

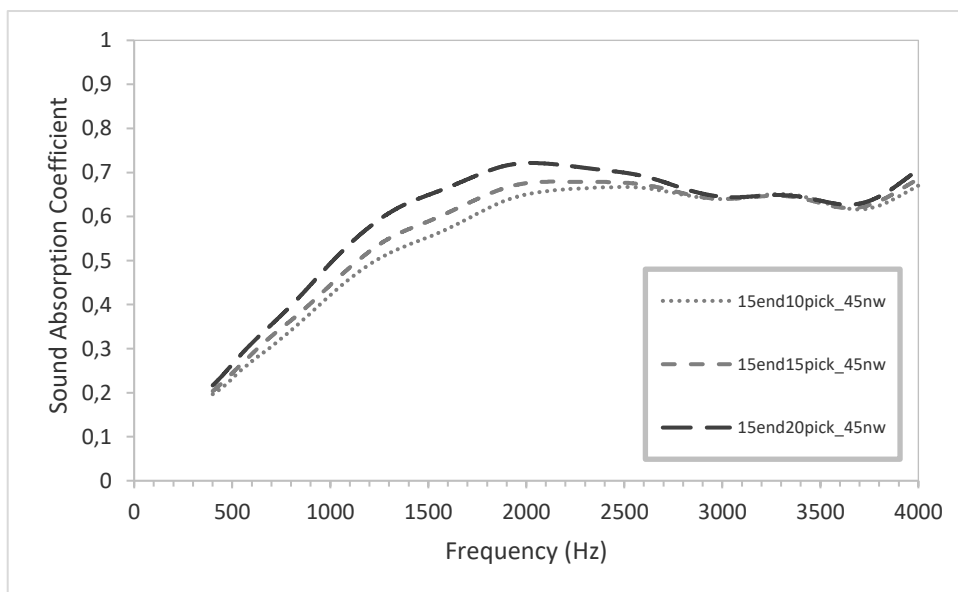


Figure 2.2.17. Sound absorption coefficient of 15 ends/cm plain fabrics added to a 45 mm non-woven layer

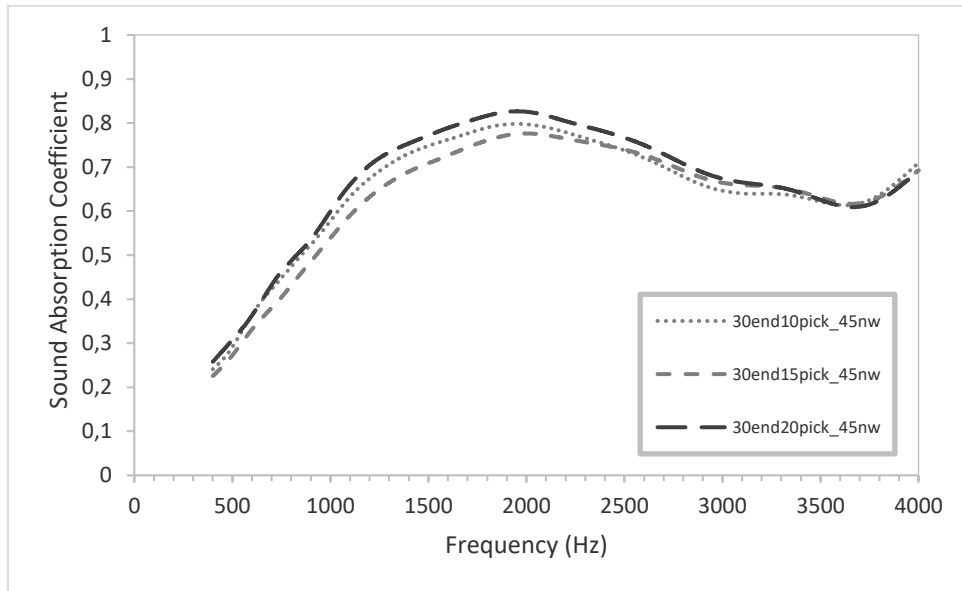


Figure 2.2.18. Sound absorption coefficient of 30 ends/cm plain fabrics added to a 45 mm non-woven layer

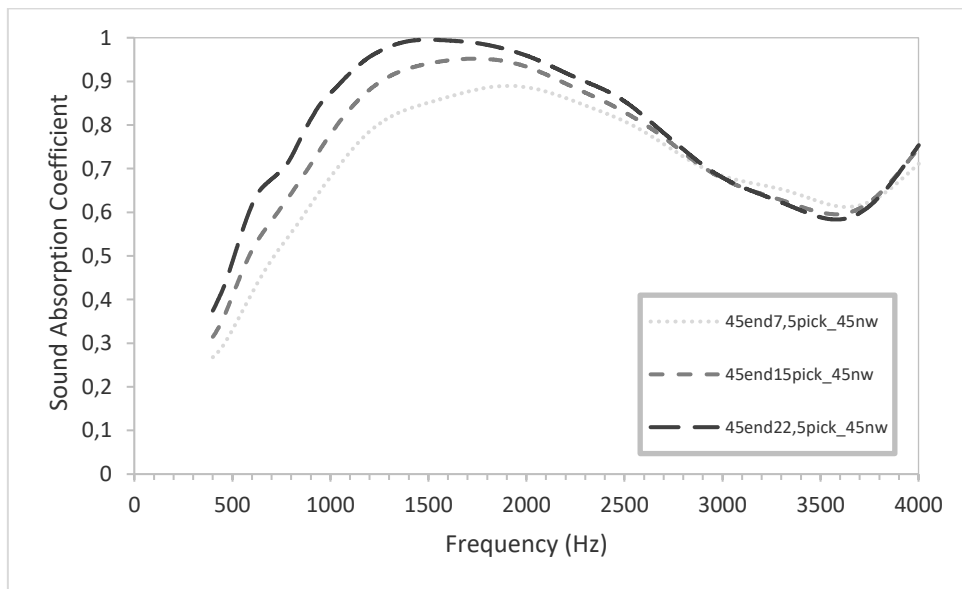


Figure 2.2.19. Sound absorption coefficient of 45 ends/cm plain fabrics added to a 45 mm non-woven layer

Results show that structures with 45 mm offer significant values for frequencies higher than 500 Hz for almost every fabric. The worst case is 15end10pick_45NW that reaches this value from 1233 Hz and above.

In Figure 2.2.18, we can observe how the 30end10pick fabric, added on a 45mm nonwoven, shows better results than 30end15pick fabric, the gap between all the fabrics is not considerably tough.

When comparing the three figures with 45 ends/cm, regarding the nonwoven thickness (figure 2.2.13 (15 mm), figure 2.2.16 (30 mm) and figure 2.2.19 (45 mm), it can be clearly observed that a tendency to decrease the sound absorption is observed at high frequencies, mainly for higher thicknesses.

Moreover, if figures 2.2.12, 2.2.15 and 2.2.18 are compared, all of them show differences in sound absorption for fabrics with different ends. However, the gap is not so significant between the different fabrics. This could be due to the fact, that the number of ends has average value (30 ends). Any change on the number of picks does not alter considerably the pore size and consequently the sound absorption is not modified substantially. Fabrics with 15 or 45 ends will define a rectangle pore size due to the irregular presence of yarns distributed on the warp and eft direction whereas fabrics with 30 ends, will define a square pore and not many differences are observed.

Analysis form table 2.2.4, 2.2.5 and 2.2.6 shows how the higher number of ends deals in a reduction in open area and increases the specific resistance to air flow. Table 2.2.7 shows the frequencies at which sound absorption coefficient reaches the value 0,5.

Table 2.2.7. Frequencies at which sound absorption coefficient equals or exceeds 0,5.

Fabric	Frequencies (Hz)		
	15mm nonwoven	30mm nonwoven	45mm nonwoven
15end10pick	Not achieved	1938-4000	1233-4000
30end10pick	2047-4000	1243-4000	852-4000
15end15pick	Not achieved	1846-4000	1143-4000
30end15pick	2051-4000	1284-4000	929-4000
45end7,5pick	1523-4000	1036-4000	714-4000
45end15pick	1291-4000	839-4000	586-4000
15end20pick	3528-4000	1622-4000	1014-4000
30end20pick	2106-4000	1133-4000	829-4000
45end22,5pick	1053-4000	687-4000	510-4000

Analysis from table 2.2.7 shows there is an influence in the number of picks and ends and the sound absorption. The higher density of yarns in the fabric the frequencies at which absorption coefficient equals 0,5, shifts to lower frequencies improving the acoustic absorption.

2.2.4 Conclusions

In this manuscript, the sound absorption coefficient has been measured between 400 and 4000 Hz. In order to determine the fabric structure influence, some plain fabric with different warp and weft densities have been located on a nonwoven with different thicknesses (15, 30 and 45 mm).

This work agrees with the statements of Cox and D'Antonio (Cox & D'Antonio, 2009) that the mass effect of the pores increases the absorption at lower frequencies with the addition of a layer of fabric to a nonwoven. The use of fabric pores with different sizes and shapes, and thus with different thermal and viscous effects influence the sound propagation in different ways, changing the absorption of the set. The results show an interaction between the nonwoven and the fabric, resulting in an advantageous combination of the thermal effects of the nonwoven and the resonant effects of the fabric. Besides, these effects are present for the three different thicknesses of nonwoven studied.

It has been proved that there is no significant variation but slightly, on the sound absorption coefficient when they are used without any other structure. However, when combined with nonwovens, the same tendency is observed but the coefficient obtained is higher.

The higher absorptions have been observed for the maximum warp and weft densities studied. When density is increased, two behaviours are observed: On the one hand, the fabric's density is increased. On the other hand, the size and number of pores in the fabric are reduced. Both of them could be the main cause for the variation in the sound absorption coefficient.

When fabrics are used as a resistive layer, a considerable reduction on the frequency of maximum resonance is observed. It decreases from 4000 Hz for nonwoven with 15 mm to 500 Hz in higher density fabrics and 45 mm of nonwoven. This is partially due to the increase in the distance to the rigid wall as the width has increased. Nevertheless, when there is no fabric for the same width, the frequency at the maximum absorption is not lower than 800 Hz.

It is remarkable that 45 mm in width offer important absorptions at low frequencies regardless of the fabric used except the ones with very low densities. Those fabrics with so few densities are so slight that their production is not widely spread and they are not easy to obtain, though they have been used in the experiment merely to determine the yarns density influence.

Fabrics with lower densities and thus bigger pores do not modify the absorptive behaviour of the nonwoven very much. This is the effect of the variation of characteristics of

the fabric. This way we can graphically see the difference in sound absorption caused basically by a variation in the warp and weft densities

The combination of unequal densities in warp and weft causes the formation of slits instead of square shaped pores. These slits are at two levels: at the weave scale, and also, as the employed yarn is multifilament, at a filament scale. These filaments can also be considered as small strings that vibrate more easily when the float is longer. This effect is not always present.

Another important practical implication from this study is that there is a considerable advantage in reaching the maximum resonance at lower frequencies when placing the fabric on the top of the nonwoven. This fact is substantially important as the lower frequencies cannot be easily isolated and materials selected in this study are easy to get and not expensive.

The contribution of this findings appears to be considerably important so that future studies would be conducted in order to determine how the structural parameters in a textile fabric could improve the sound absorption efficiency. It can be interesting as textile structures could be considered for acoustic purposes mainly if decoration is an important issue to consider.

References

- Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. *Sound and Vibration*, 12-17. Recuperado de <http://www.sandv.com/downloads/1007croc.pdf>
- Attenborough, K. (1982). Acoustical characteristics of porous materials. *Physics Reports*, 82(3), 179-227.
- Beranek, L. (s. f.). *Noise and vibration control*. 1971.
- Bravo, T., Maury, C., & Pinhède, C. (2012). Vibroacoustic properties of thin micro-perforated panel absorbers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(2), 789-798.
- Carbajo, J., Ramis, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P., & Alba, J. (2015). A finite element model of perforated panel absorbers including viscothermal effects. *Applied Acoustics*, 90, 1-8.
- Chen, Y., & Jiang, N. (2007). Carbonized and Activated Non-wovens as High-Performance Acoustic Materials: Part I Noise Absorption. *Textile Research Journal*, 77(10), 785-791.
- Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73(1), 56-60.
- Coates, M., Kierzkowski, M., PJ Gibbons (2013), US Patent 8365862, *Sound absorption material and method of manufacturing sound absorption material*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Cobo, P., Pfreundtner, J., Cuesta, M., & Anthony, D. K. (2004). Hybrid passive-active

- absorption using microperforated panels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(4), 2118-2125.
- Cox, T. T. J., & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Psychological Science.
- Crocker, M. J. (1998). *Handbook of acoustics*. John Wiley & Sons.
- Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105-116.
- Dias, T., & Monaragala, R. (2006). Sound absorption in knitted structures for interior noise reduction in automobiles. *Measurement Science and Technology*, 17(9), 2499-2505.
- Dias, T., Monaragala, R., & Lay, E. (2007). Analysis of thick spacer fabrics to reduce automobile interior noise. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 1979-1991.
- Fox, A. R., Olson, D. A., Moore, E. M., Berrigan, M. R., Nelson, D. L., Eaton, B. W., & Mahoney, W. S. (2010) U.S. Patent 7757811 B2 *Multilayer articles having acoustical absorbance properties and methods of making and using the same*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Also published as: EP1945445A1, EP1945445A4, US7691168, US20080230309, US20100043639 and WO2007047263A1
- Fuchs, H. (1997). . U.S. Patent 5700527A *Sound absorbing glass building component or transparent synthetic glass building component*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Garai, M., & Pompoli, F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*.
- Hanna, Y. I., & Kandil, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*.
- Kang, J., & Fuchs, H. V. (1999). Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space. *Journal of Sound and Vibration*, 220(5), 905-920.
- Küçük, M., & Korkmaz, Y. (2012). The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites. *Textile Research Journal*, 82(20), 2043-2053.
- Labino, D. (1959). US Patent 2868684A.. *Decorative acoustical materials*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Lee, Y. Y., Lee, E. W. M., & Ng, C. F. (2005). Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 287(1-2), 227-243.
- Li, G., & Mechefske, C. K. (2010). A comprehensive experimental study of micro-perforated panel acoustic absorbers in MRI scanners. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 23(3), 177-185.
- Liu, J., & Herrin, D. W. (2010). Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity. *Applied Acoustics*, 71(2), 120-127.
- Lundgren, L., Moberg, C., & Lidén, C. (2014). Do insulation products of man-made vitreous

- fibres still cause skin discomfort? *Contact Dermatitis*, 70(6), 351-360.
- Maa, D.-Y. (1998). Potential of microperforated panel absorber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 2861-2866.
- Maa, D. Y. (1975). Theory and Design of Microperforated panel sound-absorbing constructions. *Scientia Sinica*.
- Narang, P. P. (1995). Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 45(4), 335-358.
- Nonogi, M., Sasaki, M., & Noro, T. (2013). US Patent 8573358. *Multilayer sound absorbing structure comprising mesh layer*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ogawa, M., Fujii, M., Mizutani N. (2013). US Patent 8393438B2, *Sound absorbing material, multilayer sound absorbing material, molded product of multilayer sound absorbing material, sound absorbing interior material, and sound absorbing floor covering material*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Also published as: B2CA2739408A1, CN102089802A, EP2333766A1, EP2333766A4, EP2333766B1, US20110186381, WO2010038486A1, WO2010038491A1.
- Petersen, O., Vigran, T. E. (2008). US Patent 2008264720A1, *Sound Absorbent*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Pfretzschner, J, Cobo, P., & Simón, F. (2006). WO2006021605A1 *Insertion units which are microperforated for use as sound absorbers*, WIPO Oficina Internacional.
- Pfretzschner, Jaime, Cobo, P., Simón, F., Cuesta, M., & Fernández, A. (2006). Microperforated insertion units: An alternative strategy to design microperforated panels. *Applied Acoustics*, 67(1), 62-73.
- Pieren, R. (2012). Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Textile Research Journal*, 82(9), 864-874.
- Pradipkumar, B., Dale, K., & Thompson, G. (2012). US Patent 8322487B1 *Acoustically coupled non-woven composite*, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ramis, J., Alba, J., Del Rey, R., Escuder, E., & Sanchís, V. J. (2010). Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf. *Materiales de Construcción*.
- Ruiz, H., Cobo, P., & Jacobsen, F. (2011). Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing. *Applied Acoustics*, 72(10), 772-776.
- Sahnoune, F. (2013). WO2013007908A1. *Textile layer capable of absorbing sound waves*, WIPO Bureau International.
- Sakagami, K., Kobatake, S., Kano, ichi, Morimoto, M., & Yairi, M. (2011). Sound absorption characteristics of a single microperforated panel absorber backed by a porous absorbent layer. *Acoustics Australia* (Vol. 39). Recuperado de http://www.acoustics.asn.au/journal/2011/2011_39_3_Sakagami.pdf
- Shoshani, Y. K. (1991, enero). Noise absorption by a combination of woven and nonwoven fabrics. *Journal of the Textile Institute*.

- Shoshani, Y., & Rosenhouse, G. (1990). Noise absorption by woven fabrics. *Applied Acoustics*, 30(4), 321-333.
- Shoshani, Y. Z., & Wilding, M. A. (1991). Effect of Pile Parameters on the Noise Absorption Capacity of Tufted Carpets. *Textile Research Journal*, 61(12), 736-742.
- Soltani, P., & Zarrebini, M. (2012). The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics. *Textile Research Journal*, 82(9), 875-882.
- Tajadura-Jiménez, A., Larsson, P., Våljamäe, A., Västfjäll, D., & Kleiner, M. (2010). When Room Size Matters: Acoustic Influences on Emotional Responses to Sounds. *Emotion*, 10(3), 416-422.
- Takahashi, D., & Tanaka, M. (2002). Flexural vibration of perforated plates and porous elastic materials under acoustic loading. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(4), 1456-1464.
- Takewa et al. (1996). US Patent 5512715A. *Sound absorber*, U.S. Patent 5 512 715, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Tisseyre, A., & Mouraret, D. (2011). US Patent 7976946. *Sound absorbing fabric*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Toyoda, M., Mu, R. L., & Takahashi, D. (2010). Relationship between Helmholtz-resonance absorption and panel-type absorption in finite flexible microperforated-panel absorbers. *Applied Acoustics*, 71(4), 315-320.
- Venegas, R., & Umnova, O. (2016). Influence of sorption on sound propagation in granular activated carbon. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(2), 755-766.
- Villamil, H. L. R., Cobo, P., Dupont, T., & Leclaire, P. (2012). Acoustic properties of perforated plates and screens plate. *Acoustics 2012*, (April), 79-84. Recuperado de
- Wood, K., & Martinson, P. (2003). US Patent 6598701. *Shaped microperforated polymeric film sound absorbers and methods of manufacturing the same*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Yang, S., Yu, W., & Pan, N. (2010). Investigation of the sound-absorbing behavior of fiber assemblies. *Textile Research Journal*, 81(7), 673-682.
- Yanping Liu, & Hong Hu. (2010). Sound Absorption Behavior of Knitted Spacer Fabrics. *Textile Research Journal*, 80(18), 1949-1957.
- Zwikker, C., & Kosten, C. (1949). *Sound absorbing materials*. Elsevier, New York

2.3 Adaptación del artículo: The effect of the combination of multiple woven fabric and nonwoven on acoustic absorption

Artículo publicado en: “Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., & Bonet-Aracil, M. (2019). The effect of the combination of multiple woven fabric and nonwoven on acoustic absorption. *Journal of Industrial Textiles*, 1528083719858771. doi:10.1177/1528083719858771”.

Abstract

Textile materials can be used as acoustic materials. In this study, the acoustic absorption coefficient of multi-layer fabrics with 60 ends/cm and 15, 30, 45 and 60 picks/cm is measured when the fabric is added as a resistive layer on top of a polyester nonwoven, in order to study the influence of the fabric spatial structure in the acoustic absorption of the assembly. Five different fabric structures are used. Design of experiments and data analysis tools are used to describe the influence of two manufacturing factors on the sound absorption coefficient of the ensemble. These factors are the fabric weft count (picks/cm) and the thickness of the nonwoven (mm). The experimental conditions under which the maximum sound absorption coefficient is achieved are found. The influence of each factor and a mathematical model are obtained. Results of statistical and

optimization analysis show that for the same fabric density, sound absorption coefficient increases as the number of layers decreases.

2.3.1 Introduction

Many human activities are developed indoor, like working, attending classes, visiting shopping centres, restaurants, etc. and these environments are often noisy. The continuous exposure to high levels of noise can cause different health problems, and many efforts are done to reduce these problems (Barron, 2003), (Crocker, 2007). Acoustic absorption reduces the sound pressure, helping to achieve acoustic comfort. There are many types of acoustic absorbers, like resonators, porous or combined absorbers (Cox & D'Antonio). Textile materials are included in the group of porous fibrous materials.

Sound absorbing properties of porous fibrous materials have been widely studied (Tang & Yan, 2017), (Arenas & Crocker, 2010). The resistive layer of this material is a multiple cloth fabric, characterized by a microstructure in which there are two main phases: one solid phase, or frame formed by the yarns with their fibres, and one gas phase formed by the air in the pores. One characteristic of porous absorbers is that they show some resistance against air flow through their pores. This produces a difference of pressure at both sides of the pore. This pressure drop is mainly caused by the friction of air particles in the pore with the frame but is only noticeable when these pores are very narrow. When a sound wave impinges on the fabric, its flow resistivity depends on the shape and size of the fabric pores. A highly resistive fabric with small pores and lower porosity produces a high flow distortion, while a fabric with a higher open porosity produces a low flow distortion. In this case the thermo-viscous effects responsible of an important part of the sound absorption of porous materials, like the one being studied, are less important, causing a decrease in the absorption. The Johnson Champoux Allard model explains this matter, and other authors apply it to textiles (Allard & Atalla, 2009), (Champoux & Allard, 1991), (Atalla & Sgard, 2007), (Ruiz et al., 2012), (Jaouen & Bécot, 2011).

Nonwovens can be obtained through various processes and from different natural fibers like kenaf, wood, hemp, coconut, cork, cane, cardboard, and sheep wool (Oldham, Egan & Cookson, 2011), (Berardi & Iannace, 2015), (Ramis, del Rey, Alba, Godinho & Carbajo, 2014), kapok and milkweed (Ganesan & Karthik, 2016), jute (Fatima & Mohanty, 2011), etc. Synthetic mineral fibrous materials like glass or rock wool (Wang & Torng, 2001) have also been studied. Synthetic polymeric materials, like polyester (Narang, 1995), a combination of polypropylene and polyester, Kevlar (Kosuge, Takayasu & Hori, 2005) as a flame retardant, and recycled materials like polypropylene and polyester from bottles (Lou, Lin & Su, 2005), (del Rey, Alba, Ramis & Sanchis 2011) are suitable for sound absorption.

The acoustic characteristics of textile fabrics have been studied in the form of tufted carpets (Shoshani & Wilding, 1991), curtains (Alonso & Martellotta, 2016), (Pieren, 2012), (Pieren, Schäffer, Schoenwald & Eggenschwiler, 2016), (Del Rey, Alba, Blanes

& Marco, 2013), (Hanna & Kandil, 1991), warp and weft knitting (Dias, Monaragala & Lay, 2007), (Arumugam, Mishra, Militki, Tomkova, 2017), (Liu & Hu, 2010), (Long & Chen, 2015), (Monaragala, 2011), (Dias & Monaragala, 2006) and also using honeycomb 3D weave (Barbuski, Blaszcak & Pawliczak, 2018). Some works study fabrics based on fiberglass (Kang & Fuchs, 1999), or micrometric mesh based on polyester and polyamide monofilament yarns (Ruiz, Cobo, Dupont, Martin & Leclair, 2012). In these cases, the surface of the threads is smooth and regular.

Multi-layered materials are widely used to improve the efficiency of fibrous absorbers (Pieren & Heutschi, 2015), (Arenas & Crocker, 2010), (Tang & Yan, 2017). When in combination of a woven fabric layer and a nonwoven, the fabric acts as a resistive layer that modifies the absorption of the obtained composite material (Chevillotte, 2012), (Segura Alcaraz, Bonet-Aracil, Segura Alcaraz & Montava Seguí, 2017), (Segura Alcaraz, Bonet-Aracil, Segura Alcaraz & Montava Seguí, 2018). Besides, it has been observed that in double porosity absorbent materials, the hole profile has a strong influence so a progressive decrease of the meso-porosity as the wave penetrates inside the material increases the absorption coefficient in a wide frequency band (Sgard, Olney, Atalla & Castel, 2005).

Numerical methods like multiple regression analysis have been conducted on woven fabrics (Tang, Kong & Yan, 2018) and design of experiments, on thermo compressed recycled ELT (end of life tyres) (Segura Alcaraz et al., in press). In this work, design of experiments and data analysis tools are used to describe the influence of two manufacturing factors on the sound absorption coefficient of the composite material formed by a multiple cloth fabric with different configurations and a polyester nonwoven. The fabric is used as a perforated facing, and the nonwoven is used as a porous material. The result is a lightweight, easy to handle, flexible and easy maintenance material.

2.3.2 Experimental

2.3.2.1 Materials

The studied material is formed by a multi-layer fabric placed on top of a polyester nonwoven, without glue.

The fabrics tested in our work have the structure of multiple cloths, based on plain weave. The choice of the plain weave was previously justified (Soltani & Zarrebini, 2013) due to the short length of its floats, which reflect the sound more randomly than other weaves. In addition, it is the weave that provides more stitching points, and therefore possible openings in the fabric. By varying the warp and weft densities, the number of layers and the warp and weft ratios in each layer, it is possible to vary the size of the inter-yarn pores. The advantage of using shed fabrics lies in the possibility of obtaining porous sheets in which the size and arrangement of the pores can be modified by varying the number of ends and picks per centimetre and, where appropriate, the type of yarns. In this study, textured yarns are used as they increase their volume and coating capacity.

Besides, this type of yarns has the advantage of producing intra-yarn pores, formed by the gaps between their multiple filaments. The general characteristics of the fabrics studied are shown in table 2.3.1.

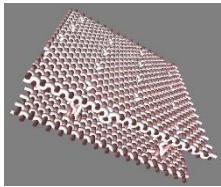
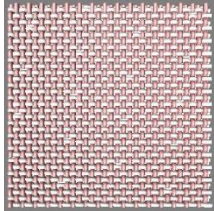
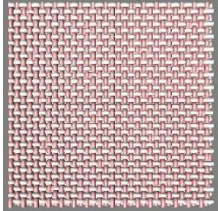
Table 2.3.1. Fabric general characteristics.

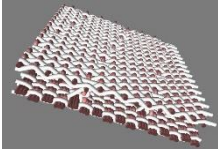


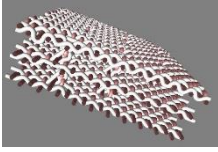

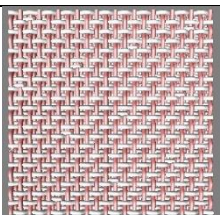
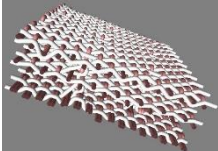
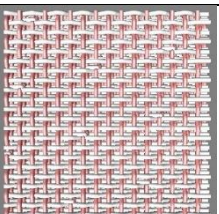

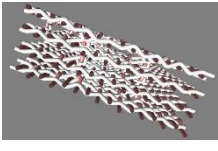
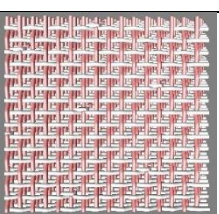

Warp Yarn	Warp Density (ends/cm)	Filling Yarn	Filling Density (picks/cm)
Polyester 167 dtex 40 filaments Continuous Textured	60	Polyester 167 dtex 40 filaments Continuous Textured	15, 30, 45, 60

Samples are produced with a Smit GS 900 weaving machine 190 cm wide, with a Stäubli DX-100 electronic Jacquard machine. The filling density is electronically controlled. Fabrics are used as they are produced at the loom without any further treatment.

Plain weave based multiple cloths, with evenly spaced stitching points, are designed and woven with different warp and weft ratios and filling densities. They are named according to table 2.3.1.

Table 2.3.2. Classification and schematic view of fabrics.

Name	Structure		
2Warp2Weft			
Balanced double cloth	Front Warp Ratio: 1, 1	Back Weft Ratio: 1, 1	

<p>4Warp 2Weft</p>  <p>Unbalanced double cloth</p>	 <p>Front Warp Ratio: 1,3</p>	 <p>Back Weft Ratio: 1, 1</p>
<p>3Warp 3Weft</p>  <p>Balanced triple cloth</p>	 <p>Front Warp Ratio: 1, 1, 1</p>	 <p>Back Weft Ratio: 1, 1, 1</p>
<p>4Warp3Weft</p>  <p>Unbalanced triple cloth</p>	 <p>Front Warp Ratio: 1, 1, 2</p>	 <p>Back Weft Ratio: 1, 1, 1</p>
<p>4Warp4Weft</p>  <p>Balanced quadruple cloth</p>	 <p>Front Warp Ratio: 1, 1, 1, 1</p>	 <p>Back Weft Ratio: 1, 1, 1, 1</p>

In Table 2.3.2 a schematic view of the different structures studied is represented. In the images, the warp yarns are represented in red, and weft yarns are represented in white. The balanced and unbalanced structures can be distinguished, as in the first ones, the warp yarns are equally divided in all layers. The unbalanced structures, with uneven distribution of the warp yarns, result in a larger pores size in the fabric of the top face than those in the bottom face, causing therefore a decrease of the pores size in the direction in which the sound wave goes through the fabric.

The polyester nonwoven web is obtained through dry-laid method with thermal bonding, using fibres in the mix with a lower melting point. Its characteristics are summarized in table 2.3.3. The nonwoven approximated thickness is 15mm. Thicknesses of 30 and 45 mm are obtained by simple overlaying two or and three layers of nonwoven, without glue. The aim of this work is to use the minimum thickness of nonwoven, so 45mm is considered the maximum acceptable thickness.

Table 2.3.3. Characteristics of nonwoven.

Material	Density (g/m ²)	Fibres length (mm)	Fibres count (dtex)	Fibres section	Thicknesses tested (mm)
Polyester	160	63	112,33	Solid circular	15, 30, 45

2.3.2.2 Methods

Fabric surface density and thickness

The fabric surface density is determined following the procedure described in the standard UNE-EN_12127 = 1998_ Determination of the Mass per Unit of Surface of Small Samples, except that only three specimens are taken with respect to five that indicates the standard. This is done by checking that the standard deviation is very low (less than four), and not being the factor of decisive importance.

Thickness is measured using a material thickness gauge.

Normal incidence sound absorption coefficient

In order to perform the measurements of the absorption coefficient of the different samples, the method described in ISO 10534-2 is followed: Determination of Acoustic Absorption Coefficient and Acoustic Impedance in Impedance Tubes, Part 2: Transfer Function Method. By means of this method the acoustic absorption coefficient for the normal incidence is obtained using a tube of standing waves, two microphones and a

digital system of signal analysis. A source of noise generates flat waves in the tube. By measuring the acoustic pressure in two positions with microphones mounted on the wall, the decomposition of the interferential field is performed. Next, using a Matlab function designed for this purpose, the complex acoustic transfer function of the signals in the two microphones is determined, from which the absorption coefficient at normal incidence is deduced.

The impedance tube is a narrow, rigid and airtight duct that must meet the characteristics described in the mentioned standard.

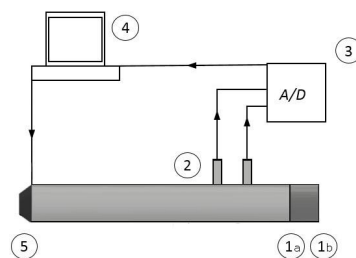


Figure 2.3.1. Scheme of the apparatus used to measure the sound absorption coefficient, where: 1a) sample: fabric side; 1b) sample: nonwoven side; 2) the two microphones (microphones G.R.A.S. model 40AO); 3) the data acquisition system (NI-9233); 4) the PC and 5) the sound source.

To perform the test, the sample is placed at one end of the impedance tube (figure 2.3.1), without air cavity. The fabric is placed on the face closest to the sound source. In the case of unbalanced fabrics, the face of less density is the one that is placed on the side of the sound source. The specimen must fit well to the sample holder without being unduly compressed or adjusted so firmly that it is bulged.

The reflection coefficient is determined by the following equation:

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1} \quad \text{Equation 2.3.1}$$

Where:

H_{12} is the complex transfer function

H_i is the imaginary part of H_{12}

H_R is the transfer function of the reflected wave

k_0 is the complex wave number, and

x_1 is the distance from the sample to the last position of the microphone.

And the acoustic absorption coefficient for normal incidence is determined by the equation:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \text{Equation 2.3.2}$$

Design of experiment

A response surface design is used for each one of the five fabric structures. The base design is summarized in table 2.3.4. The aim of the experiment is to determine the optimal values of the experimental factors by maximizing the sound absorption coefficient in four octave bands. The measured sound absorption coefficient values are reduced to four values according to four intervals, named by their central frequencies: 500,1000,2000 and 4000 Hz. An analysis of the experiment is run using Statgraphics Centurion software.

Table 2.3.4. Experimental and response factors.

	Number	Names	Levels of factors	Continuous
Experimental factors	2	Picks/cm,	15, 30, 45, 60	Yes
		Nonwoven Thickness (mm)	15, 30, 45	Yes
Responses	4	SAC_500Hz SAC_1000Hz SAC_2000Hz SAC_4000Hz		

(SAC: sound absorption coefficient)

2.3.3 Results and discussion

2.3.3.1 Fabric surface density

Values of the surface density and thickness of the different fabrics obtained by varying the weft density are shown in tables 2.3.5 and 2.3.6. As expected, it is observed that fabrics with the same thread densities, although different structures, have very similar surface densities, with variation coefficients (VC) smaller than 0,05.

Table 2.3.5. Surface density of the obtained fabrics (60 ends /cm).

Weft Density (Picks/cm)	Mass per Surface Unit (g/m ²)						Mean	VC
	2Warp 2Weft	3Warp 3Weft	4Warp 2Weft	4Warp 3Weft	4Warp 4Weft	4Warp 4Weft		
15	132,57	132,1	133,77	135,1	136,8	134,07	0,0128	
30	159,95	160,87	163,57	161,7	161,6	161,54	0,0074	
60	216,03	212,93	217,23	214,67	214,53	215,08	0,0068	

Table 2.3.6. Thickness of the obtained fabrics.

Weft Density (Picks/cm)	2Warp	3Warp	4Warp	4Warp	4Warp
	2Weft	3Weft	2Weft	3Weft	4Weft
15	0,5	0,6	0,55	0,65	0,7
30	0,45	0,65	0,5	0,7	0,75
60	0,4	0,6	0,6	0,67	0,8

2.3.3.2 Thickness of nonwoven

By increasing the thickness of the nonwoven, the resistive layer is separated from the rigid wall, which causes a decrease in the frequency of maximum absorption. It is observed that there is an increase in the sound absorption coefficient, produced by adding a fabric layer to the nonwoven. Otherwise, as the thickness of the nonwoven layer increases this effect is less important.

Figure 2.3.2 shows the sound absorption curve of a 15 mm nonwoven and the effect of overlaying different fabrics on it, with a low weft density of 15 picks/cm, as an example. Figures 2.3.3 and 2.3.4 show sound absorption curves of the same configurations, with nonwoven thickness of 30 mm in figure 2.3.3, and 45 mm in figure 2.3.4.

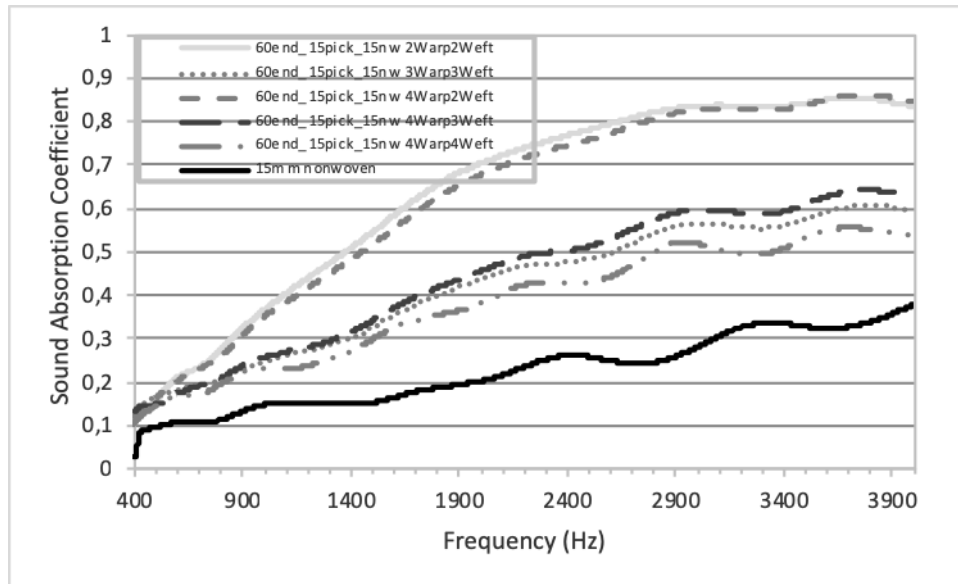


Figure 2.3.2. Sound absorption coefficient of multi-layer fabrics with 15 picks/cm facing plus 15mm nonwoven backing.

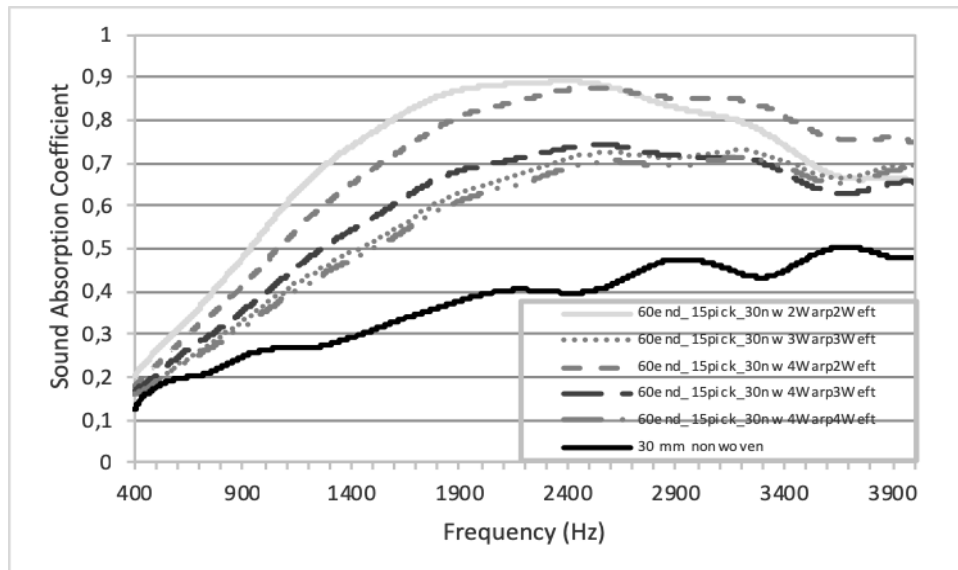


Figure 2.3.3. Sound absorption coefficient of multi-layer fabrics with 15 picks/cm facing plus 30 mm nonwoven backing.

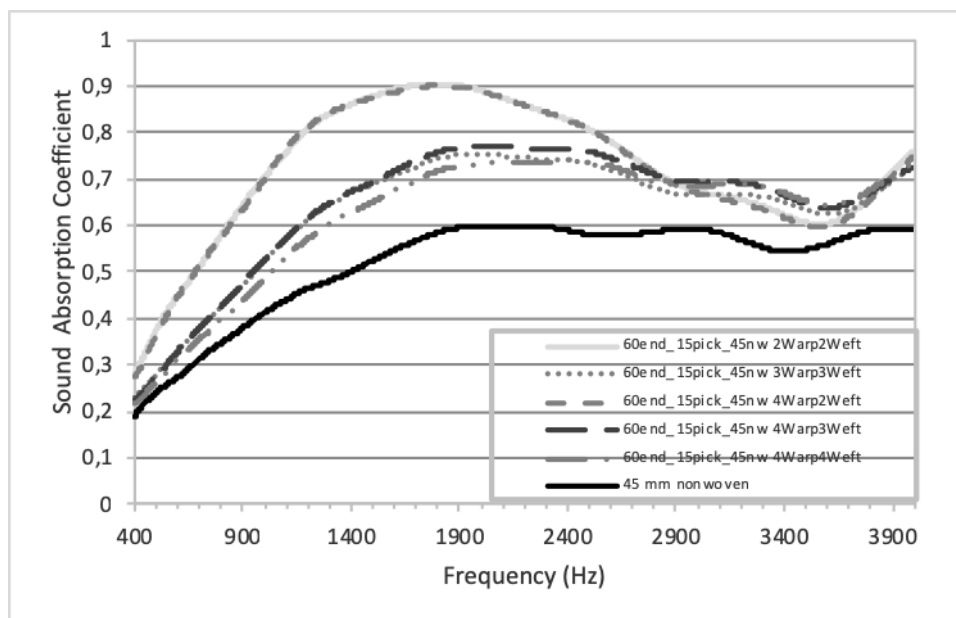


Figure 2.3.4. Sound absorption coefficient of multi-layer fabrics facing with 15 picks/cm plus 45 mm nonwoven backing.

Table 2.3.7 shows the maximum values of the absorption coefficient of the fabric-nonwoven assembly. The variation coefficient is different depending on the fabric structure. For example, structures like 2Warp2Weft and 2Warp4Weft, which are double cloths, have a smaller variation coefficient than triple and quadruple cloths.

Table 2.3.7. Maximum absorption coefficients of the combination of a 60 ends/cm and 15 picks/cm fabric with 15, 30, and 45 mm nonwoven

Specimen	Maximum sound absorption coefficient	Maximum sound absorption coefficient	Maximum sound absorption coefficient	Variation coefficient (%)
	15 mm nonwoven	30 mm nonwoven	45 mm nonwoven	
60 ends/cm 15 picks/cm				
2Warp2Weft	0,86	0,89	0,90	2,85
3Warp3Weft	0,61	0,73	0,76	11,21
4Warp2Weft	0,86	0,88	0,90	2,27
4Warp3Weft	0,64	0,74	0,77	9,37
4Warp4Weft	0,56	0,71	0,74	14,79

For all studied thicknesses of nonwoven, fabrics that produce the highest absorption values are those formed by two layers, then those formed by three layers and finally those formed by four layers. Within the two-layer fabrics, those formed by balanced double cloths produce a slightly higher absorption than those formed by unbalanced double cloths. This difference varies in a non-linear way, according to the thickness of the nonwoven layer, being greater in the case of using 30 mm of nonwoven than in cases where 15 and 45 mm of nonwoven are used. Within the three-layer fabrics the opposite occurs: absorption is generally better when the warp ratio is 1-1-2. This effect is lower in the case of adding 45 mm of nonwoven and is inverted in the case of 30 mm of nonwoven at frequencies above 2938 Hz.

2.3.3.3 *Fabric density*

The sound absorption coefficient increases with the increment of fabric density for all fabric structures, except for the 2Warp2Weft samples. In these fabrics, which reach a maximum absorption coefficient of 0.97 at 1204.83 Hz with 45 picks/cm, if the weft density is increased to 60 picks/cm, there is an alteration of the curve, with two maxima: from 0.87 to 814.21 Hz and from 0.88 to 1851.80 Hz. In addition, a lower coefficient of absorption is obtained than the one presented by nonwoven without facing, between 2907 and 3741 Hz.

Figure 2.3.5 shows the sound absorption curve of a 45 mm nonwoven and the effect of overlaying a 30 picks/cm fabric on it, as an example. Figures 2.3.6 and 2.3.7 show sound absorption curves of the same configurations, but with a weft density of 45 picks/cm in figure 2.3.6, and 60 picks/cm in figure 2.3.7.

By increasing the weft density of the fabric, and therefore its mass, the size of the generated inter-yarn pores decreases. This also produces some narrowing of sound absorption curves which indicate an increase in the selectivity of the absorbed sound.

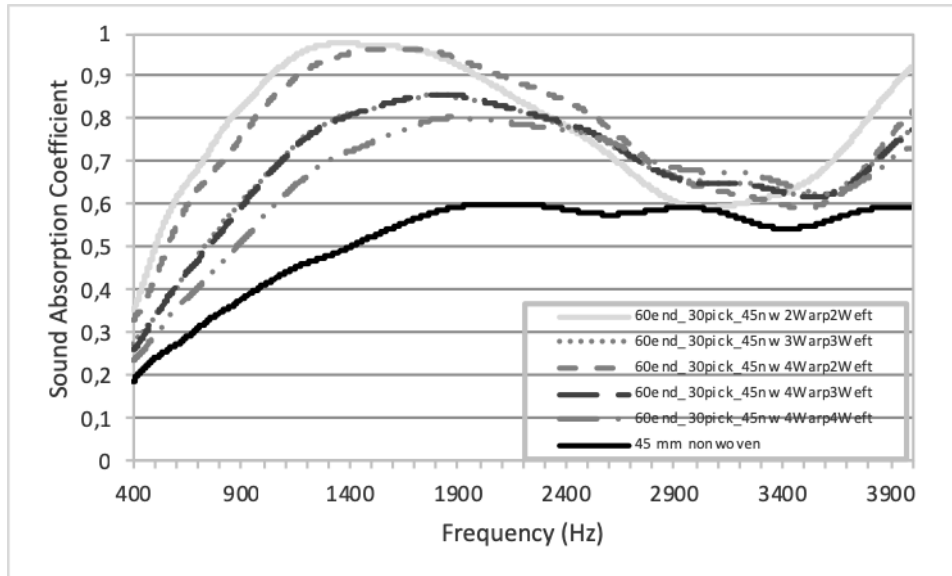


Figure 2.3.5. Sound absorption coefficient of multi-layer fabrics with 30 picks/cm plus 45mm nonwoven backing.

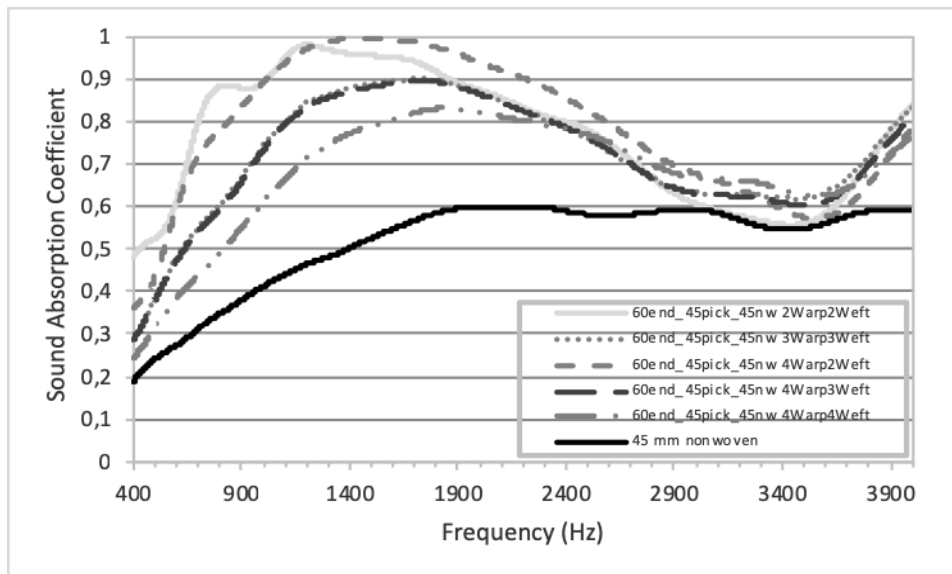


Figure 2.3.6. Sound absorption coefficient of multi-layer fabrics with 45 picks/cm plus 45mm nonwoven backing.

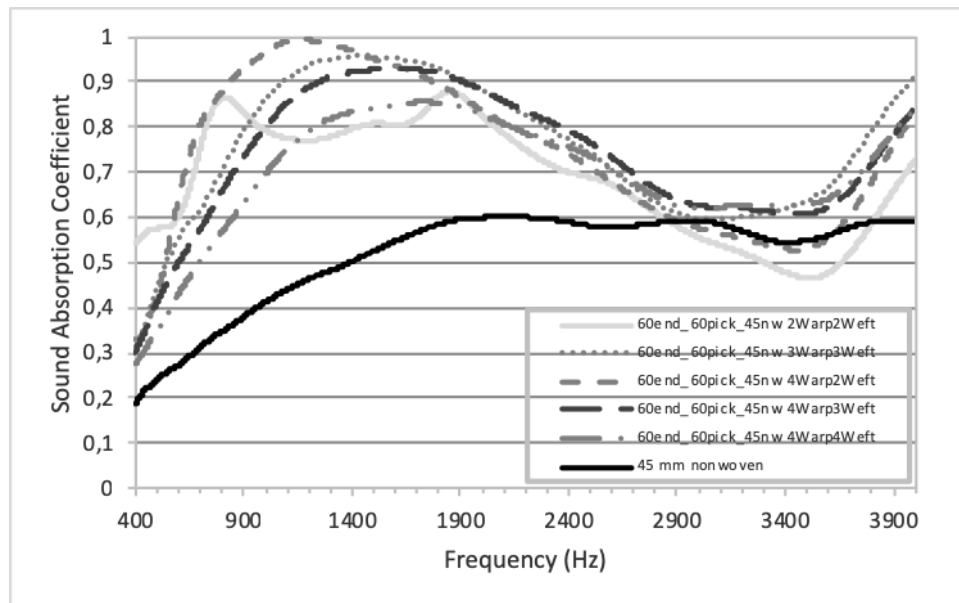


Figure 2.3.7. Sound absorption coefficient of multi-layer fabrics with 60 picks/cm plus 45mm nonwoven backing.

2.3.3.4 Fabric balancing

Comparing balanced cloths, with equalled sized pores in their layers, with unbalanced cloths, with smaller sized pores in the top layer, curves of sound absorption coefficient are very similar. There is an exception in the case of double fabrics with 60 picks/cm. In this case, it is observed that while the unbalanced fabric follows the expected curve, the balanced fabric exhibits a different behavior. It seems that there is a limit value between 30 and 60 picks/cm from which the balanced double cloth structure begins to decrease its beneficial effect on absorption at some frequencies. This may be because the size of the pores is reduced so that and the fabric begins to work as a non-porous membrane. This confirms that the application of a resistive layer on a nonwoven does not always improve the sound absorption of the ensemble.

2.3.3.5 Design of experiment

Terms that contribute most to the variability in the response

The influence of each experimental factor and the interaction of the influences exerted by both factors on the response are obtained. By means of the Pareto chart of the effects,

the relative magnitude and the statistical significance of both the main effects (picks/cm and nonwoven thickness) and their interactions are compared. The absolute values of the standardized effects (t-statistics which test the null hypothesis that the effect is 0, so the term coefficient in the model is equal to 0) are summarised in Table 2.3.8. The effects that are not statistically significant at a significance level of 5% (risk of concluding that the effect exists when there is no effect) will be removed for further analysis. In case that a main effect is not significant, if it is involved in a significant interaction, it is retained.

Table 2.3.8. Relative magnitude and statistical significance of the main effects and of their interaction

Frequency (Hz)	Factors		2Warp	3Warp	4Warp	4Warp	4Warp
			2Weft	3Weft	2Weft	3Weft	4Weft
			Standardized Effect				
500	Picks/cm	A	13,07	21,70	16,74	12,18	11,91
	Nw. mm	B	19,28	45,98	36,06	26,73	22,23
	Interaction	AB	0,47	13,94	3,22	5,26	3,38
		AA	0,14	0,43	3,43	0,11	0,91
		BB	0,68	6,47	0,93	3,86	1,50
1000	Picks/cm	A	10,38	29,55	24,20	17,89	24,79
	Nw. mm	B	9,03	48,46	28,17	30,48	59,57
	Interaction	AB	5,71	8,26	4,13	2,86	4,08
		AA	0,11	0,98	0,59	0,14	1,18
		BB	2,13	2,66	0,21	1,36	2,47
2000	Picks/cm	A	9,26	9,53	1,93	11,41	11,54
	Nw. mm	B	14,68	6,59	23,31	19,46	0,30
	Interaction	AB	1,13	10,11	4,25	17,49	13,25
		AA	9,51	0,21	3,30	4,51	1,13
		BB	0,27	3,22	0,56	3,97	7,05
4000	Picks/cm	A	1,97	23,10	16,80	23,10	23,90
	Nw. mm	B	0,33	21,72	1,48	23,27	29,50
	Interaction	AB	7,94	8,11	17,84	9,57	10,66

AA	7,63	1,85	11,72	1,50	5,22
BB	6,16	13,87	8,18	12,36	13,17

Terms with statistically significant effects on the response

To determine if the experimental factors have a significant effect on the dependent variable, an analysis of variance is performed for sound absorption coefficients at 500, 1000, 2000 and 4000 Hz. As an example, the results are shown in tables 2.3.9 to 2.3.12. They correspond to the composite material when the fabric structure 2Warp2Weft is used. In these tables, the R-squared or coefficient of determination shows the percentage of the observed variation that can be explained by the studied experimental factors. It is used when there is one variable that explains differences in another variable. In our case, as there are more than one experimental factors in the model, R-squared adjusted for degrees of freedom is more adequate to explain the effect of adding variables which can produce points that do not fit the model, reducing the percentage of variation in the sound absorption coefficient explained by a variation of the experimental factors. The Durbin-Watson statistic tests for the presence of correlation in the errors of adjacent observations used for the regression model. Finally, Lag 1 residual autocorrelation shows the estimated correlation between consecutive residuals.

Table 2.3.9. Analysis of variance for SAC500.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: Picks/cm	0,17435	1	0,17435	206,52	0,0000
B: Nw. mm	0,362211	1	0,362211	429,04	0,0000
Residual	0,0227945	27	0,000844242		
Total (corr.)	0,582137	29			

R-squared= 96,0843 per cent. R-squared (adjusted for d.f.) = 95,7943 per cent. Standard error of Est. = 0,0290558. Mean absolute error = 0,0234244. Durbin-Watson statistic = 1,65047 (P=0,1371). Lag 1 residual autocorrelation = 0,13601

Table 2.3.10. Analysis of variance for SAC1000.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: Picks/cm	0,372855	1	0,372855	119,36	0,0000
B: Nw. mm	0,27445	1	0,27445	87,85	0,0000
AB	0,106919	1	0,106919	34,23	0,0000
BB	0,0155754	1	0,0155754	4,99	0,0347

Residual	0,0780975	25	0,0031239
Total (corr.)	0,866187	29	

R-squared= 90,9838 per cent. R-squared (adjusted for d. f.) = 89,5412 per cent. Standard error of Est. = 0,0558919. Mean absolute error = 0,0412814. Durbin-Watson statistic = 2,12449 (P=0,6411). Lag 1 residual autocorrelation= -0,0885422

Table 2.3.11. Analysis of variance for SAC2000.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: Picks/cm	0,0876723	1	0,0876723	95,44	0,0000
B: Nw. mm	0,206494	1	0,206494	224,79	0,0000
AA	0,093184	1	0,093184	101,44	0,0000
Residual	0,0238836	26	0,0009186		
Total (corr.)	0,43592	29			

R-squared= 94,5211 per cent. R-squared (adjusted for d.f.) = 93,8889 per cent. Standard error of Est.= 0,0303084. Mean absolute error = 0,0224874. Durbin-Watson statistic = 1,88751 (P=0,2967). Lag 1 residual autocorrelation = 0,0167054

Table 2.3.12. Analysis of variance for SAC4000.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A: Picks/cm	0,00300387	1	0,00300387	3,88	0,0604
B: Nw.mm	0,0000847387	1	0,0000847387	0,11	0,7435
AA	0,0450535	1	0,0450535	58,24	0,0000
AB	0,0487619	1	0,0487619	63,03	0,0000
BB	0,0293884	1	0,0293884	37,99	0,0000
Error total	0,0185668	24	0,000773615		
Total (corr.)	0,173587	29			

R-squared= 89,304 per cent. R-squared (adjusted for d.f.) = 87,0757 per cent. Standard error of Est.= 0,0278139. Mean absolute error = 0,0181709. Durbin-Watson statistic = 1,97491 (P=0,4583). Lag 1 residual autocorrelation= -0,00646337.

Equations of the regression model adjusted to the data

The underlying model takes the form of a multiple linear regression model. The response variable is expressed as a linear function of the two main effects, the two-factor interaction represented by a cross-product of weft density and nonwoven thickness, the

quadratic terms and the error term. The quadratic effect causes the estimation of the response surface to show a curvature.

The regression equations for each octave are obtained by design of experiment analyse procedure. As an example, regression equations of the composite material obtained with the 2Warp2Weft fabric structure and a layer of nonwoven is shown in Table 2.3.13.

Table 2.3.13. Regression equations corresponding to the sound absorption coefficient of the composite material when the fabric structure 2Warp2Weft is used.

Frequency (Hz)	Equations
500 Hz	$SAC_{500} = -0,041694 + 0,00456831 * PICKS/CM + 0,00882696 * NW THI$
1000 Hz	$SAC_{1000} = -0,258057 + 0,0149842 * PICKS/CM + 0,0315743 * NW THI - 0,000269998 * PICKS/CM * NW THI - 0,000228556 * NW THI^2$
2000 Hz	$SAC_{2000} = 0,778572 + 0,01575 * PICKS/CM - 0,00672214 * NW THI - 0,000253964 * PICKS/CM^2$
4000 Hz	$SAC_{4000} = 0,176778 + 0,0200035 * PICKS/CM + 0,0266922 * NW THI - 0,00018501 * PICKS/CM^2 - 0,000182936 * PICKS/CM * NW THI - 0,000328237 * NW THI^2$

Optimization

Having built statistical models for the four responses, optimal settings of the factors are determined. After applying the multiple response optimization procedure to the four analyses of experiments (SAC500, SAC1000, SAC2000, SAC4000) the combination of levels of the experimental factors that maximize sound absorption coefficient is obtained by the multiple response optimization procedure. Table 2.3.14 shows the combination of levels of each factor at which the optimum is reached for the five different fabric structures. It also shows the maximum acoustic absorption coefficient accomplished at each frequency at those levels. The 2Warp2Weft and 4Warp2Weft structures are the ones that lead to higher sound absorption coefficients.

Optimization of experiments has helped to find the values of weft density and nonwoven thickness that lead to the highest sound absorption coefficient in a wide range of frequencies, for each fabric structure. It is found that it is not necessary to use a large nonwoven thickness, neither high values of weft density to achieve a high absorption. The optimum nonwoven thickness is 34,28 mm for the material with 2Warp2Weft fabric and 28,94 mm for the material with 4Warp2Weft fabric.

Table 2.3.14. Multiple Response Optimization.

		Optimum Factors		Optimum Responses			
		Picks/cm	Nw. mm	SAC500	SAC1000	SAC2000	SAC4000
2u2t	bal- anced	41,59	34,28	0,45	0,79	0,76	0,96
3u3t	bal- anced	60	37,36	0,40	0,76	0,73	0,91
4u2t	unbal- anced	53,10	28,94	0,39	0,77	0,77	0,96
4u3t	unbal- anced	60	32,08	0,34	0,67	0,73	0,91
4u4t	bal- anced	60	45	0,39	0,70	0,67	0,80

2.3.4 Conclusions

The influence of the fabric spatial structure in the acoustic absorption of a layered material made up of a multiple cloth fabric in combination with a nonwoven has been studied. High levels of sound absorption in some frequencies have been achieved.

A mathematical model is obtained based on regression equations. The main factors that cause variation in the sound absorption coefficient are obtained. These factors have different influence at each frequency, and for each fabric structure.

Optimization of experiments has permitted to compare the five different fabric structures and their influence on the sound absorption coefficient of the layered material. Double cloth structures result to be the ones that achieve higher sound absorption coefficient, with lower weft density and smaller nonwoven thickness. Results of statistical analysis coincide with previous observations of sound absorbing curves, where, as the number of layers decreases, for the same fabric density, absorption increases. This may be due to the decrease in inter-yarn pores size, and the consequent increase in viscous friction.

For future studies, design of experiments is considered as a helpful tool, in order to improve textile composite sound absorbing materials design.

References

- Alonso, A., & Martellotta, F. (2016). Room acoustic modelling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. *Journal of*

- Building Performance Simulation*, 9(5), 469-486.
- Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. *Sound and Vibration*, 12-17. Recuperado de <http://www.sandv.com/downloads/1007croc.pdf>
- Arumugam, V., Mishra, R., Militky, J., & Tomkova, B. (2017). Noise attenuation performance of warp knitted spacer fabrics. *Textile Research Journal*.
- Barron, R. F. (2003) *Industrial noise control and acoustics*. New York: Marcel Dekker.
- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94, 840-852.
- Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73(1), 56-60.
- Del Rey, R., Alba, J., Blanes, M., & Marco, B. (2013). The acoustic absorption of textile curtains on the function of the fullness. *Materiales de Construccion*, 63(312).
- Del Rey, R., Alba, J., Ramis, J., & Sanchis, V. J. (2011). New absorbent acoustic materials from plastic bottle remnants. *Materiales De Construccion*.
- Dias, T., & Monaragala, R. (2006). Sound absorption in knitted structures for interior noise reduction in automobiles. *Measurement Science and Technology*, 17(9), 2499-2505.
- Dias, T., Monaragala, R., & Lay, E. (2007). Analysis of thick spacer fabrics to reduce automobile interior noise. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 1979-1991.
- Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72(2-3), 108-114.
- Ganesan, P., & Karthik, T. (2016). Development of acoustic nonwoven materials from kapok and milkweed fibres. *Journal of the Textile Institute*.
- Hanna, Y. I., & Kandil, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*.
- Kang, J., & Fuchs, H. V. (1999). Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space. *Journal of Sound and Vibration*, 220(5), 905-920.
- Kosuge, K., Takayasu, A., & Hori, T. (2005). Recyclable flame retardant nonwoven for sound absorption; RUBA(R). *Journal of Materials Science*, 40(20), 5399-5405.
- Long, H. R., & Chen, S. (2015). Effect of structural parameters on the sound absorption properties of warp-knitted spacer fabrics. *Industria Textila*.
- Lou, C. W., Lin, J. H., & Su, K. H. (2005). Recycling Polyester and Polypropylene Nonwoven Selvages to Produce Functional Sound Absorption Composites. *Textile Research Journal*, 75(5), 390-394.
- Monaragala, R. M. (2011). Knitted structures for sound absorption. En *Advances in Knitting Technology*.
- Narang, P. P. (1995). Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 45(4), 335-358.

- Oldham, D. J., Egan, C. A., & Cookson, R. D. (2011). Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics*, 72(6), 350-363.
- Pieren, R. (2012). Sound Absorption Modelling of Thin, Lightweight Curtains. *Euronoise 2012*, (c), 815-820.
- Pieren, R., & Heutschi, K. (2015). Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method. *Applied Acoustics*, 92, 27-41.
- Pieren, R., Schäffer, B., Schoenwald, S., & Eggenschwiler, K. (2016). Sound absorption of textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Textile Research Journal*, 88(1), 004051751667333.
- Ramis, J., Del Rey, R., Alba, J., Godinho, L., & Carbajo, J. (2014). A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber. *Materiales de Construcción*. 64 (313), 008.
- Ruiz, H., Cobo, P., Dupont, T., Martin, B., & Leclaire, P. (2012). Acoustic properties of plates with unevenly distributed macroperforations backed by woven meshes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5), 3138-3147.
- Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., & Bonet-Aracil, M. (2018). The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. *Autex Research Journal*, 18(3), 269-280.
- Alcaraz, M. S., Bonet-Aracil, M., Alcaraz, J. S., & Seguí, I. M. (2017, October). Sound absorption of textile material using a microfibrils resistive layer. In *IOP conference series: materials science and engineering*. 254(7), 072022.
- Sgard, F. C., Olney, X., Atalla, N., & Castel, F. (2005). On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Applied Acoustics*. 66(6), 625-651
- Shoshani, Y. Z., & Wilding, M. A. (1991). Effect of Pile Parameters on the Noise Absorption Capacity of Tufted Carpets. *Textile Research Journal*, 61(12), 736-742.
- Soltani, P., & Zarrebini, M. (2013). Acoustic performance of woven fabrics in relation to structural parameters and air permeability. *Journal of the Textile Institute*, 104(9), 1011-1016.
- Tang, X., Kong, D., & Yan, X. (2018). Multiple regression analysis of a woven fabric sound absorber. *Textile Research Journal*, 004051751875800.
- Tang, X., & Yan, X. (2017). Multi-layer fibrous structures for noise reduction. *Journal of the Textile Institute*, 108(12), 2096-2106.
- Wang, C.-N., & Torng, J.-H. (2001). Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials. *Applied Acoustics*, 62(4), 447-459.
- Yanping Liu, & Hong Hu. (2010). Sound Absorption Behavior of Knitted Spacer Fabrics. *Textile Research Journal*, 80(18), 1949-1957.

2.4 Adaptación del artículo: Sound absorption of textile material using a microfibras resistive layer

Artículo publicado en: “Alcaraz, M. S., Bonet-Aracil, M., Alcaraz, J. S., & Seguí, I. M. (2017, October). Sound absorption of textile material using a microfibras resistive layer. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 254, No. 7, p. 072022). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/254/7/072022”.

Abstract

Acoustic comfort is a basic human need. One of the adverse effects of noise is its interference with speech discrimination. Textile materials are suitable to be used as sound absorptive materials and thus help to improve acoustic comfort in rooms. Micro-fibre fabrics can be considered as better sound absorbers than regular fibre fabrics mainly due to the higher surface of its fibres and bigger contact area with the air thus, allowing greater dissipation of sound energy. In this work, the use of a microfibre woven fabric as an upstream layer is analysed considering acoustic issues. Authors demonstrate it improves the sound absorption of a polyester nonwoven, resulting in a material suitable for absorption at the sound frequencies of the human voice.

2.4.1 Introduction

Human beings have a need of comfort. Acoustic comfort is a significant part of this need. Noise interferes with speech discrimination, and can result in problems with concentration, fatigue, misunderstandings, lack of self-confidence, irritation, decreased working capacity, problems in human relations, and a number of reactions to stress (Berglund, Lindvall, & Schwela, 2000). Recently, researchers are focused on developing new products such as new lightweight and even translucent textile curtains that absorb sound very well have been developed (Pieren, Schäffer, Schoenwald, & Eggenschwiler, 2016). Even though, hollow spheres have been developed and evaluated from the sound absorption (Hong, Bo & Guangsu, 2006).

Historically, textile materials have been widely used in public places like theatres in the form of curtains, carpets and upholstery, in order to improve their sound quality. Speech intelligibility is also essential in places like classrooms, restaurants, offices, libraries, factories, and public places in general. Textile materials based on polyester fibre have advantages like low density, flexibility and easy handling. Polyester can be recycled and brings the possibility to vary fibre parameters such as shape and size of its cross section, curling or frizzling, hollow fibres, polished or dull surface, as well as the use of additives to increase its fire or UV resistance. Fibrous materials need to be protected for cleaning, mechanical strength, to avoid particle shedding, or for aesthetical reasons. In these cases, it is very common to cover the fibrous material using a nonwoven veil, light panel or perforated panel in different materials. This upstream layer can modify the absorption of the ensemble (Chevillotte, 2012). Micro-fibre fabrics are described as better sound absorbers than regular fibre fabrics (Na, Lancaster, Casali, & Cho, 2007) because of the higher surface of its fibres and bigger contact area with the air, allowing thus greater dissipation of sound energy.

The aim of this project is to compare the influence of the fabric's structure in the sound absorption properties. For this study two different fabrics were used, a twill and a terry one. Fabrics were placed on the top of a nonwoven structure with different thickness. Results evidence that the selectivity of the absorption depends on the type of fabric used. The twill fabric produces higher selectivity than the terry towel in all combinations tested.

2.4.2 Experimental

2.4.2.1 Materials

A microfibre fabric is added as a resistive layer onto a polyester nonwoven. Then its sound absorption coefficient is measured in an impedance tube.

Two different fabrics have been tested as a resistive layer. Both are microfibre woven fabrics made with polyester (PES) and polyamide (PA) in the ratio PES/PA 80/20. The first one has a crossed twill design and the second one is a terry towel fabric. They are shown in figure 2.4.1.



Figure 2.4.1. Microfibre fabrics. Twill on the left and terry towel on the right

The nonwoven is made of 63 mm long polyester fibres with circular cross section and without crimp. After analysing them using a Lenzing Instruments Vibroscope, their fineness is found to be 12,33 dtex. The nonwoven is obtained by dry-laid method from stapled fibres, with thermal bonding by employing some fibres with a lower melt point in the mix. Nonwoven thickness is 15 mm.

The essayed combinations of fabric and nonwoven are as shown in figure 2.4.2:

- a) One layer of 15 mm non-woven.
- b) One layer of fabric plus one layer of 15 mm nonwoven, being the fabric layer on the side of the sound source.
- c) Two layers of fabric and between them one layer of nonwoven.

Combinations b and c are also tested using 30 and 45mm of nonwoven instead of 15mm.

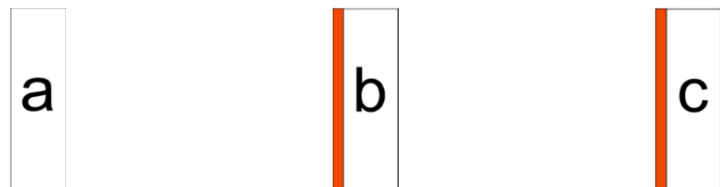


Figure 2.4.2. Combinations of fabric (colored) and nonwoven (white).

2.4.2.2 *Sound absorption coefficient*

Sound absorption coefficients are measured following the method described in ISO 10534-2: Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method. In this method, a sound wave strikes the material perpendicularly, allowing to measure the normal incidence sound absorption coefficient. It requires an impedance tube, two microphones and a digital system for the signal treatment. Every test is conducted with 3 samples, which are tested for each combination of fabric-nonwoven. Measurements are performed at 2950 different frequencies between 400,390625 Hz and 4000,244141. These frequencies are chosen due to the diameter of the available tube (40mm).

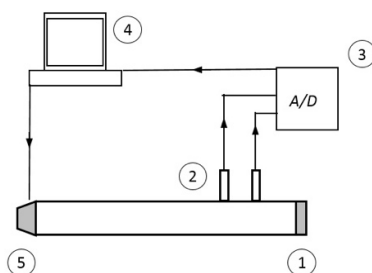


Figure 2.4.3. Scheme of the apparatus used to measure the sound absorption coefficient, where: 1) is the sample; 2) the two microphones (G.R.A.S. model 40AO); 3) the data acquisition system (NI-9233); 4) the PC; and 5) the sound source

To perform the test the sample is placed at the end 1 of the impedance tube as shown in figure 2.4.3. The sample should fit snugly to the sample holder without being compressed or improperly adjusted so firmly that it is convex. It is possible to use vaseline or interstices sealing wax, grease or cover the entire edge. Plane waves are generated in the tube by the sound source, and the pressure in two near positions is measured. Using a Matlab function designed for this purpose, the transfer function of the complex acoustic signals at the two microphones, used in this case to calculate the absorption coefficient from normal incidence, reflection coefficient is determined. As explained in the, above mentioned, ISO 10534-2 standard, this coefficient is determined according to equation 2.4.1.

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1} \quad \text{Equation 2.4.1}$$

Where:

H_{12} = complex transference function,

H_R = transference function from the reflected wave, k_0 = complex wavenumber

x_1 = distance between sample and microphone.

Knowing this, then the sound absorption coefficient for normal incidence can be obtained by the equation 2.4.2.

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \text{Equation 2.4.2}$$

2.4.3 Results

Results show that, when one or two layers of microfibre fabric are added to the nonwoven, combinations b and c, a significant increase in the absorption coefficient is obtained, as shown in figure 2.4.4.

In the case of twill, the addition of a first layer of fabric, combination b, produces a high increase in the absorption, especially at frequencies near to 400 Hz. This increase is less noticeable as frequency approaches to 4000 Hz. When adding a second layer of twill fabric, combination c, the frequency of maximum absorption decreases about 400 Hz as shown in table 2.4.1. Besides, the shape of the curve is narrower for absorptions from 0,7 to 1. Another effect shown in figure 2.4.4 is that the absorption obtained using combination c (two layers of twill and between them one layer of nonwoven) is lower than that obtained using combination b in all frequencies over 1155 Hz.

When terry towel is used in the combination, the addition of a first layer of fabric also increases the absorption, but in this case the maximum absorptions are above 2300 Hz. In this area, the sound absorption coefficient stays over 0,9 though all the frequencies up to 4000 Hz. When a second layer of terry towel is added to form the combination c, the variation of the sound absorption coefficient is minimum, as shown in figure 2.4.2. The frequency of maximum absorption is placed around 3000 Hz in both combinations b and c as seen in table 2.4.1.

Table 2.4.1. Frequency of maximum absorption in combinations a, b and c, using twill and terry towel fabrics.

Combination	Frequency Twill (Hz)	Frequency Terry (Hz)
a) nonwoven 15mm	4000	4000
b) fabric+ nonwoven 15mm	1322	2982
c) fabric+ nonwoven 15mm+ fabric	903	3020

Considering that the sound absorption coefficient of a material must be higher than 0,5 (Crocker, 1998) to be considered as an absorbing material, this level is not achieved by the nonwoven by itself (combination a).

When combining one layer of fabric plus one layer of 15 mm nonwoven, being the fabric layer on the side of the sound source (b) or two layers of fabric and between them one layer of 15 mm nonwoven (c), the total number of frequencies in which the sound absorption coefficient is higher than 0,5 is different for each type of fabric.

When the layer of nonwoven is 30 and 45 mm thick, the figure 2.4.5 shows how the addition of a second layer of fabric does not vary the curve significantly.

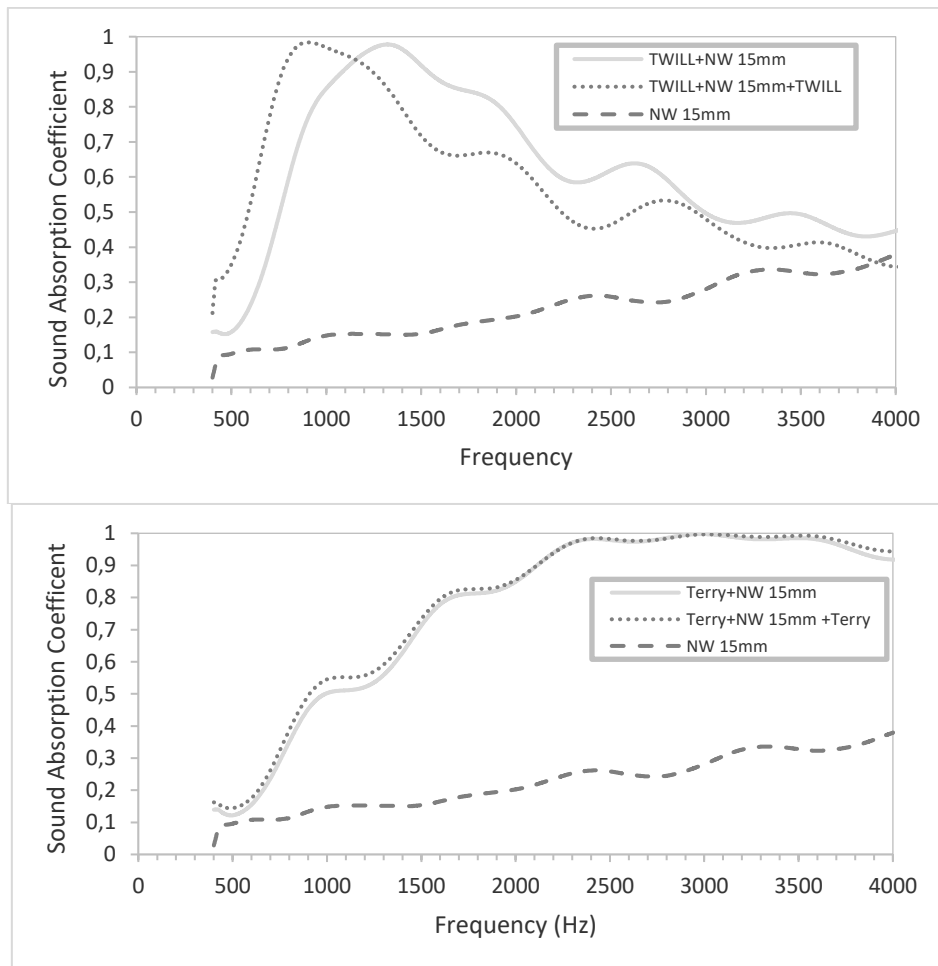


Figure 2.4.4. Sound absorption coefficients of combinations a, b and c of fabric and 15mm nonwoven.

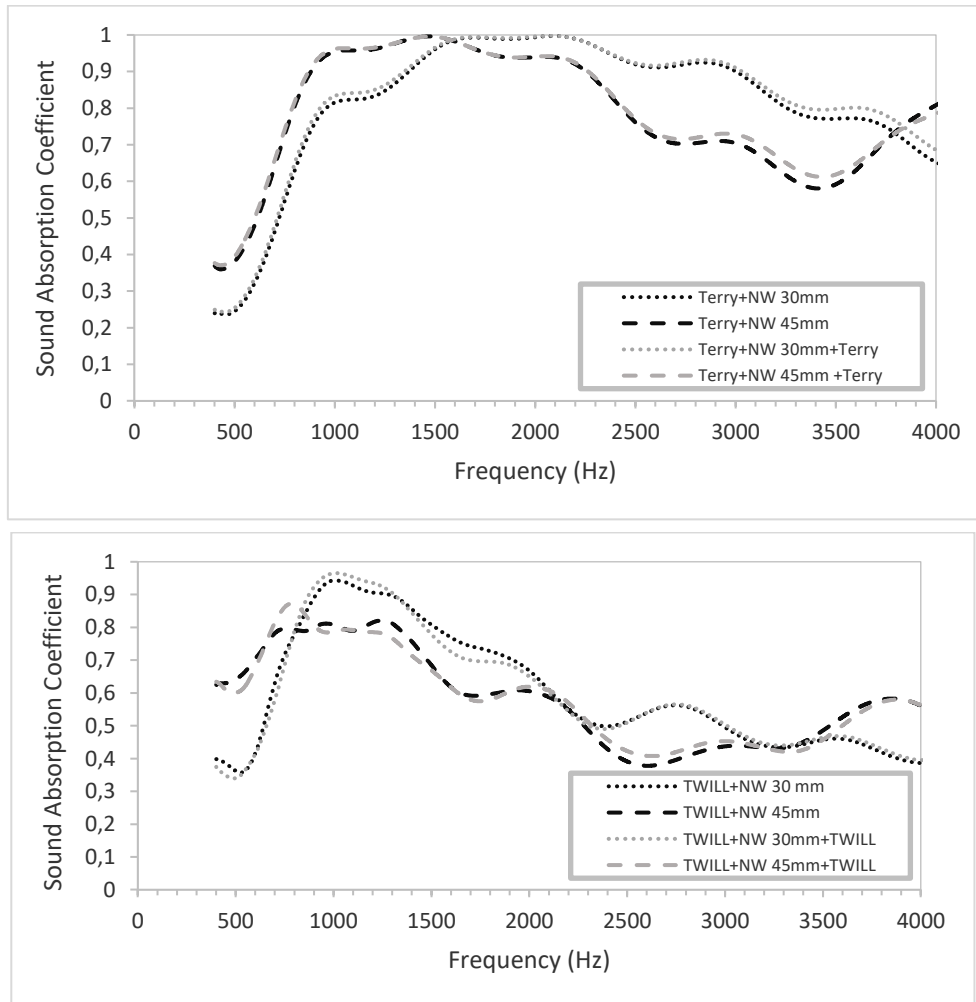


Figure 2.4.5. Sound absorption coefficients of combinations of fabric with 30, and 45 mm nonwoven

2.4.4 Conclusions

The addition of a microfibre fabric to a layer of 15, 30, or 45 mm nonwoven, being the fabric layer on the side of the sound source (combination b) brings a modification of the acoustic absorption of the system fabric-nonwoven. The cause of this increase can be the formation of a Helmholtz resonator assembly. In this sort of resonators the neck is of special interest, as it is the area in which the speed of the wave is higher and the viscous effect is more important for the dissipation of the sound energy. In this case, the neck is formed by the microfibre yarns of the fabric.

When the layer of nonwoven is 15mm thick, the modification of the absorption is different depending on the type of fabric. Twill, with all floats of yarn perpendicular to the direction of the wave sound, forming numerous micro slits of various sizes offers better absorption at lower frequencies. On the other hand, terry towel, in which some yarns create loops, being a part of these loops in the same direction as the wave, increases the absorption at higher frequencies. The effect of adding a second layer of fabric to the assembly is also different depending on the type of fabric. In the twill assembly, there is a movement of the curve towards lower frequencies. As this fabric is right in contact with the rigid wall, no absorption for friction is expected, so possibly this is produced by the vibration of the floats of the fabric, that probably are similar to the strings of a guitar. This effect does not appear in the terry towel assembly. In this case the yarns are looser, forming loops with a free end that move with less restriction than floats and do not absorb so much energy.

When the layer of nonwoven is thicker, like 30 or 45mm, the effect of moving the curve towards lower frequencies does not appear, independently of the type of fabric. In these cases, the results are very similar when combining one layer of fabric plus one layer of nonwoven, being the fabric layer on the side of the sound source like in combination b, or two layers of fabric and between them one layer of nonwoven like in combination c.

The selectivity of the absorption depends on the type of fabric used. The twill fabric produces higher selectivity than the terry towel in all combinations tested. The effect of adding a second layer of microfibre fabric to the assembly on the side of the rigid wall (combination c) causes a movement of the curve towards lower frequencies. As this fabric is right in contact with the rigid wall, no absorption for friction is expected, so possibly this is produced for the vibration of the floats of the fabric. This desirable effect is counteracted by the narrowing of the curve which shows an increase in its selectivity, and the decrease of the absorption at higher frequencies.

References

- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (2000). New Who Guidelines for Community Noise. *Noise & Vibration Worldwide*, 31(4), 24-29.
- Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73(1), 56-60.
- Crocker, M. J. (1998). *Handbook of acoustics*. John Wiley & Sons.
- Hong, Z., Bo, L., & Guangsu, H. (2006). Sound absorption behavior of multiporous hollow polymer micro-spheres. *Materials Letters*, 60(29-30), 3451-3456.
- Na, Y., Lancaster, J., Casali, J., & Cho, G. (2007). Sound Absorption Coefficients of Micro-fiber Fabrics by Reverberation Room Method. *Textile Res Journal*, 77(5), 330-335.
- Pieren, R., Schäffer, B., Schoenwald, S., & Eggenschwiler, K. (2016). Sound absorption of textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Textile Research Journal*, 88(1), 004051751667333.

2.5 Adaptación del artículo: Optimization of the sound absorption of a textile material

Artículo publicado en: “Alcaraz, P. S., Alcaraz, J. S., Seguí, I. M., & Aracil, M. A. B. (2020). Optimización de la absorción de sonido de un material textil. *Dyna*, 95(3), 313-316. doi: 10.6036/9570”.

Abstract

A fibrous sound absorbing material, such as a polyester nonwoven, can be covered with a layer of fabric for its protection and decoration, with an improvement of its sound absorption characteristics. In this work, the sound absorption coefficient of a multilayer textile material composed by a 45mm polyester nonwoven and a layer of stuffed fabric, is measured using an impedance tube. Design of experiments is used to optimize two characteristics of the fabric like weft density and use of stuffing picks, so the highest sound absorption coefficient is obtained in all the studied frequencies. Results show the combination of the studied factors that maximizes sound absorption.

Resumen

Un material absorbente de sonido de tipo fibroso como la guata de poliéster se puede cubrir con una lámina de tejido para su protección y decoración, mejorando sus características de absorción acústica. En este trabajo se mide el coeficiente de absorción de sonido de un material textil multicapa formado por una capa de 45 mm de no tejido de poliéster y una capa de tejido acolchado empleando el tubo de impedancia. Se emplea el

diseño de experimentos para optimizar dos características del tejido como son la densidad de trama y el empleo de tramas de relleno de forma que se obtenga el mayor coeficiente de absorción de sonido en todas las frecuencias estudiadas. Los resultados proporcionan la combinación de los factores estudiados que maximiza la absorción acústica.

2.5.1 Introducción

En la actualidad se emplean paneles absorbentes de sonido donde se desea controlar las condiciones acústicas como estudios de grabación, salas de ensayos, restaurantes, oficinas, recintos feriales, etc. Estos paneles pueden ser instalados en diversas formas, tales como colgados del techo o en las paredes. Además, pueden estar fabricados en distintos materiales, entre ellos, los materiales textiles.

Los materiales absorbentes de sonido de tipo fibroso han sido ampliamente estudiados (Jayaraman, 2005). En el caso de los materiales textiles destaca la guata, lana o no tejido a base de poliéster (Narang, 1995) (Nick, Becker, y Thoma, 2002). Este material se emplea como absorbente acústico en diferentes presentaciones tales como suspendido del techo en diversas formas, o recubriendo paredes en forma de plafones. En la figura 2.5.1 se muestra una aplicación de paneles de guata de poliéster sin ningún recubrimiento, de forma suspendida. Por otro lado, desde un punto de vista medioambiental, la fibra de poliéster, entre otras ventajas, es reciclable (Lou, 2005) y puede ser obtenida a partir del reciclado de botellas de PET (Intini y Kühtz, 2011) (Lee y Joo, 2003).

Los textiles tejidos colgados en forma de cortina también son adecuados para la absorción de sonido (Hanna y Kandil, 1991) (Pieren, 2012b) (Pieren y Heutschi, 2015) (Pieren, 2012a) (Pieren, Schäffer, Schoenwald, y Eggenschwiler, 2016).



Figura .2.5.1. Espacio acondicionado mediante paneles de guata de poliéster sin recubrir (Ágora Alcoy).

Mediante el empleo de diferentes capas de materiales porosos, se obtiene un material multicapa, capaz de proporcionar una mayor absorción del sonido (Cox y D'antonio, 2009), (Liu, Liu, y Su, 2015), (Bansod y Mohanty, 2016), (Tang y Yan, 2017), (Tang, Zhang, Zhuang, Zhang, y Yan, 2018).

Si consideramos la capa de tejido como una membrana perforada, éste actúa como una capa resistiva controlando la absorción de sonido del material multicapa (Chevillotte,

2012). La influencia de la densidad de hilos y pasadas de este tejido ha sido estudiada en base a ligamento tafetán empleando tejidos simples (Segura-Alcaraz, Segura-Alcaraz, Montava, y Bonet-Aracil, 2018).

En este trabajo se une una capa resistiva de tejido doble, con ligamento tafetán, con y sin pasadas de relleno a una capa de material no tejido y se determina la combinación de densidad de trama y pasadas de relleno que proporciona mayor absorción de sonido, mediante el diseño de experimentos. Los resultados muestran que la capa resistiva de tejido aumenta la absorción acústica del material multicapa creando un material textil de bajo peso, reciclable, decorativo, bajo coste, fácil de manipular, indicado para su uso en acústica arquitectónica, automoción, industria naval, ferroviaria o aviación.

2.5.2 Materiales y métodos

2.5.2.1 Materiales

Se emplea un material de dos capas formado por una doble tela con pasadas de acolchado situada sobre una guata de poliéster, sin adhesivo. En la figura 2.5.2 puede observarse la sección del material.

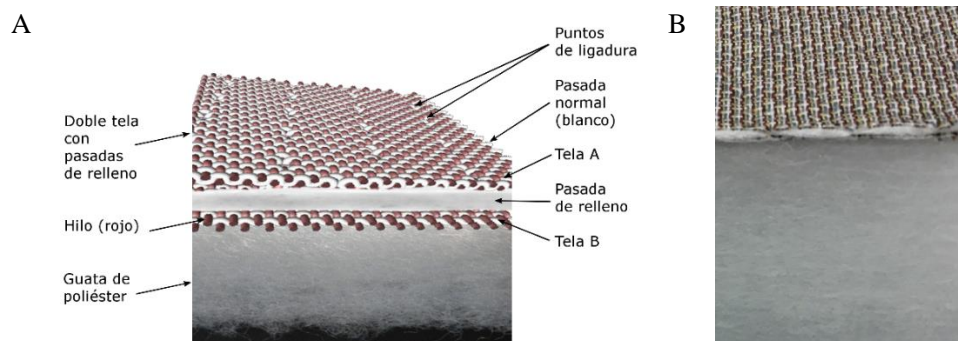


Figura 2.5.2. Material empleado. (A) Esquema de la disposición de las diferentes capas del material. (B) Fotografía.

La estructura del tejido se resume en la tabla 2.5.1. Las pasadas de relleno se insertan entre las dos telas, con retención en el telar. Así, una relación de trama de 4/1/4 significa que se inserta una trama de relleno cada cuatro tramas de la tela superior y otras cuatro de la tela inferior. Las muestras se producen con un telar Smit GS 900, controlando la densidad de trama de forma electrónica. Dichas muestras se ensayan tal y como salen del telar sin ningún tratamiento posterior. Se emplean hilos de poliéster texturizado debido a su alta capacidad de recubrimiento y por estar formados por multitud de finos filamentos que crean poros intra-hilo. Las características de los tejidos se muestran en la tabla 2.5.2.

Tabla 2.5.1. Estructura del tejido

Relación urdimbre	de	Ligamento de la tela superior	Ligamento de la tela inferior	Relación de trama	Densidad de trama (pasadas/cm)
1/1		Tafetán	Tafetán	4/0/4	45
					60
				4/1/4	45
					60

Tabla 2.5.2. Características del tejido.

Urdimbre	Densidad de urdimbre (hilos/cm)	Trama	Pasadas de relleno	Densidad de trama (pasadas/cm)
Poliéster		Poliéster	Poliéster	
167 dTex		167 dTex	330 Tex	
40 filamentos	60	40 filamentos	950 filamentos	45, 60
Continuo		Continuo	Continuo	
Texturizado		Texturizado	Texturizado	

Se emplea tejido con ligamento tafetán debido a que sus bastas de corta longitud proporcionan el mayor número de entrecruzamientos o puntos de ligadura y, por tanto, de poros inter-hilo o aberturas en el tejido, capaces de atrapar aire en ellos (Soltani y Zarrebini, 2013).

La guata de poliéster se obtiene por vía seca con consolidación térmica mediante el empleo en la mezcla de fibras con un punto de fusión más bajo. La tabla 2.5.3 muestra sus características.

Tabla 2.5.3. Características del no tejido.

Material	Densidad (g/m ²)	Longitud de fibra (mm)	Número fibras (dtex)	Sección de fibras	Espesor ensayado (mm)
Poliéster	160	63	112,33	circular maciza	45

2.5.3 Experimental

2.5.3.1 Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal

Las mediciones del coeficiente de absorción de las diferentes muestras se realizan según la norma ISO 10534-2: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. Este método permite obtener el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal empleando un tubo de ondas estacionarias, dos micrófonos, un altavoz y un sistema digital de análisis de la señal. La fuente de sonido genera ondas planas en el tubo. Se realiza la descomposición del campo interferencial midiendo la presión sonora en dos posiciones mediante micrófonos montados en la pared del tubo. A continuación, empleando una función de Matlab diseñada al efecto, se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales de los dos micrófonos, a partir de la cual se deduce el coeficiente de absorción a incidencia normal. El tubo de impedancia es un tubo estrecho, rígido y hermético que debe cumplir las condiciones que se detallan en la norma indicada.

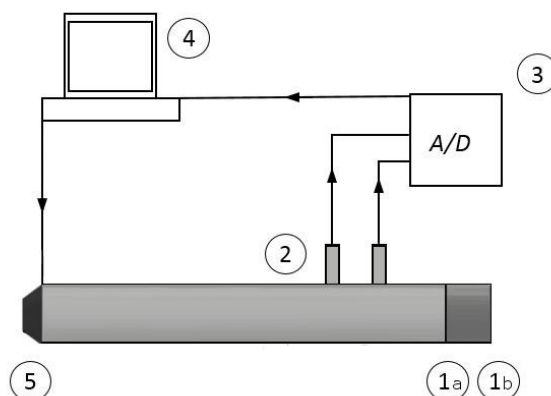


Fig. 3. Esquema del tubo de impedancia empleado para la medición del coeficiente de absorción acústica, donde: 1a) situación de la cara de tejido en la muestra; 1b) ídem del no tejido; 2) micrófonos (micrófonos G.R.A.S. modelo 40AO); 3) sistema de adquisición de datos (NI-9233); 4) PC y 5) fuente de sonido.

Para realizar las mediciones, la muestra se sitúa en el extremo del tubo de impedancia (fig. 3) sin cavidad de aire posterior. La capa de tejido se coloca en la cara más cercana a la Fuente de sonido.

2.5.3.2 *Diseño de experimentos*

Se desea estudiar el efecto de varios factores sobre el coeficiente de absorción acústica de un material obteniendo un modelo que explique las interrelaciones entre la densidad de trama, la presencia de pasadas de relleno y el coeficiente de absorción acústica del material de que forma parte el tejido. Para ello se emplea el programa Statgraphics Centurion XVII.

Dado que el coeficiente de absorción acústica suele ser diferente para distintas frecuencias, se toman las medias de las mediciones a las frecuencias centrales de los tercios de octava 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 2000, 2500, 3000, 3150, y 4000 Hz. El coeficiente de absorción acústica a cada una de estas frecuencias se considera una variable respuesta independiente. Se define un diseño factorial 2^k con $k=2$ factores experimentales y 10 variables respuesta. Para conocer el efecto de cada factor se toman dos valores considerados máximo y mínimo. Los factores experimentales son A: existencia o no de pasadas de relleno y B: densidad de trama, que se toma a dos niveles: 45 pasadas/cm y 60 pasadas/cm. El diseño tiene 12 ejecuciones (correspondientes a $2^k n = 2^2 * 3$ repeticiones), con 1 muestra por ejecución.

2.5.4 **Resultados**

2.5.4.1 *Coefficiente de absorción acústica a incidencia normal*

El coeficiente de absorción acústica de los cuatro materiales estudiado se muestra en la figura 2.5.3. Como se observa en la misma, al añadir una capa de cualquiera de los tejidos estudiados a la capa de guata, el coeficiente de absorción de sonido del conjunto aumenta de forma general.

El tejido que proporciona una menor absorción en todas las frecuencias es el correspondiente a la mayor densidad de trama y con pasadas de relleno. La gráfica no muestra claramente cual es el tejido que proporciona la mayor absorción al mayor número de frecuencias. Posiblemente este tejido es demasiado tupido y no permite el paso del aire a la zona de guata, impidiendo la degradación de la onda sonora que en ella se produce.

Por otro lado, aparece una región entre 2500 y 4000 Hz en la cual la absorción de la guata sin recubrir con tejido supera a la guata recubierta. Esta región es más amplia, de nuevo, en el caso del tejido con mayor densidad de trama y con pasadas de relleno. El coeficiente de absorción de sonido mínimo coincide en todos los tejidos a 3150 Hz. Se podría considerar como un patrón debido al tipo de material.

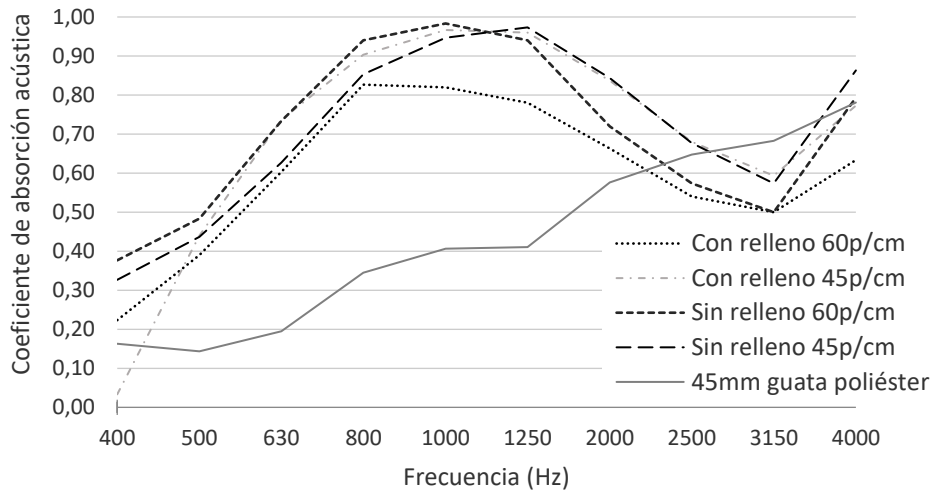


Figura 2.5.3. Coeficiente de absorción acústica del material multicapa compuesto por 45mm de no tejido y una capa del tejido estudiado, y del no tejido sin la capa de tejido.

2.5.4.2 Diseño del experimento

Como ejemplo se muestra en la figura 2.5.4, el diagrama de Pareto estandarizado para el coeficiente de absorción de sonido a 1250 Hz. En él se observa la influencia de los dos factores estudiados, así como de su interacción.

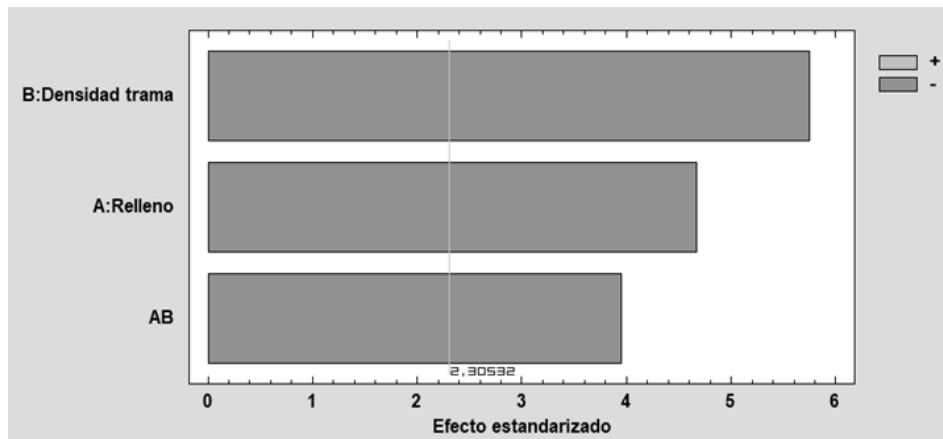


Figura. 2.5.4. Diagrama de Pareto estandarizado para el coeficiente de absorción de sonido a 1250 Hz.

En la tabla 2.5.4 se muestran las ecuaciones de regresión ajustadas a los datos para los factores estudiados y sus interacciones significativas en cada tercio de octava.

Tabla 2.5.4. Ecuaciones de regresión obtenidas

Frecuencia	Ecuación de regresión
400Hz	$-0,0683333 - 0,223333*\text{Relleno} + 0,008*\text{Densidad trama}$
500Hz	$0,465833 - 0,045*\text{Relleno} - 0,000111111*\text{Densidad trama}$
630Hz	$0,306667 + 0,83*\text{Relleno} + 0,00711111*\text{Densidad trama} - 0,016*\text{Relleno}*\text{Densidad trama}$
800Hz	$0,593333 + 0,54*\text{Relleno} + 0,00577778*\text{Densidad trama} - 0,0108889*\text{Relleno}*\text{Densidad trama}$
1000Hz	$0,836667 + 0,57*\text{Relleno} + 0,00244444*\text{Densidad trama} - 0,0122222*\text{Relleno}*\text{Densidad trama}$
1250Hz	$1,07333 + 0,426667*\text{Relleno} - 0,00222222*\text{Densidad trama} - 0,00977778*\text{Relleno}*\text{Densidad trama}$
2000Hz	$1,30083 - 0,0316667*\text{Relleno} - 0,00988889*\text{Densidad trama}$
2500Hz	$1,05083 - 0,015*\text{Relleno} - 0,00811111*\text{Densidad trama}$
3150Hz	$0,828333 + 0,01*\text{Relleno} - 0,00555556*\text{Densidad trama}$
4000Hz	$1,19583 - 0,125*\text{Relleno} - 0,007*\text{Densidad trama}$

A continuación, se utiliza un análisis de la varianza ANOVA para comprobar si los efectos experimentales (muestrales) son lo suficientemente importantes como para generalizar los resultados. La hipótesis nula considera que todas las medias de los niveles de los factores son iguales y la hipótesis alternativa que al menos una es diferente. Si el valor-P de un efecto es menor que un nivel de significación de 0,05, indica que es significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95,0%. Los resultados se resumen en la tabla 2.5.6.

Tabla 2.5.2. Análisis de la varianza

Modelo	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz
Transfor.	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno
Modelo d.f.	2	2	3	3	3
P-valor	0,0201	0,5268	0,0431	0,0008	0,0031

Error d.f.	9	9	8	8	8
Std. error	0,124529	0,066451	0,0581664	0,0212132	0,0384057
R-cuadrado	58,01	13,28	61,93	86,51	80,81
Adj. R-cuadrado	48,68	0,00	47,66	81,45	73,61
Modelo	1250Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz
Transfor.	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno
Modelo d.f.	3	2	2	2	2
P-valor	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002
Error d.f.	8	9	9	9	9
Std error	0,0321455	0,0276385	0,022464	0,0096225	0,0387896
R-cuadrado	89,80	90,94	90,85	96,21	85,52
Adj. R-cuadrado	85,98	88,93	88,81	95,36	82,30

Se han ajustado 10 modelos estadísticos a las variables respuesta. El análisis de la varianza muestra 9 de ellos con P-valor por debajo de 0,05, lo cual indica que el modelo ajustado es estadísticamente significativo al 5,0% de nivel de significación. El coeficiente de determinación o R cuadrado indica el porcentaje de variación del coeficiente de absorción acústica que es explicado por la densidad de trama y la existencia de pasadas de perdido en el tejido, o sea refleja la bondad de ajuste del modelo. Como en nuestro caso existe más de una variable explicativa es más adecuado emplear el coeficiente de determinación ajustado, el cual es inferior al R cuadrado normal. El estadístico R cuadrado ajustado muestra valores entre 0% y 95,36%.

Teniendo en cuenta que el objetivo del experimento es maximizar los coeficientes de absorción a todas las frecuencias, las características óptimas de los factores experimentales se muestran en la tabla 2.5.7. Para determinar el valor óptimo se emplea, en el programa Statgraphics, el procedimiento de Optimización de Múltiples Respuestas. Una vez construidos los modelos para la absorción a cada frecuencia por separado, se indica al programa que se pretende maximizar el coeficiente de absorción en cada una de ellas. El valor óptimo representa la combinación de factores experimentales que proporcione el valor de absorción más elevado simultáneamente en el mayor número de frecuencias posible. La deseabilidad optimizada obtenida es de 0,692402. La tabla 2.5.8 muestra los valores de los factores experimentales (dentro del rango estudiado) que permiten obtener el mayor coeficiente de absorción acústica a todas las frecuencias estudiadas.

Tabla 2.5.3. Valores de respuesta y óptimo

Respuesta	Optimizado	Predicción	Inferior 95,0% Límite	Superior 95,0% Límite	Deseabilidad
SAC400Hz	si	0,278637	0,143043	0,414231	0,580494
SAC500Hz	si	0,458208	0,385852	0,530563	0,515275
SAC630Hz	si	0,633085	0,560023	0,706148	0,418835
SAC800Hz	si	0,856251	0,829606	0,882897	0,41407
SAC1000Hz	si	0,947834	0,899593	0,996075	0,824307
SAC1250Hz	si	0,972555	0,932177	1,01293	0,971366
SAC2000Hz	si	0,853985	0,82389	0,884079	0,930368
SAC2500Hz	si	0,684957	0,660497	0,709417	0,911513
SAC3150Hz	si	0,578916	0,568439	0,589394	0,808329
SAC4000Hz	si	0,873539	0,831303	0,915776	0,889513

Tabla 2.5.4. Factores establecidos y óptimo

Factor	Establecimiento
Relleno	0,0583462
Densidad trama	45,0001

2.5.5 Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la influencia en el coeficiente de absorción de sonido de una capa resistiva de tejido sobre un no tejido. Para ello se ha utilizado el diseño de experimentos, definiendo las variables y los niveles, obteniendo los modelos de regresión para cada frecuencia estudiada, así como realizando un análisis de varianza o ANOVA para cada uno de ellos. Se han optimizado las respuestas y se han obtenido los valores de las variables que maximizan la absorción acústica.

Los resultados muestran que el empleo de tramas de relleno combinado con una densidad de trama de 60 p/cm proporcionan un coeficiente de absorción acústica inferior al resto de opciones. Sin embargo, si se desea conocer la mejor combinación para conseguir el máximo coeficiente de absorción de sonido, la gráfica no parece ser suficiente. El empleo de la técnica de diseño de experimentos permite, partiendo de tan sólo los niveles alto y bajo de cada factor experimental obtener esta combinación. En este caso, el tejido con 45 p/cm y sin tramas de relleno generan un índice de deseabilidad de 69,24%, siendo el que procuraría mayor absorción sonora al material compuesto por una capa de dicho tejido y una capa de guata de poliéster de 45mm de espesor.

Como líneas futuras, desde el punto de vista de la sostenibilidad, se estudiarán otros materiales naturales en sustitución de la lana de poliéster, como lana de oveja, fibra de coco, algas, restos agrícolas. En el caso de la capa resistiva de tejido, también es posible emplear fibras naturales como el yute, lino, algodón, etc.

Referencias

- Ágora Alcoy. [ref. de 18 de noviembre 2019]. Disponible en web:
https://m.facebook.com/photo.php?fbid=1552715731488688&id=305202786239995&set=a.309594535800820&source=54&refid=13&_tn_=%2B%3D
- Bansod, P. V. V., y Mohanty, A. R. R. (2016). Inverse acoustical characterization of natural jute sound absorbing material by the particle swarm optimization method. *Applied Acoustics*, 112, 41-52.
- Chevillotte, F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73(1), 56-60.
- Cox, T. T. J., y D'antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Psychological Science.

- Hanna, Y. I., y Kandil, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*.
- Intini, F., y Kühtz, S. (2011). Recycling in buildings: An LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 306-315.
- Jayaraman, K. A. (2005). Acoustical Absorptive Properties of Nonwovens. *fitfibers.com*. Recuperado de <http://fitfibers.com/wp-content/uploads/2018/06.0/4dg-acoustic-absorption.pdf>
- Lee, Y., y Joo, C. (2003). Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. *Autex Research Journal*, 3(2), 78-84.
- Liu, X., Liu, J., y Su, X. (2015). A computational model for the sound absorption coefficients of multi-layer non-wovens. *Textile Research Journal*, 85(15), 1553-1564.
- Lou, C. W. (2005). Recycling Polyester and Polypropylene Nonwoven Selvages to Produce Functional Sound Absorption Composites. *Textile Research Journal*, 75(5), 390-394.
- Narang, P. P. (1995). Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 45(4), 335-358.
- Nick, A., Becker, U., y Thoma, W. (2002). Improved acoustic behavior of interior parts of renewable resources in the automotive industry. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(3), 115-118.
- Pieren, R. (2012a). Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Textile Research Journal*, 82(9), 864-874.
- Pieren, R. (2012b). Sound Absorption Modelling of Thin, Lightweight Curtains. *Euronoise 2012*, (c), 815-820.
- Pieren, R., y Heutschi, K. (2015). Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method. *Applied Acoustics*, 92, 27-41.
- Pieren, R., Schäffer, B., Schoenwald, S., y Eggenschwiler, K. (2016). Sound absorption of textile curtains – theoretical models and validations by experiments and simulations. *Textile Research Journal*, 88(1), 004051751667333.
- Segura-Alcaraz, P., Segura-Alcaraz, J., Montava, I., y Bonet-Aracil, M. (2018). The Use of Fabrics to Improve the Acoustic Absorption: Influence of the Woven Fabric Thread Density over a Nonwoven. *Autex Research Journal*, 18(3), 269-280.
- Soltani, P., y Zarrebini, M. (2013). Acoustic performance of woven fabrics in relation to structural parameters and air permeability. *Journal of the Textile Institute*, 104(9), 1011-1016.
- Tang, X., y Yan, X. (2017). Multi-layer fibrous structures for noise reduction. *Journal of the Textile Institute*, 108(12), 2096-2106.
- Tang, X., Zhang, X., Zhuang, X., Zhang, H., y Yan, X. (2018). Sound absorption properties

of nonwoven fabric based multi-layer composites. *Polymer Composites*.

Watanabe, K., Minemura, Y., Nemoto, K., y Sugawara, H. (1999). Development of high-performance all-polyester sound-absorbing materials. *JSAE review*, 20(3), 357-362.

2.6 Adaptación de la comunicación: Estudio de la absorción acústica de un no tejido con capas resistivas de tejido de microfibra

Comunicación publicada en "Segura-Alcaraz, M. P., Bonet-Aracil, M. A., Segura-Alcaraz, J. G., Montava-Seguí I. J. (2015) Estudio de la absorción acústica de un no tejido con capas resistivas de tejido de microfibra. En III Congreso I+D+i Campus de Alcoi. *Creando sinergias.*"

Resumen

Los tejidos a base de microfibras se emplean en gran cantidad de usos como prendas técnicas y deportivas, o limpieza. Por otro lado, las lanas minerales ampliamente utilizadas en construcción como elementos absorbentes de sonido están siendo reemplazadas por otros materiales como la guata de poliéster. Se ha combinado una guata de poliéster no acústica con un tejido de microfibra para conseguir un producto económico, manejable, y ligero con un alto coeficiente de absorción sonora en las frecuencias de la zona del ruido de interferencia verbal.

2.6.1 Introducción

El uso de los espacios arquitectónicos define la necesidad de confort acústico, recogido en la legislación (Real Decreto 1371, 2007). La necesidad de mejora de la calidad sonora necesaria para permitir la inteligibilidad del habla aconseja el acondicionamiento acústico de locales como salas de conferencias, comedores, restaurantes, etc. Para ello es necesario el empleo de materiales que permitan la reducción de los tiempos de reverberación, y por tanto de los niveles sonoros. Para medir el nivel de ruido de interferencia verbal se emplea (Real Decreto 286, 2006) la media aritmética de los niveles de presión sonora

en las bandas de octava en las frecuencias conversacionales de 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz.

Existen distintos tipos de materiales empleados para acondicionamiento acústico. Entre ellos, los absorbentes porosos o fibrosos, entre los que se considera la guata de poliéster (Narang, 1995), (Garai y Pompoli , 2005).

Debido a la necesidad de protección de los materiales fibrosos, por necesidades de limpieza, de resistencia mecánica, para evitar que desprendan partículas, o por motivos estéticos, se recurre al recubrimiento de los mismos mediante velos acústicamente transparentes, paneles ligeros o láminas micro-perforadas flexibles o no, de varios materiales. Si la capa porosa no puede vibrar, la resistencia del material de recubrimiento se suma a la impedancia del absorbente poroso. Si la cubierta puede vibrar, el efecto del movimiento de su masa puede ser significativo. En estos casos, se pueden formar sistemas resonadores. Este efecto es estudiado por Chevillotte (Chevillotte, 2012).

En este caso se ha empleado un tejido de microfibra para recubrir el material fibroso. Existe documentación acerca del uso de tejidos de microfibras en (Na et al., 2007) absorción acústica, que describe la adecuación del empleo de hilados a base de filamentos muy finos con mayor superficie de contacto con el aire que permiten una mayor disipación de energía sonora.

2.6.2 Métodos experimentales

2.6.2.1 Materiales

Como no tejido se emplea guata de poliéster Todotherm STD-21/160 de Todofil Baneta S.A. Rubí Industrial. Posee una densidad de 160 g/m² y un grosor aproximado de 15mm.

Como capa resistiva se emplea un tejido de microfibra de calada con ligamento de diagonales fabricado en poliéster y poliamida 80/20.

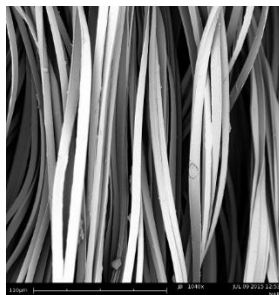


Figura 2.6.1. Vista del tejido de microfibra.

Las combinaciones ensayadas son

- a) Una capa de no tejido.
- b) Una capa de tejido y una capa de no tejido, siendo la capa de tejido la más próxima a la fuente de sonido.
- c) Una capa de no tejido y una capa de tejido a ambos lados.

2.6.2.2 *Ensayo en tubo de impedancia*

Para realizar las mediciones del coeficiente de absorción de las distintas muestras se sigue el método que se describe en la Norma ISO 10534-2: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, parte 2: Método de la función de transferencia

Los componentes del equipo cuyo esquema aparece en la figura 2.6.2. son:

- 1.- Muestra de material.
- 2.- Dos micrófonos G.R.A.S modelo40 AO.
- 3.- Sistema de adquisición de señal (NI-9233).
- 4.- PC.
- 5.- Fuente de sonido.

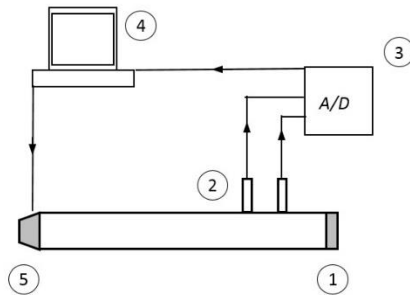


Figura 2.6.2. Esquema del equipo de medida.

Para realizar el ensayo se coloca la muestra en uno de los extremos del tubo de impedancia, sin cámara de aire posterior. La muestra debe ajustarse bien al porta muestras sin ser comprimida indebidamente ni ajustada tan firmemente que quede abombada. Se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente sonora y se miden las presiones en dos posiciones cercanas a la muestra. Empleando una función de Matlab diseñada a tal efecto, se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa en este caso para calcular el coeficiente de absorción para incidencia normal a partir del coeficiente de reflexión.

El coeficiente de reflexión se determina mediante la siguiente ecuación:+

$$r = \frac{H_{12} \cdot H_i}{H_R \cdot H_{12}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1} \quad \text{Ecuación 2.6.1}$$

Dónde:

H_{12} es la función de transferencia compleja,

H_R es la función de transferencia de la onda reflejada,

k_0 es el número de onda complejo y x_1 es la distancia desde la muestra hasta la última posición del micrófono.

Y el coeficiente de absorción acústica para incidencia normal se determina con la ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \text{Ecuación 2.6.2}$$

2.6.3 Resultados y discusión

Como muestra la figura 2.6.3, la muestra de guata de 15 mm proporciona una absorción inferior a 0,4 en todas las frecuencias estudiadas. Este resultado es el esperado debido al tipo de guata (no acústica) y el pequeño grosor empleado.

Al añadir una capa de tejido de microfibras se obtiene una modificación significativa de la absorción produciéndose dos efectos:

- Por un lado aumenta el valor del coeficiente de absorción.

- Por otro lado se disminuye la frecuencia de máxima absorción.
- Además la curva ya no es plana, lo que indica que ha aumentado la selectividad de la absorción.

Al añadir una segunda capa de tejido, a pesar de que esta nueva capa se encuentra en contacto con la pared rígida, se modifica de nuevo la gráfica de absorción. En este caso:

- El valor del coeficiente de absorción máximo no varía, y la curva tiene una forma muy similar.
- Se disminuye la de nuevo la frecuencia de máxima absorción.

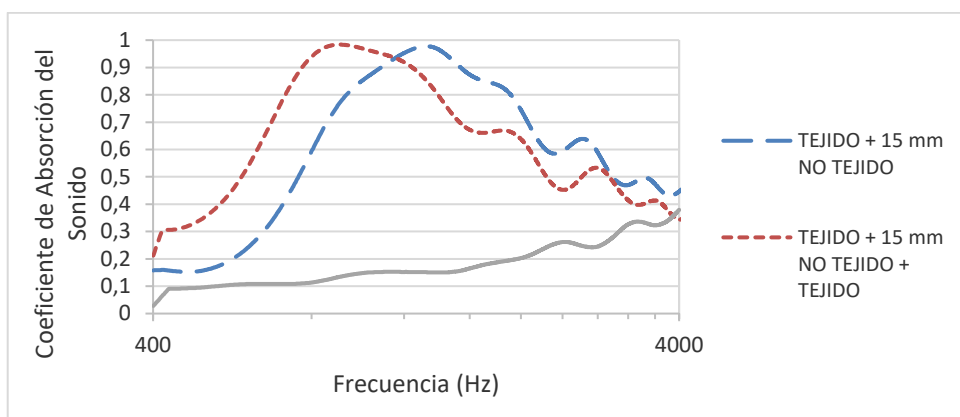


Figura 2.6.3. Coeficiente de absorción de sonido de las muestras ensayadas.

2.6.4 Conclusiones

Al añadir una capa de tejido de microfibras se produce una modificación de la absorción del conjunto tela-guata. La causa puede ser que se forma un material compuesto tipo resonador de Helmholtz. En este tipo de resonador es de especial interés la zona del cuello que es la zona donde la velocidad es mayor y donde el efecto viscoso es más importante, y en este caso estaría formado por hilos de microfibras. Además, los hilos paralelos formarían unos poros en forma de rejilla, aumentando las pérdidas viscosas del conjunto. La selectividad en la absorción aumenta también al disminuir el tamaño de los poros de la capa resistiva.

Al añadir la segunda capa se desplaza la curva hacia frecuencias algo más bajas, posiblemente por la vibración de las microfibras como “cuerdas”, ya que al estar en contacto con la pared rígida, no se espera absorción por fricción.

Referencias

Chevillotte F. (2012). Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics*, 73, 56–60.

- Garai M and Pompoli F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*, 66, 1383–1398.
- Narang PP. (1995) Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 45, 335–358.
- 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.
- Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- Y. Na et al. Sound Absorption Coefficients of Micro-fiber Fabrics. (2007). *Textile Research Journal*, 77, 330-335.

2.7 Adaptación de la comunicación: Influencia de la aplicación de una resina acrílica en la absorción acústica de un material textil compuesto

Comunicación publicada en "Segura-Alcaraz, M. P., Bonet-Aracil, M. A., Segura-Alcaraz, J. G., Montava-Seguí I. J. (2017) Influencia de la aplicación de una resina acrílica en la absorción acústica de un material textil compuesto. En *V Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias.*"

Resumen

El tratamiento de un tejido de rizo a base de microfibras, que constituye la capa resistiva de un material textil compuesto, con una resina acrílica no afecta negativamente a su capacidad de absorción del sonido, incluso la mejora levemente. Esto abre la puerta al uso de dicha resina como ligante de diferentes productos susceptibles de mejorar dicha absorción. Esta fijación permite mejorar las características de manejo, uso y disfrute del material a obtener.

2.7.1 Introducción

La contaminación acústica es causa de falta de confort y puede afectar a la salud. La exposición a un ruido excesivo es la causa más prevalente de pérdida de audición, y depende tanto de la intensidad del sonido como del tiempo de exposición al mismo. La exposición continua un ambiente ruidoso producir efectos cardiovasculares (WHO, 2017), (WHO, 1999), cefaleas, estrés, falta de sueño, etc., sobre todo en la infancia y adolescencia. La pérdida de audición inducida por el ruido es insidiosa, comenzando en la adolescencia y afectando a las frecuencias más altas en primer lugar.

El ruido en el interior de salas puede deberse al ambiente exterior, diseño y acústica de la sala, y a las actividades de los ocupantes. Una de estas actividades es el habla. El sonido emitido al hablar se refleja en las paredes, el suelo y el techo del local en un porcentaje que depende del material que forme estos elementos, produciendo reverberación. Si no se reflejase en absoluto, la situación sería como estar al aire libre.

Una de las formas más comunes para la eliminación de las reverberaciones es el empleo de materiales absorbentes acústicos. Entre éstos destacan los materiales porosos de tipo fibroso como las lanas minerales o la guata de poliéster. Esta última presenta la ventaja de su bajo peso, y fácil manejo.

Es posible recubrir el material poroso con un tejido para mejorar su aspecto estético y también para modificar su absorción, todo ello sin aumentar prácticamente su espesor, añadiendo una capa de tejido (Chevillotte, 2012).

El tratamiento de textiles con resinas acrílicas puede proporcionar impermeabilidad, resistencia a la abrasión, etc. Uno de los usos de estas resinas es como medio de fijación de micro cápsulas. Entre sus ventajas destaca la resistencia a las radiaciones UV, al frote, a algunos productos químicos y al agua, junto a su bajo precio.

2.7.2 Métodos experimentales

2.7.2.1 Materiales

El no tejido empleado es una guata de poliéster obtenida por unión térmica con fibras de unión. Las fibras que lo componen son lisas, macizas, de sección redonda y tras ser analizadas con Vibroscopio Lenzing Instruments se ha hallado un título de 12,33 dtex. El no tejido tiene una densidad de 160 g/m² y un grosor de 15 mm.

El tejido está compuesto a base de microfibra con una composición mezcla de poliéster y poliamida 80/20 y ligamento de rizo.

La resina empleada es el ligante de estampación pigmentaria Resina Center STK/100. Es un copolímero acrílico/estireno.

Preparación de las muestras

Se trata únicamente el tejido, no así el no tejido. Se realizan dos pases de foulard con las concentraciones descritas en la tabla 1. A continuación secado con aire a 80°C y polimerizado 2 min en cinta a 110°C.

Tabla 1. Concentración de resina

Muestra	Concentración (g/L)
1	75
2	50
3	25
4	10

2.7.2.2 Ensayo en tubo de impedancia

Se mide el coeficiente de absorción de las distintas muestras de tejido tratado en combinación con no tejido, sin cámara de aire posterior. Se consideran tres espesores de no tejido. Para ello se superponen dos capas para alcanzar el espesor de 30mm y tres capas para 45mm.

Las mediciones se realizan siguiendo el método descrito en la Norma ISO 10534-2: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, parte 2: Método de la función de transferencia. Se emplea la configuración mostrada en la figura 2.7.1.

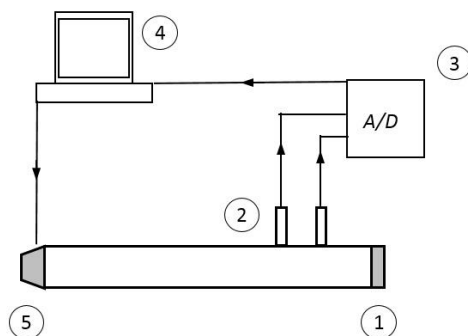


Figura 2.7.1. Esquema del tubo de impedancia empleado para medir el coeficiente de absorción de sonido, en el que 1) es la muestra, 2) los micrófonos G.R.A.S. modelo 40AO, 3) el sistema de adquisición de datos NI-9233, 4) el PC, y 5) la fuente de sonido.

2.7.3 Resultados y discusión

Se ha medido la absorción de las muestras a dos niveles de concentración: 10 g/L y 75 g/L, y se han comparado con el tejido sin tratar, añadiendo 15, 30 y 45 mm de guata. Se

ha utilizado una capa de tejido y una capa de guata situando el tejido en la cara más cercana al altavoz.

La figura 2.7.2 muestra los coeficientes de absorción del conjunto tejido + no tejido empleando distintos grosores de no tejido y distintas concentraciones de resina.

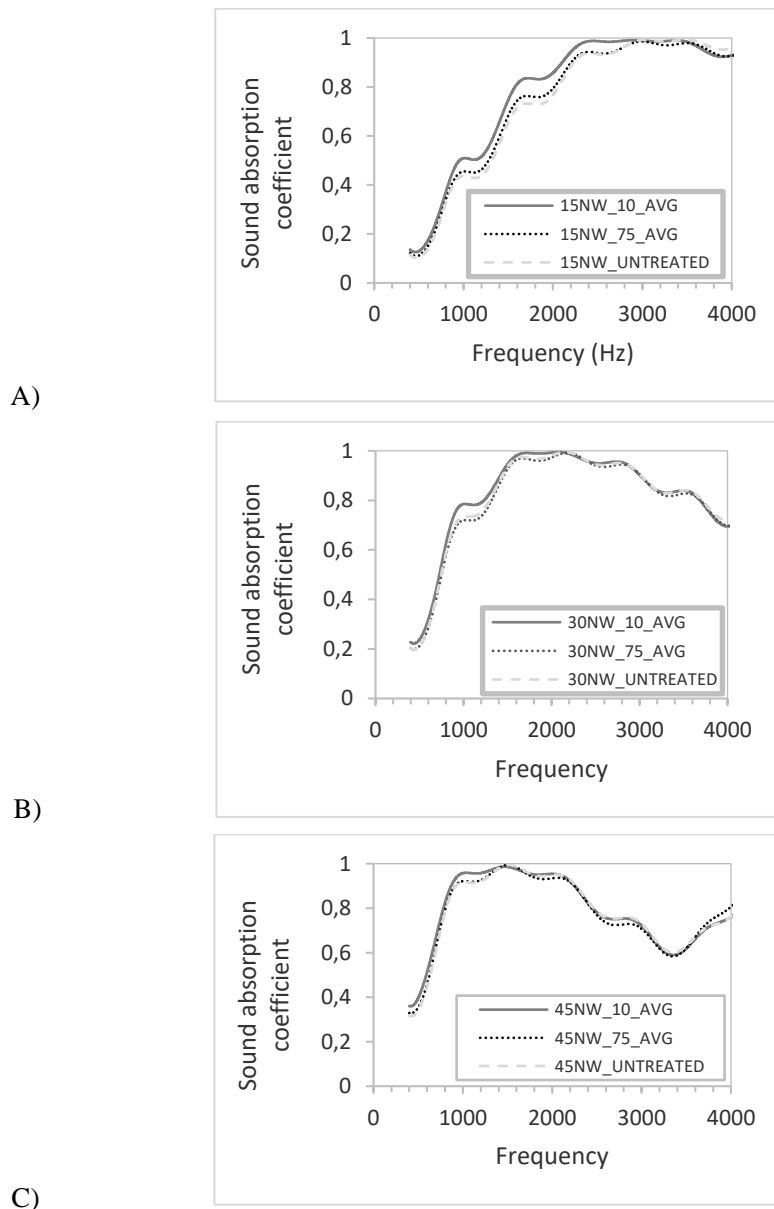


Figura 2.7.2. A) Coeficiente de absorción de sonido para el conjunto formado por tejido de rizo de microfibra y no tejido de 15 mm de espesor. B) ídem con 30 mm. C) ídem con 45 mm.

La muestra de la figura 2.7.2A) con 15 mm de guata y 10 g/L de resina mejora la absorción del tejido sin tratar. Sin embargo, al aumentar el espesor de la guata esta mejora se reduce progresivamente, de forma que con 45mm de guata, la mejora es imperceptible, como se puede ver en la figura 2.7.2C). En la figura 2.7.2 también se puede apreciar que la concentración máxima de resina utilizada no produce una mejora importante para ningún espesor de guata. Si bien, tampoco produce ningún descenso en la absorción del conjunto.

En la figura 2.7.3 se muestran las fibras tras la aplicación de distintas concentraciones de resina, comparativamente a las fibras sin tratar. Los canales que forman dichas fibras se aprecian más rellenos a medida que aumenta la concentración de resina. Además, aparecen unos restos de resina en forma de hilillos y laminillas que unen unas fibras a otras, en algunos puntos.

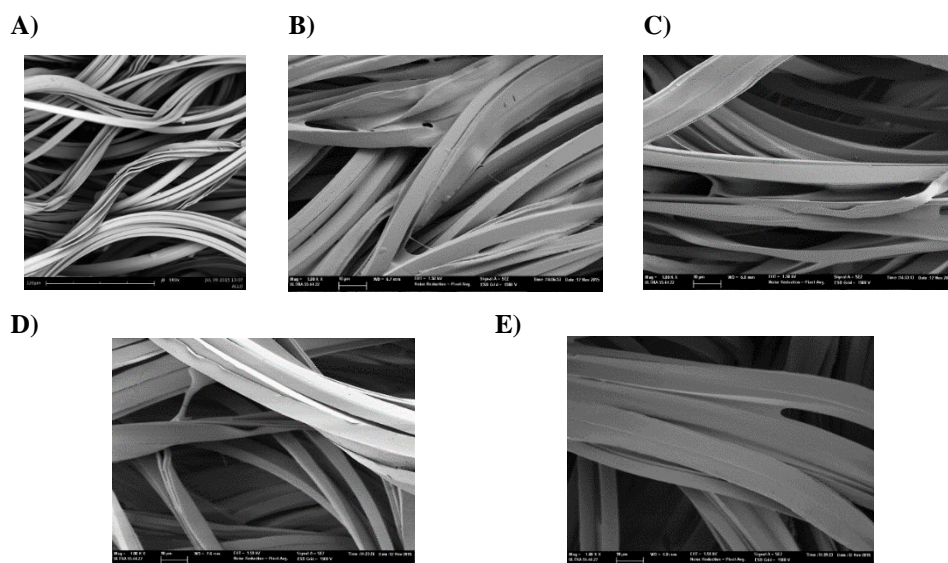


Figura 2.7.3. Imágenes SEM del tejido de microfibra: A) sin tratar. Y el mismo tejido aplicar distintas concentraciones de Resina Center STK/100: B) 10 g/L, C) 25 g/L, D) 50 g/L y E) 75 g/L

2.7.4 Conclusiones

Se ha comprobado que el tratamiento con una resina acrílica entre 10 y 75 g/L sobre un tejido de rizo de microfibra no produce ningún efecto negativo en la absorción del conjunto formado por dicho tejido y un no tejido de espesores entre 15 y 45 mm.

La concentración más adecuada y que es capaz de proporcionar un aumento del coeficiente de absorción para 15 mm de espesor es la mínima ensayada, que corresponde a 10 g/L.

Como líneas futuras queda pendiente aplicar diversos tratamientos empleando esta resina como ligante.

Referencias

Chevillotte, F. Controlling sound absorption by an upstream resistive layer. *Applied Acoustics* 73, 56-60 (2012).

Lindval T., Schwela D., WHO Guidelines for Community Noise, World Health Organization, Geneva. (1999).

World Health Organization. *Children's Health and the Environment. Noise. WHO Training Package for the Health Sector*. Accessed 3 July 2017 at http://www.who.int/ceh/capacity/training_modules/en/

2.8 Adaptación de la comunicación: Influencia del recubrimiento con carbón activado en la absorción acústica de un material compuesto a base de tejido de yute

Comunicación publicada en "Segura-Alcaraz, M. P., Bonet-Aracil, M. A., Segura-Alcaraz, J. G., J. Gisbert-Payá. (2018). Influencia del recubrimiento con carbón activado en la absorción acústica de un material compuesto a base de tejido de yute. En *VI Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias.*"

Resumen

La aplicación de carbón activado granular sobre un tejido de yute, el cual actúa como capa resistiva de un material textil compuesto modifica la capacidad de absorción del sonido del conjunto. La aplicación se realiza empleando una resina acrílica como ligante, y el carbón es añadido por pulverizado para evitar la obstrucción de sus poros.

2.8.1 Introducción

Los materiales empleados tradicionalmente para la absorción del sonido suelen ser no biodegradables como la fibra de vidrio o las espumas poliméricas. Sin embargo, algunos materiales naturales como el yute están comenzando a usarse también en campos como la automoción, la construcción, el mueble, etc. (Fatima & Mohanty, 2011). El yute es un material no abrasivo, poroso, higroscópico, que se puede combinar con otros materiales para mejorar sus propiedades (Satyanarayana, Sukumaran, Mukherjee, Pavithran, & Pillai, 1990) (Zakriya, Ramakrishnan, Gobi, Palaniswamy, & Srinivasan, 2017).

El carbón activado tiene una superficie específica muy alta, hasta 2500 m²/g y un volumen de microporos de hasta 1.6 ml/g (Suzuki, 1993). El carbón granulado es un material abundante y de bajo precio, que se obtiene a partir de madera (Jiang, Chen, & Parikh, 2009). El carbón activado puede ser aprovechado para aumentar la absorción del sonido a bajas frecuencias (Bechwati et al., 2012).



Figura 2.8.1. Esquema de una sección de gránulo de carbón activado donde se observan en blanco os poros abiertos y en gris los cerrados.

El tratamiento de textiles con resinas acrílicas puede proporcionar impermeabilidad, resistencia a la abrasión, etc. En este trabajo se emplea una resina como medio de fijación de gránulos de carbón. Entre sus ventajas destaca la resistencia a las radiaciones UV, al frote, a algunos productos químicos y al agua, junto a su bajo precio. El empleo de este tipo de resina no altera significativamente la absorción de sonido (Segura, Bonet, Segura & Montava, 2017).

2.8.2 Métodos experimentales

2.8.2.1 Materiales

El no tejido empleado es una guata de poliéster, cuyas fibras tienen un grosor de 12,33 dtex. El no tejido tiene una densidad de 480 g/m² y un grosor de 45 mm.

Se emplea un tejido de yute, cuyas características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del material de yute empleado

Material	Ligamento	Densidad de urdimbre (h/cm)	Densidad de trama (p/cm)	Densidad superficial (g/cm ²)
Yute	Tafetán	6.2	5.2	30

La resina empleada es el copolímero acrílico/estireno Resina Center BC. Su uso común es como ligante de estampación pigmentaria.

Preparación de las muestras

Se trata únicamente el tejido. La resina se aplica mediante estampación con la concentración mostrada en la tabla 2. Seguidamente se espolvorean las partículas de carbón activado. Estas partículas han sido previamente tamizadas, separando dos tamaños de grano. A continuación, el tejido se seca y polimeriza 5 min en cinta a 110°C.

Tabla 2. Composición de la pasta de estampación

	Concentración (g/kg)
Lutexal CSN liq	30
Resina Center BC	10

2.8.2.2 Ensayo en tubo de impedancia

Se mide el coeficiente de absorción de las distintas muestras de tejido tratado en combinación con no tejido, situando el tejido con la cara recubierta en la parte más cercana a la fuente de sonido. Se mide el conjunto formado por una y dos capas de tejido, más una capa de no tejido. Se utiliza un espesor de no tejido de 45mm, sin cámara de aire posterior.

Las mediciones se realizan siguiendo el método descrito en la Norma ISO 10534-2: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, parte 2: Método de la función de transferencia. Se emplea la configuración mostrada en la figura 2.8.2.

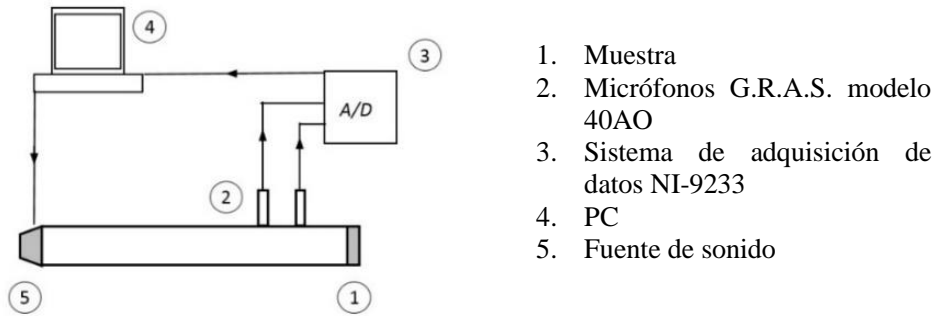


Figura 2.8.2. Esquema del tubo de impedancia empleado para medir el coeficiente de absorción de sonido.

2.8.3 Resultados y discusión

Se ha medido la absorción de sonido de las muestras formadas por: una capa de no tejido más una capa de tejido tratado y sin tratar, y una capa de no tejido más dos capas de tejido tratado y sin tratar con carbón activado.

La figura 2.8.3 muestra los coeficientes de absorción del conjunto formado por una capa de tejido más una capa de no tejido. En ella se observa que la aplicación de gránulos de carbón activado sobre una cara del tejido de yute mejora ligeramente la absorción a todas las frecuencias excepto a aquellas situadas entre 1944 y 3201 Hz si los gránulos son más gruesos, y entre 2276 y 2955 Hz si los gránulos son más finos. El tamaño menor de los gránulos mejora ligeramente la absorción en las frecuencias entre 1171 y 3487 Hz.

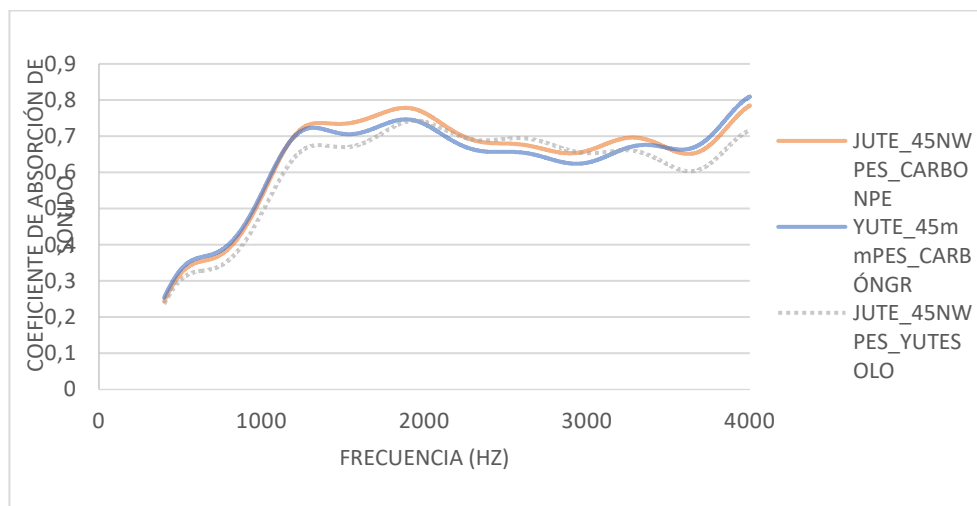


Figura 2.8.3. Coeficiente de absorción de sonido para el conjunto formado por tejido de yute y no tejido de poliéster de 45 mm de espesor.

La figura 2.8.4 muestra los coeficientes de absorción del conjunto formado por dos capas de tejido tratado con gránulos grandes más una capa de no tejido. El valor de 0,5 para el coeficiente de absorción de sonido se alcanza a los 711 Hz, alcanzándose los 0,93 a 4000 Hz. La absorción mejora a la del tejido sin tratar significativamente en todas las frecuencias excepto en las situadas entre 2258 y 3090Hz.

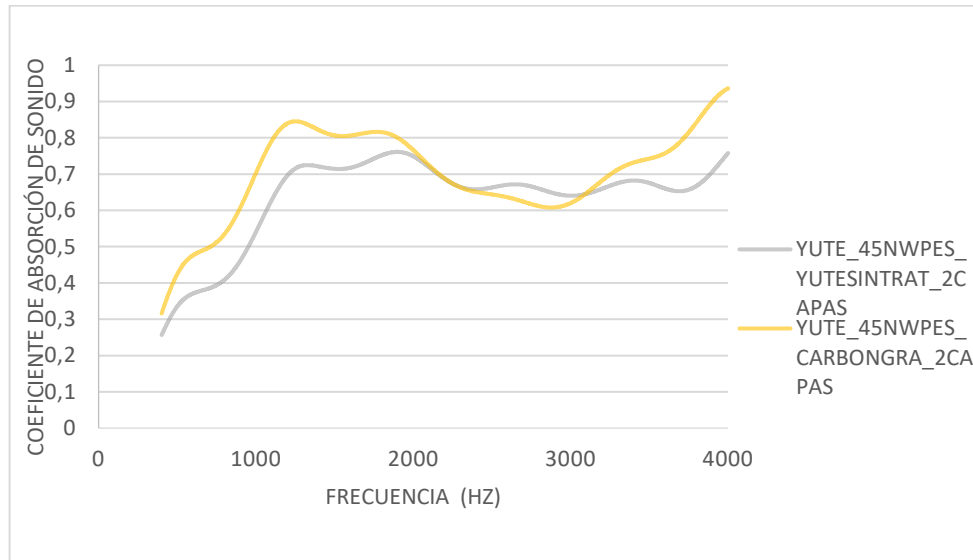


Figura 2.8.4. Coeficiente de absorción de sonido para el conjunto formado por dos capas de tejido de yute y no tejido de poliéster de 45 mm de espesor.

2.8.4 Conclusiones

Se ha estudiado la absorción acústica de un material compuesto formado por una capa de guata de poliéster de 45 mm de espesor y una capa resistiva de tejido de yute. Se ha modificado la capa resistiva mediante la aplicación de gránulos de carbón activado de dos tamaños sobre el tejido. Se ha comprobado que el menor tamaño de los gránulos proporciona mejores resultados de absorción acústica. Por otro lado, se ha modificado la capa resistiva, duplicándola, y se ha comprobado que se mejora la absorción a frecuencias por debajo de 2000 Hz.

Como líneas futuras se propone emplear una guata de yute para mejorar la sostenibilidad del compuesto.

Referencias

- Bechwati, F., Avis, M. R., Bull, D. J., Cox, T. J., Hargreaves, J. A., Moser, D., ... Venegas, R. (2012). Low frequency sound propagation in activated carbon. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(1), 239-248.
- Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72(2-3), 108-114.
- Jiang, N., Chen, J. Y., & Parikh, D. V. (2009). Acoustical evaluation of carbonized and activated cotton nonwovens. *Bioresource Technology*, 100(24), 6533-6536.
- Satyanarayana, K. G., Sukumaran, K., Mukherjee, P. S., Pavithran, C., & Pillai, S. G. K. (1990). Natural fibre-polymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 12(2), 117-136.
- Segura, M. P., Bonet, M. A., Segura, J. G., Montava, I.J. (2017) 'Influencia de la aplicación de una resina acrílica en la absorción acústica de un material textil compuesto', V Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias.
- Suzuki, M. (1993). Activated carbon fiber: Fundamentals and applications. *Elsevier Science Ltd*, 32(4), 577-586.
- Zakriya, M., Ramakrishnan, G., Gobi, N., Palaniswamy, N. K., & Srinivasan, J. (2017). Jute-reinforced non-woven composites as a thermal insulator and sound absorber - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(3), 206-213.

2.9 Adaptación de la comunicación: Influencia del recubrimiento con polvo de turmalina en la absorción acústica de un material compuesto a base de yute

Comunicación publicada en "Segura-Alcaraz, M. P., Bou-Belda, E., Segura-Alcaraz, J. G., J. Gisbert-Payá. (2018). Influencia del recubrimiento con polvo de turmalina en la absorción acústica de un material compuesto a base de yute. En *VI Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias.*"

Resumen

La modificación de la capa resistiva de un material absorbente acústico formado por una capa de guata de poliéster y un tejido de yute, por recubrimiento con polvo de turmalina, mejora la capacidad de absorción del sonido del conjunto. El polvo de turmalina es aplicado mediante pulverización sobre el tejido recubierto con una capa de resina acrílica, empleada como ligante. Se estudian dos espesores de guata diferentes y dos tamaños de partículas distintos.

2.9.1 Introducción

La fibra de vidrio y las espumas poliméricas son los materiales acústicos mayormente empleados. Estos materiales no son biodegradables. El yute es una fibra textil vegetal, y por tanto biodegradable, que está comenzando a ser utilizada en campos como la automoción, la construcción, el mueble, etc. (Fatima y Mohanty, 2011). El yute es un material no abrasivo, poroso, higroscópico, que puede ser combinado con otros materiales para mejorar sus propiedades térmicas y acústicas (Satyanarayana, Sukumaran, Mukherjee, Pavithran, y Pilla, 1990), (Zakriya, Ramakrishnan, Gobi, Palaniswamy, y Srinivasan, 2017).

No se han encontrado trabajos sobre el empleo de polvo de turmalina como tratamiento en absorción acústica. En acabados superabsorbentes de tejidos se emplean materiales como caolín, atapulgita, humatos, mica, bentonita, montmorillonita y silicato de sodio (Glampedaki y Dutschk, 2015). También se fabrican paneles absorbentes de sonido empleando tablero de silicato de calcio (Patente N° CN202227623U, 2012). La turmalina es un silicato con propiedades piezoeléctricas naturales.

Las resinas acrílicas se utilizan como ligantes en no tejidos. También para recubrimientos textiles, proporcionando impermeabilidad, resistencia a la abrasión, solidez a la limpieza en seco, etc. En este trabajo se utiliza una resina para fijar el polvo de turmalina. Entre sus ventajas destaca la resistencia a las radiaciones UV, al frote, a algunos productos químicos y al agua, junto a su bajo precio. El empleo de este tipo de resina no altera significativamente la absorción de sonido (Segura, Bonet, Segura, Montava, 2017).

2.9.2 Métodos experimentales

2.9.2.1 Materiales

El no tejido empleado es una guata de poliéster, cuyas fibras tienen un grosor de 12,33 dtex. El no tejido tiene una densidad de 160 g/m² y un grosor de 45 mm.

Se emplea un tejido de yute, con ligamento tafetán. La densidad de urdimbre está alrededor de 6 h/cm y la de trama de 5 h/cm. La densidad superficial es de 30 g/cm².

La resina aplicada es el ligante de estampación pigmentaria Resina Center BC. Es un copolímero acrílico/estireno.

El polvo de turmalina blanca utilizado es de dos tipos, como aparece en la tabla 2.9.1.

Tabla 2.9.1. Características del material de recubrimiento empleado

Material	Tamaño de las partículas de polvo	Fórmula
Polvo de	< 3 µm	Na(LiAl) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄

turmalina blanca		
Polvo de turmalina blanca	40 - 50 μm	$\text{Na}(\text{LiAl})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$

Preparación de las muestras

Se trata únicamente el tejido. Se aplica la resina por estampación con la concentración mostrada en la tabla 2.9.2. Seguidamente se espolvorean las partículas de silicato. Estas partículas son de dos tamaños distintos: 3 y 40 μm . A continuación, el tejido se seca y polimeriza 5 min en cinta a 110°C.

Tabla 2.9.2. Composición de la pasta de estampación

	Concentración (g/kg)
Lutexal CSN liq	30
Resina Center BC	10

2.9.2.2 Ensayo en tubo de impedancia

Se mide el coeficiente de absorción del material formado por una capa de tejido tratado y una capa de no tejido, situando el tejido con la cara recubierta en la parte más cercana a la fuente de sonido. Se utiliza un espesor de no tejido de 45 mm, sin cámara de aire posterior.

Las mediciones se realizan según el método descrito en la Norma ISO 10534-2: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, parte 2: Método de la función de transferencia. Se emplea la configuración mostrada en la figura 2.9.1.

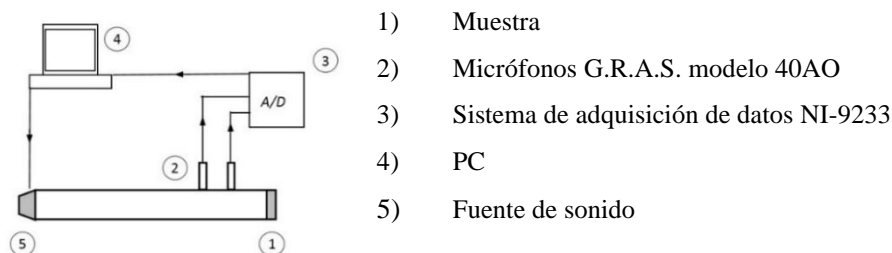


Figura 2.9.1. Esquema del tubo de impedancia empleado para medir el coeficiente de absorción de sonido.

2.9.3 Resultados y discusión

Se ha medido la absorción acústica de las muestras formadas por: una capa de no tejido más una capa de tejido tratado con polvo de turmalina de 3 y 40 μm , y la de una capa de no tejido más una capa de tejido sin tratar.

La figura 2.9.2 muestra los coeficientes de absorción del conjunto formado por una capa de tejido más una capa de no tejido de poliéster de 30 mm de espesor. En ella se muestra que la aplicación de turmalina sobre una cara del tejido de yute aumenta la capacidad de absorción de sonido del conjunto, sobre todo entre 1000 y 4000 Hz. El tamaño mayor de las partículas mejora muy escasamente la absorción en todas las frecuencias.

	Frecuencia (Hz)									
	400	500	630	800	1000	1250	2000	2500	3150	4000
Yute30NwTur3	0,17	0,22	0,24	0,26	0,37	0,51	0,67	0,72	0,72	0,62
Yute30NwTur40	0,17	0,22	0,24	0,27	0,38	0,53	0,69	0,74	0,74	0,64
Yute30NwSin	0,17	0,21	0,23	0,25	0,34	0,46	0,58	0,63	0,65	0,59

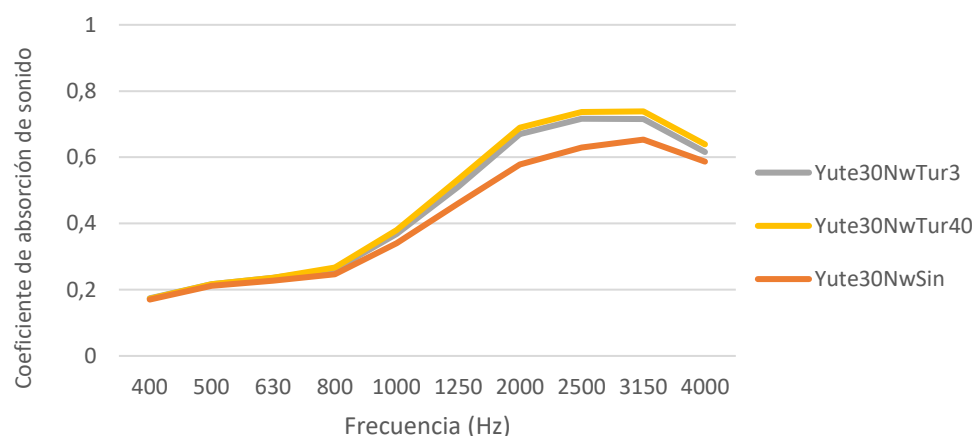


Figura 2.9.2. Coeficiente de absorción de sonido para el conjunto formado por tejido de yute y no tejido de poliéster de 30 mm de espesor. Yute30NwTur3: tejido de yute más no tejido de poliéster y turmalina de 3 μm ; Yute30NwTur40: tejido de yute más no tejido de poliéster y turmalina de 40 μm ; Yute30NwSin: tejido de yute sin tratar más no tejido de poliéster.

La figura 2.9.3 muestra los coeficientes de absorción del conjunto formado por una capa de tejido más una capa de no tejido de poliéster de 45 mm de espesor. El tamaño mayor de las partículas mejora ligeramente la absorción hasta 2000 Hz. En la octava de 2500 Hz, la mayor absorción se obtiene con el yute sin tratar, y a partir de ahí, el tejido tratado con partículas de 3 μm es el que proporciona mejores resultados.

	Frecuencia (Hz)									
	400	500	630	800	1000	1250	2000	2500	3150	4000
Yute45NwTur3	0,26	0,33	0,37	0,42	0,56	0,72	0,75	0,67	0,66	0,77
Yute45NwTur40	0,26	0,35	0,39	0,43	0,58	0,74	0,75	0,67	0,64	0,76
Yute45NwSin	0,24	0,30	0,33	0,36	0,49	0,65	0,73	0,69	0,65	0,68

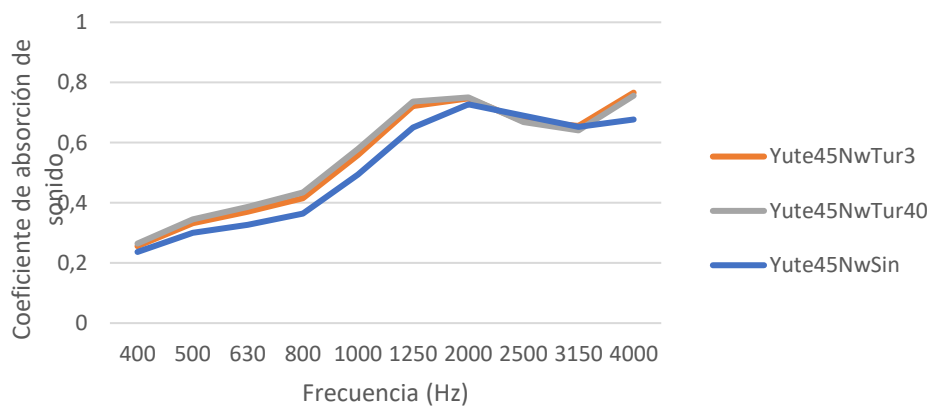


Figura 2.9.3. Coeficiente de absorción de sonido para el conjunto formado por tejido de yute y no tejido de poliéster de 45 mm de espesor. Yute45NwTur3: tejido de yute más no tejido de poliéster y turmalina de 3 μm ; Yute45NwTur40: tejido de yute más no tejido de poliéster y turmalina de 40 μm ; Yute45NwSin: tejido de yute sin tratar más no tejido de poliéster.

2.9.4 Conclusiones

Se ha estudiado la absorción acústica de un material compuesto formado por una capa de guata de poliéster de 30 y 45mm de espesor y una capa resistiva de tejido de yute. Se ha modificado la capa resistiva mediante la aplicación de partículas de turmalina de dos tamaños sobre el tejido. Se ha observado que el recubrimiento con partículas de turmalina

de 3 y 40 μm mejora la absorción del conjunto, especialmente si el espesor de la guata es de 30 mm. Al aumentar el espesor de la guata a 45 mm, el tratamiento no afecta tanto a la absorción, llegando a producir el efecto contrario al deseado alrededor de 2500 Hz. En ninguno de los casos se han obtenido absorciones superiores a 0,5 a frecuencias inferiores a 1000 Hz.

Como líneas futuras se propone emplear una guata de yute para mejorar la sostenibilidad del compuesto. También se debería de probar otra forma de aplicación de la turmalina y otras disposiciones.

Referencias

- Fatima, S., y A. R. Mohanty. «Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials». *Applied Acoustics* 72, n.º 2-3 (febrero de 2011): 108-14.
- Glampedaki, P., y V. Dutschk. «9 – Superabsorbent finishes for textiles». En *Functional Finishes for Textiles*, 283-302, 2015.
- Jiangsu Kanghui Calcium Silicate Board Co Ltd. CN202227623 (U). Sound-absorption calcium silicate board. CN20112249237U 20110715, issued 2012. <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&FT=D&date=20120523&CC=CN&NR=202227623U&KC=U#>.
- Qiujun, G. (2012) CN Patente N° 202227623U. Beijing, CNIPA.
- Satyanarayana, K. G., K. Sukumaran, P. S. Mukherjee, C. Pavithran, y S. G.K. Pillai. «Natural fibre-polymer composites». *Cement and Concrete Composites* 12, n.º 2 (1990): 117-36.
- Zakriya, Mohamed, G. Ramakrishnan, N. Gobi, N. K. Palaniswamy, y J. Srinivasan. «Jute-reinforced non-woven composites as a thermal insulator and sound absorber - A review». *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 36, n.º 3 (2017): 206-13.

2.10 Adaptación de la comunicación: Application of PCM binded with resine on a composite material made of a polyester nonwoven and a jute fabric resistive layer

Comunicación publicada en: " Segura-Alcaraz, P., Bonet-Aracil, M., Segura-Alcaraz, J., & Montava-Seguí, I.(2019) Application of pcm binded with resine on a composite material made of a polyester nonwoven and a jute fabric resistive layer. *Annals of the University of Oradea. Fascicle of Textiles, Leatherwork*

Abstract

Thermal and acoustic conditioning of rooms can be achieved by means of different materials. Fibrous textile materials can be used for both purposes. In this work, PCM micro-capsules are applied by flat printing method on a jute fabric which is used as a resistive layer of a fibrous composite. The sound absorption coefficient of the obtained samples is measured using a standing wave tube. Results show that the application of these micro-capsules boosts the sound absorption coefficient of the composite material, and that the temperature does not affect to this characteristic.

2.10.1 Introduction

The interest on natural materials in building and decoration is increasing nowadays. Some vegetal fibres have been studied as fibrous sound absorbers (Arenas & Crocker, 2010), (Berardi & Iannace, 2015) and specially jute (Fatima & Mohanty, 2011), (Mohanty & Fatima, 2010).

Textile fibrous materials have been widely used for acoustic purposes, like sound absorbers (Oldham, Egan & Cookson, 2011).

Phase change materials (PCM) are used for thermal regulation. When temperature raises over their melting point, they absorb the latent heat and use it to melt, avoiding the temperature in the surrounding to increase. When temperature drops, they act reversely, solidifying and releasing the latent heat (Onder & Sarier, 2014). These materials are commonly used in building, but also as functional finishes for textiles (Zhou, Zhao, & Tian, 2012).

Microencapsulation is a method that keeps the PCM isolated from the surrounding materials, and avoids its leaking when the material is melted.

In this work a microencapsulated PCM is applied on a jute fabric by flat textile printing. The resultant fabric is added on a 15 mm polyester nonwoven and the sound absorption coefficient of the resultant composite is measured. Results show that the addition of PCM increases the sound absorption of the composite material, and that the phase change does not affect this absorption.

2.10.2 Materials

The studied jute fabric characteristics are shown in table 2.10.1. The nonwoven employed is made of 100% polyester with 63 mm long, 12,33 dtex, circular cross section fibres, without crimp. The used binder is an acrylic/styrene copolymer, and the PCM micro-spheres are The printing paste composition appears in table 2.10.2:

Table 2.10.1. Characteristics of jute fabric

Material	Weave	Warp Yarn Count (Threads/cm)	Filling Yarn Count (Threads/cm)	Areal Density (g/cm ²)
Jute	Plain	6.2	5.2	30

Table 2.10.2. Characteristics of printing paste

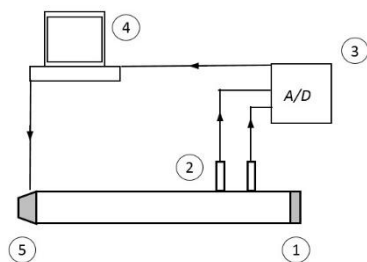
Material	Concentration (g/L)
Binder	50
PCM	50

2.10.2.1 Preparation of samples

Two samples are prepared by printing: one of them with all the elements of the printing paste except the PCM micro-capsules, and the other one with all the components. Three test specimens are cut from each sample. Only one specimen of nonwoven is used for all the tests.

2.10.3 Methods

Sound absorption coefficients of the different samples are measured without air gap at the back of the material. Tests are performed according to ISO Standard 10534-2: Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Transfer function method. In this method, the sound wave strikes the material perpendicularly and the measured sound absorption coefficient is known as the normal incidence sound absorption coefficient. The impedance tube consists in is a narrow, rigid and airtight duct which meets certain characteristics described in the above standard. Measurements are performed between 400 and 4000 Hz. These frequencies are chosen due to the diameter of the available tube (around 40 mm).



1. Sample holder
2. Two microphones (microphones G.R.A.S. model 40AO)
3. Data acquisition system (NI-9233)
4. PC with data analysis tool
5. Sound source

Figure 2.10.1. Scheme of the apparatus employed to measure the sound absorption coefficient.

To perform the test, the sample is placed at one end of the impedance tube (see point 1 in figure 2.10.1). The sample is fit snugly to the sample holder with no air gap. Plane waves are generated, in the tube by the sound source (see point 5 in figure 2.10.1). An interferential field decomposition is performed by measuring the sound pressure in two positions, using microphones hanged on the wall (see point 2 in figure 2.10.1). Using a Matlab function designed for this purpose, the transfer function of the complex acoustic signals at two microphones is determined.

2.10.4 Results and discussion

The areal density of the jute fabric before and after printing is shown in table 2.10.3.

Table 2.10.3. Jute fabric areal density

	Areal density (g/m²)
Jute (untreated)	30,04
Jute + binder	33,94
Jute + binder + PCM	42,36

Sound absorption coefficient of the composite material is measured at a room temperature of 20° C. The combinations that form the composite material are shown in table 2.10.4. Results are shown in Fig. 2.10.2.

Table 2.10.4. Measured combinations

- 1 One layer of 15mm nonwoven and one layer of untreated jute fabric
- 2 One layer of 15mm nonwoven and one layer of jute fabric, printed only with binder
- 3 One layer of 15mm nonwoven and one layer of jute fabric, printed with PCM micro-capsules

The results are shown in Figure 2.10.2.

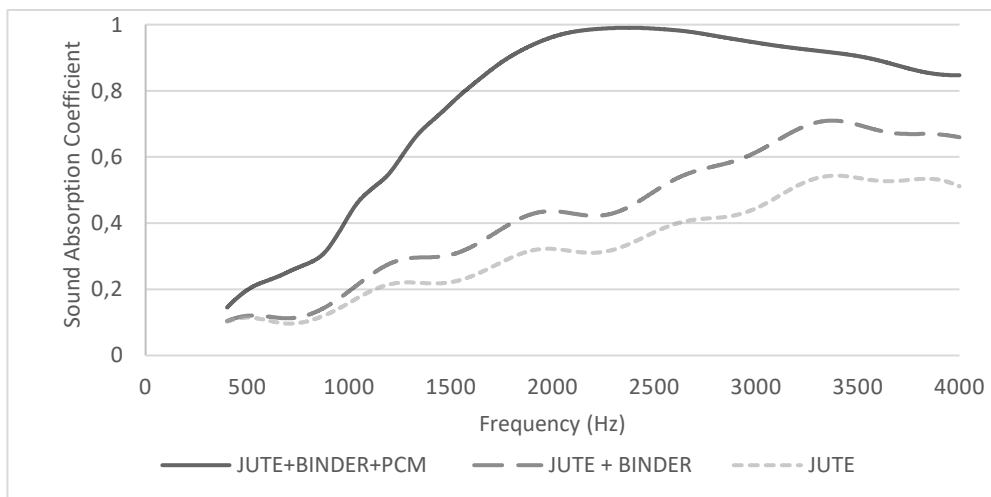


Figure 2.10.2. Sound absorption coefficient of a composite material made up of a layer of 15mm poliester nonwoven and a layer of untreated jute fabric upstream

the sound source, jute printed with only the binder paste, and jute printed with paste containing PCM.

Samples are heated up inside the sample holder using hot air, up to a temperature over 25°C to achieve the phase change of the PCM. Then the sound absorption coefficient is measured. Results are shown in Figure 2.10.3.

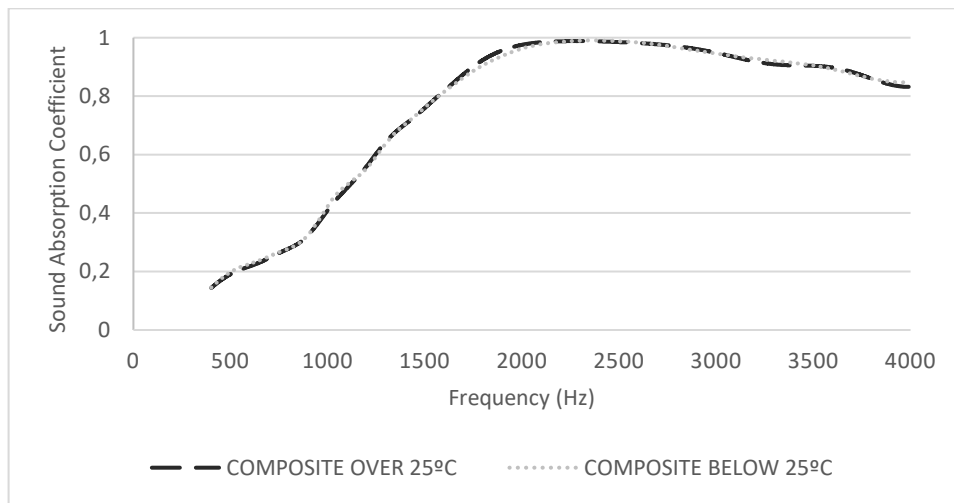


Figure 2.10.3. Sound absorption coefficient of a composite material made up of a layer of nonwoven and a layer of jute fabric printed with paste containing PCM at two temperatures, below and over the PCM melting point.

2.10.5 Conclusions

The application of PCM microspheres on a jute fabric and nonwove composite improves its sound absorption coefficient in more tan 240% in frequencies from 1500 to 1600 Hz, reaching a maximum of 0,99 at about 2350 Hz. Vlues of sound absorption coefficient above 0,5 are found at frequencies over 1100 Hz

The binder affects the absorption of the composite, improving the sound absorption coefficient about 38% between 2800 and 3000 Hz. Values above 0,5 are achieved for frequencies over 2500 Hz.

The liquid or solid state of the interior of the micro-capsules does not show any difference in the sound absorption of the composite.

References

Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & vibration, 44(7)*, 12-18.

- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, *94*, 840-852.
- Fatima, S., & Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied acoustics*, *72*(2-3), 108-114.
- Mohanty, A. R., & Fatima, S. (2010). Jute as an Acoustical Material for Noise Control of a Domestic Dryer. In *17th International Congress on Sound and Vibration 2010, ICSV 2010* (Vol. 5).
- Oldham, D. J., Egan, C. A., & Cookson, R. D. (2011). Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics*, *72*(6), 350-363.
- Onder, E., & Sarier, N. (2015). Thermal regulation finishes for textiles functional finishes for textiles improving comfort performance and protection (pp. 17–98). doi: 10.1533/9780857098450.1.17.
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications *Appl. Energ*201292593605.

Capítulo 3

Discusión

general de los

resultados

El objetivo principal de esta tesis es estudiar un material compuesto formado por un tejido de calada y un no tejido para determinar qué resultados producen las variaciones de los distintos parámetros y seleccionar los valores que nos conduzcan a un resultado más adecuado a las distintas aplicaciones posibles del material.

La discusión de los resultados obtenidos se basa en las posibilidades de aplicación de un material como el mencionado. Para ello, no es suficiente tener en cuenta su capacidad de absorción sonora, sino también otras características propias de los materiales textiles. A continuación, se analizan estas posibilidades desde el punto de vista acústico y textil.

3.1 Desde el diseño textil

3.1.1 Posibilidades estéticas de los distintos tejidos estudiados

La base del estudio ha sido el tejido de calada, empleando hilo continuo de poliéster texturizado, si bien se ha ampliado puntualmente el estudio a los tejidos a base de microfibras de poliéster y poliamida, y también de yute.

En cuanto al tejido de poliéster, es el que mayores posibilidades de diseño ha proporcionado. Así, se han ensayado muestras de telas simples (apartado 2.2), telas múltiples (apartado 2.3) y telas acolchadas (apartado 2.5).

En todas ellas se ha empleado ligamento tafetán y sus derivados, siguiendo la tendencia de la literatura consultada.

3.1.1.1 Telas simples

Para poder conseguir una variedad de densidades con la mínima alteración de los parámetros de la máquina de tejer, se opta por diseñar telas múltiples desunidas en toda su extensión, y posteriormente separar las distintas capas. Las estructuras obtenidas se resumen en la tabla 2.2.3.

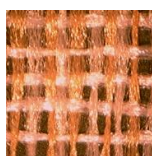
Table 2.2.3. Weaving conditions for obtaining plain fabrics.

Ligamento	Número de capas	Relación de urdimbre	Relación de trama	Tejidos resultantes
1	2	1/1	1/1	Tafetán
2	2	1/3	1/1	Tafetán y teletón por urdimbre

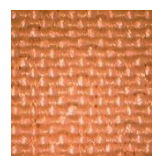
3	3	1/1/1	1/1/1	Tafetán
4	3	1/1/2	1/1/1	Tafetán y teletón por trama
5	4	1/1/1/1	1/1/1/1	Tafetán

La densidad de urdimbre en la máquina de tejer es de 60 hilos/cm y la densidad máxima de tisaje empleada es de 60 pasadas/cm. La densidad de urdimbre se mantiene fija y la densidad de trama se varía, tomando los valores de 15, 30, 45 y 60 pasadas/cm. Se obtiene de este modo un gran número de combinaciones de densidades de urdimbre y trama. Se puede tomar como ejemplo el ligamento nº1, de doble tela, o sea dos capas te tejido, con relación de urdimbre 1/1, relación de trama 1/1, aplicando ligamento tafetán en ambas telas. Si se teje con una densidad de urdimbre de 60 hilos/cm y una densidad de trama de 60 pasadas/cm, se obtienen dos telas independientes, ambas de 30 h/cm y 30 p/cm. El resto de densidades se puede calcular de igual modo, repartiendo los hilos de trama y urdimbre entre las distintas capas.

Los tejidos obtenidos de este modo abarcan un rango de densidades muy amplio. Sin embargo, para que un tejido pueda mantener su estabilidad dimensional, debe tener una densidad de urdimbre y de trama mínimas. En caso contrario, generalmente, los hilos se deslizan unos sobre otros, y el tejido no puede cumplir su función. En la figura 3.1.4. se puede observar esta diferencia. También es posible obtener tejidos estables con muy baja densidad, mediante el empleo de la tecnología de ligado de gasa de vuelta, aunque esto queda fuera del ámbito de este trabajo. En la figura se observa la diferencia entre un tejido de muy baja densidad y un tejido de densidad suficiente.



Tejido con 20 h/cm y 10 p/cm



Tejido con 30 h/cm y 30 p/cm

Figura 3.1.4. Fotografía de telas simples con diferentes densidades.

El aspecto de estos tejidos es liso, bien de color plano, cuando se utiliza el mismo color en trama y urdimbre, o de color de mezcla, si se emplean dos colores distintos. Los únicos efectos de color que admiten son las rayas y los cuadros. Otra opción para variar su aspecto es mediante estampación. Por otro lado, hay que tener en cuenta que una modificación de la porosidad de la superficie del tejido podría afectar a sus propiedades acústicas. En este sentido parece posible el empleo de colorantes dispersos directamente o por sublimación, aunque, si se emplea estampación pigmentaria, debería comprobarse si

ésta provoca una modificación superficial que afecte a las propiedades acústicas del material.

Por otro lado, se estudian tejidos de microfibras como capa resistiva, obteniéndose altos coeficientes de absorción acústica.

3.1.1.2 Telas múltiples

Las telas múltiples estudiadas se basan también en ligamento tafetán. Se emplea este ligamento en todas las capas, y se unen en toda su extensión utilizando un ligamento de raso. Se obtienen cinco tejidos, resumidos en la tabla 3.1.

Tabla 3.5. Obtención de telas múltiples. Basada en la tabla 2.2.3.

Nombre	Estructura	Relación de urdimbre	Relación de trama
2Warp2Weft	Doble tela equilibrada	1, 1	1, 1
4Warp 2Weft	Doble tela no equilibrada	1,3	1, 1
3Warp 3Weft	Triple tela equilibrada	1, 1, 1	1, 1, 1
4Warp3Weft	Triple tela no equilibrada	1, 1, 2	1, 1, 1
4Warp4Weft	Cuádruple tela equilibrada	1, 1, 1, 1	1, 1, 1, 1

Para describir las posibilidades de colorido de estos tejidos, se observa que en la cara superior siempre hay un solo hilo y una sola pasada, que evolucionarán mediante un ligamento tafetán. Además, el número de colores diferentes que se pueden combinar, en principio, corresponde a la suma del número de urdimbres y tramas empleadas. Por ejemplo, en el tejido 2Warp2Weft se emplean dos urdimbres y dos tramas, o sea, cuatro hilos distintos. Estos hilos podrían ser de cuatro colores diferentes, aunque la práctica más extendida es la de utilizar los mismos colores por urdimbre y por trama. Con ello se consigue obtener áreas de color plano, combinando una urdimbre y una trama del mismo color. En este ejemplo se podría usar urdimbre roja y blanca, y trama roja y blanca. Así se obtendrían tres efectos de color: rojo (con urdimbre roja y trama roja), blanco (con urdimbre blanca y trama blanca) y un color de mezcla que podríamos llamar “rosa”, mezclando la urdimbre roja y la trama blanca, o bien la urdimbre blanca y la trama roja.

Siguiendo la pauta que consiste en utilizar los mismos colores de hilo en urdimbre y trama, el número de colores que se pueden conseguir con cada estructura se resume en la tabla 3.2. Entre paréntesis se muestra el número de combinaciones posibles, las cuales

se reducen al intercambiarse los colores de urdimbre y trama, como en el ejemplo del color “rosa” anterior.

Todas estas combinaciones de color permiten mantener los resultados obtenidos en los ensayos realizados, ya que la estructura del tejido no varía.

Tabla 3.6. Colores obtenidos según estructura.

Nombre	Colores planos	Colores de mezcla	Relación de urdimbre	Relación de trama
2Warp2Weft	2	(2) 1	1, 1	1, 1
4Warp 2Weft	2	(6) 5	1,3	1, 1
3Warp 3Weft	3	(6) 3	1, 1, 1	1, 1, 1
4Warp3Weft	3	(9) 6	1, 1, 2	1, 1, 1
4Warp4Weft	4	(12)6	1, 1, 1, 1	1, 1, 1, 1

3.1.2 Aportación de la adición de volumen a la lámina textil

En el apartado 2.2.3.1, referente a los resultados y discusión del empleo de un tejido simple para absorción acústica se muestran los coeficientes de absorción acústica de varios tejidos. En todos ellos, estos valores suelen estar por debajo de 0,3. Una forma de mejorarlos, como se refiere en el mismo apartado, consiste en añadir al tejido una capa de no tejido. Con esto, además de modificar la capacidad de absorción de sonido, se aporta volumen al tejido, cambiando su aspecto y también la forma de utilizarlo.

En la mayoría de ensayos realizados se ha utilizado una capa de tejido y una capa de no tejido, sin cámara de aire trasera. La configuración empleada ha sido la descrita, por ejemplo, en el apartado 2.4.2.1. (figura 2.4.2) como combinación b, en la que la capa de tejido se ha situado en la cara más cercana a la fuente de sonido. Por tanto, en la aplicación del material compuesto, la capa de tejido quedaría a la vista, ocultando el no tejido. De este modo es posible utilizar no tejidos procedentes de reciclaje u otros, ya que su aspecto no influye en la apariencia del material compuesto.

Una de las premisas que se ha tenido en mente al realizar este trabajo ha sido evitar utilizar espesores de no tejido excesivos, para facilitar la aplicación del material obtenido. Los espesores de no tejido estudiados se encuentran entre 15 y 45 mm, y permiten manipular el material fácilmente.

Por otro lado, no se emplea ningún adhesivo para la unión de las capas de tejido y no tejido. El método de unión previsto, en caso necesario, consistiría en un acolchado por ultrasonido o cosido, como muestra la figura 3.1.5. También es posible la unión mediante adhesivo, aunque éste debe ser fijado de forma que obstruya el mínimo número de poros

del tejido, por lo que no debe cubrir toda la superficie del material, y en todo caso, constituiría una variación del material estudiado.



Figura 3.1.5. Unión mediante ultrasonidos y mediante cosido. Fuente: <https://www.optron.es>

Para el empleo de este material textil con volumen existen en principio, dos posibilidades. La primera consiste en aplicarlo sobre una superficie, como una pared o un panel. En estos casos, las propiedades acústicas del material no diferirían de las estudiadas. Otra opción consiste en utilizarlo para recubrir elementos tridimensionales, como sería el caso de un mueble tapizado. En este caso, sí que sería necesario estudiar como afectarían los materiales y la estructura del interior del elemento. Por ejemplo, si está hueco, la forma y tamaño del hueco, si se utiliza metal o madera, o qué tipo de espuma, etc. Los resultados en cuanto al coeficiente de absorción de sonido, en todo caso, no deberían ser inferiores a los obtenidos en el tubo de impedancia, teniendo en cuenta que la pared posterior de dicho tubo refleja todo el sonido incidente.

La segunda opción consiste en recubrir la otra cara del no tejido con otro tejido igual o diferente, según la combinación descrita en el apartado 2.4.2.1. De esta forma es posible utilizarlo como un producto independiente, ya sea suspendido de forma horizontal o vertical, o bien sujeto sobre un bastidor. En todos estos casos, al no estar junto a la pared, el coeficiente de absorción de sonido diferirá del estudiado, supuestamente a mejor.

3.1.3 Comparación entre los distintos resultados obtenidos dependiendo del tipo de tela y del espesor de no tejido

Es posible realizar una comparación entre algunos de los tejidos estudiados. Para ello, el espesor de no tejido debe coincidir. Así, en la figura 3.1.6, se resumen algunos resultados empleando diferentes tipos de tejido. En todos ellos, el grosor de no tejido es de 15mm. Las densidades de tejido de las telas múltiples don de 60 h/cm y 60 p/cm. Las del tafetán son 30 h/cm y 45 p/cm, las de la sarga de microfibra, 35 h/cm y 30 p/cm y las del rizo de punto de microfibra 10 cursas/cm.

Se observa que, tanto la sarga de microfibras como el tejido a base de doble tela equilibrada ofrecen un coeficiente de absorción de sonido superior a frecuencias inferiores a 1200 Hz. En el caso de la doble tela, se mantiene con valores superiores a 0,6 hasta 4000 Hz. Además, se observa que el tafetán y el tejido doble 4Warp 2Weft presentan valores muy similares. Esto es posible, ya que la densidad en la tela superior del tejido 4Warp 2Weft es de 15h/cm y 30 p/cm, pero en la inferior es de 45h/cm y 30 p/cm. Es posible que el efecto de la tela superior produzca la pequeña diferencia que se observa en la gráfica, la cual se puede explicar, ya que la densidad, en este caso de urdimbre, es muy baja.

Por otro lado, las telas múltiples con mayor número de capas (3Warp 3Weft, 4Warp 3Weft y 4 Warp 4 Weft) son las que proporcionan el coeficiente de absorción de sonido más bajo en general.

De la figura 3.1.6 también se puede desprender que es posible crear un absorbente que cubra un rango más amplio de frecuencia empleando distintos tejidos en diferentes áreas, o diseñando tejidos con distintos ligamentos. Por ejemplo, si en un tejido se combinan áreas de doble tela equilibrada 2Warp 2Weft, con áreas de doble tela desequilibrada 4Warp 2Weft, se puede conseguir abarcar un rango de frecuencias mayor, a expensas de una pequeña disminución en el coeficiente de absorción de sonido del conjunto)

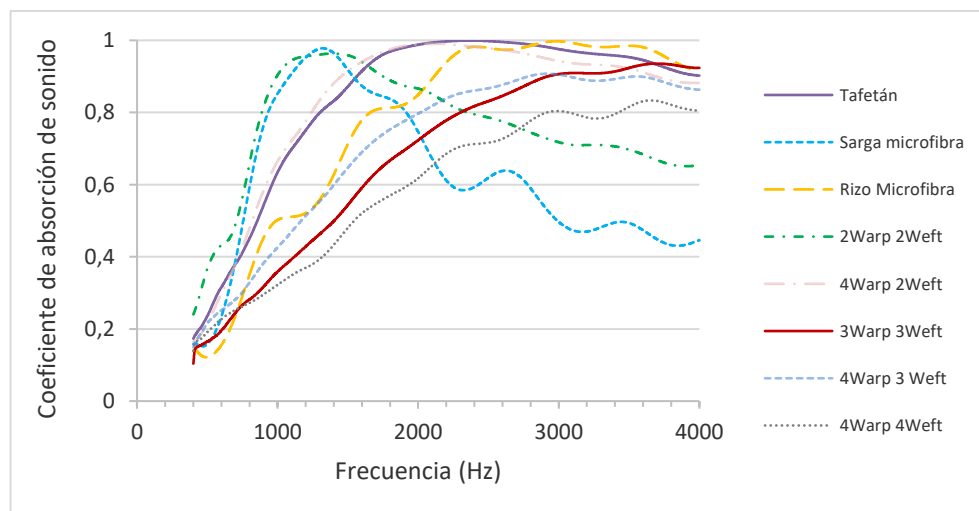


Figura 3.1.6. Coeficiente de absorción de sonido de la combinación de distintos tejidos y una capa de no tejido de 15 mm.

3.2 Desde la aplicación de los resultados

3.2.1 Límites del estudio: frecuencias estudiadas

El método para determinar el coeficiente de absorción acústica ha sido el basado en el tubo de impedancia acústica o tubo de impedancia acústica. Este método permite conocer el coeficiente de absorción acústica bajo incidencia normal. Una de sus ventajas consiste en que el tamaño de muestra necesario es pequeño, lo que permite, por un lado, producir las muestras de forma rápida y por otro, reducir el volumen del desperdicio generado en muestras descartadas.

El sistema de medición empleado en este estudio proporciona los coeficientes de absorción acústica del material ensayado entre 400 y 4000 Hz.

No se ha explorado la absorción a frecuencias inferiores, ya que los materiales absorbentes de sonido basados en materiales textiles encuentran su rango de aplicación en estas frecuencias, sobre todo a partir de 500 Hz. Tampoco se ha medido la absorción acústica en frecuencias superiores a 4000 Hz. Muchas de las curvas obtenidas sugieren que en frecuencias superiores a 4000 Hz se mantenga una cierta absorción. De todos modos, para poder asegurar esto, se necesitarían nuevas mediciones utilizando un tubo de ondas estacionarias distinto al empleado.

3.2.2 Comportamiento a diferentes frecuencias

Se consideran frecuencias medias aquellas que se encuentran entre 256 y 2000 Hz, y frecuencias altas, a las que se encuentran entre unos 2000 y 16000 Hz. La voz humana ocupa un espectro entre unos 300 y 3400 Hz. Los materiales textiles estudiados aparecen como adecuados para ser empleados como parte del acondicionamiento acústico de lugares en los que existan concentraciones de personas, y por tanto las frecuencias emitidas

se sitúan en este rango. En la figura 3.2.1, se observa la coincidencia de las frecuencias del habla humana y uno de los materiales estudiados, a modo de ejemplo. También la audición humana también es más sensible en estas frecuencias. El umbral de audición es mínimo entre 2000 y 5000 Hz, o sea, estas frecuencias son las más audibles, las que menor presión sonora necesitan para ser percibidas.

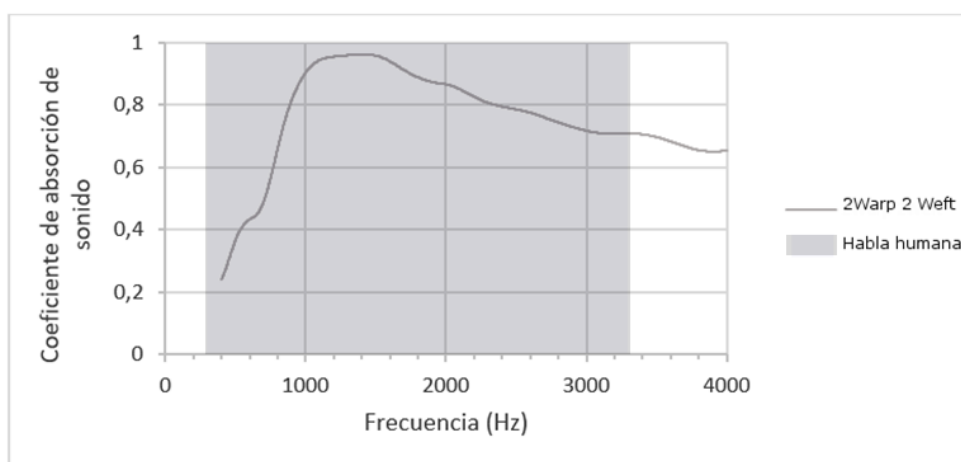


Figura 3.2.1. Coeficientes de absorción acústica de un material formado por una capa de tejido doble y una capa de no tejido de 15 mm de espesor. Comparación con las frecuencias del habla humana.

Al igual que en la figura 3.1.6, puede observarse como en todo el rango de frecuencias estudiadas, el coeficiente de absorción acústica es superior a 0,5. En estas figuras se ha empleado no tejido de 15mm. Cuando se utilizan espesores superiores, generalmente aumentan los valores de absorción como se observa en el apartado 2.2.3.2. Además, en el mismo apartado se describe cómo las curvas se desplazan hacia las frecuencias inferiores.

3.2.3 Posibles aplicaciones

En los apartados anteriores se han señalado algunas de las aplicaciones posibles de estos materiales. Al igual que el resto de textiles, son materiales muy versátiles y admiten una gran cantidad de tratamientos de acabado para modificar sus cualidades, tales como retardante a la llama, hidrófugo, antiarrugas, etc. de forma que se adapten a cualquier normativa. Se pueden confeccionar a medida y adaptar su forma a cualquier elemento.

Por sus características estéticas y sensoriales pueden ser utilizados como elementos decorativos tanto para revestimiento de elementos bidimensionales y tridimensionales, como de forma suspendida, en cualquier orientación (horizontal, vertical, inclinada).

Las características de absorción de sonido que poseen los hacen adecuados para lugares públicos, en los que se reúnan personas. Por ejemplo, centros educativos, pabellones deportivos, locales de hostelería, etc.

3.3 Resultados pendientes de publicación

Los resultados obtenidos al estudiar los distintos tipos de tejido muestran algunas tendencias, que se repiten independientemente del tipo de tejido. Entre ellas, el desplazamiento de las curvas dependiendo del espesor de no tejido, la diferencia de efecto de la existencia o no de tejido según el espesor de no tejido y la influencia negativa en la absorción del conjunto tejido-no tejido al emplear una capa de tejido.

3.3.1 Desplazamiento de las curvas

Si se comparan los coeficientes de absorción de sonido obtenidos para un mismo tejido, al aumentar el espesor de la capa de no tejido, se obtienen unas curvas como las que muestra la figura 3.3.1. En ellas se observa un desplazamiento hacia las frecuencias inferiores, así como un aumento de la selectividad en la absorción, ya que tienden a estrecharse.

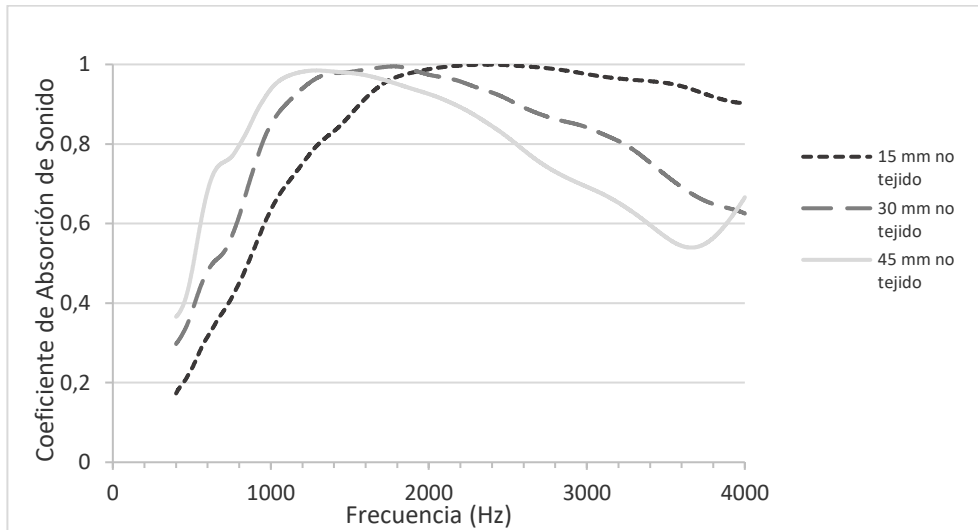


Figura 3.3.1. Coeficiente de absorción de sonido de la combinación de un tejido de tafetán con 45h/cm y 30p/cm, y espesores de no tejido de 15, 30 y 45 mm.

Si en lugar de no tejido, la cavidad trasera tuviese solo aire, se podría calcular la distancia a la que debería situarse el tejido para conseguir que la frecuencia de máxima absorción coincidiera con los valores medidos, empleando las ecuaciones 3.3.1 y 3.3.2.

$$d = \frac{\lambda}{4}$$

Ecuación 3.3.1

Donde:

d es la distancia hasta la pared rígida (m)

λ es la longitud de onda (m)

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Ecuación 3.3.2

Donde:

v es la velocidad del sonido (en el aire a 20°C) 343,2 m/s

f es la frecuencia de máxima absorción (Hz)

En la tabla 3.1.1. se observa cómo la frecuencia de máxima absorción disminuye al aumentar el espesor de no tejido. Esta disminución se produce del mismo modo que si en lugar de no tejido se hubiese empleado una cámara de aire. Tomando las frecuencias de máxima absorción de cada combinación y calculando la cámara de aire correspondiente a dichas frecuencias, se observa una diferencia media de 20,4 mm, para los tres espesores de no tejido medidos. En este caso el aumento aparente de la cavidad que se obtiene al utilizar no tejido en lugar de aire es mayor cuanto menor es el espesor del no tejido.

Al representar gráficamente estos valores medidos junto a los calculados, en la figura 3.3.2, se observa una tendencia a obtener líneas paralelas. Restando las ecuaciones de las líneas de tendencia se obtiene la ecuación 3, que indica la distancia de separación entre ambas.

$$y = 0,0005x + 21,194$$

Ecuación 3.3.2

Tabla 3.3.1. Distancia calculada de aire y espesor de no tejido empleado

Frecuencia máx. absorción	Espesor no tejido mm	Distancia calculada aire mm
2371	15	35,8
1778	30	47,8
1285	45	66,1

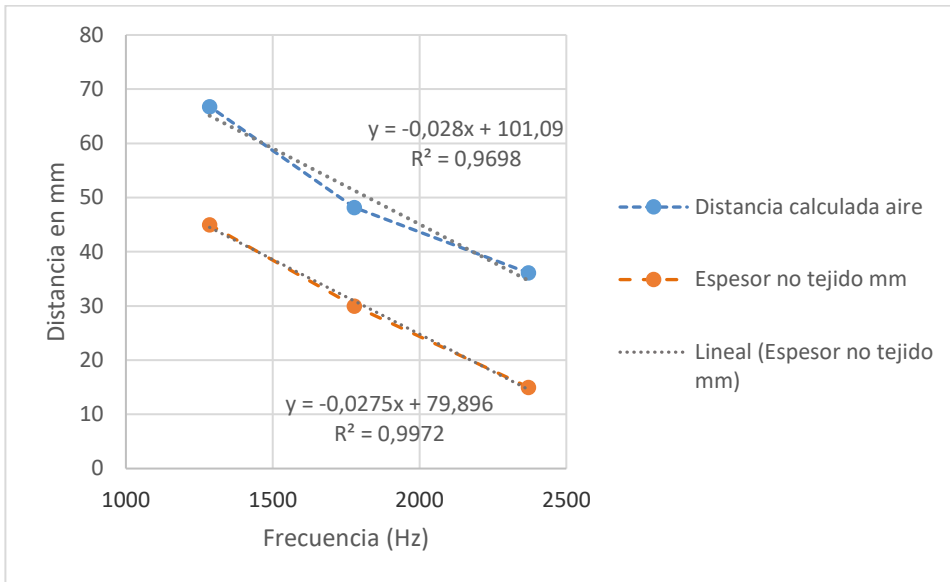


Figura 3.3.2. Valores de espesor de no tejido medidos y de cámara de aire calculados.

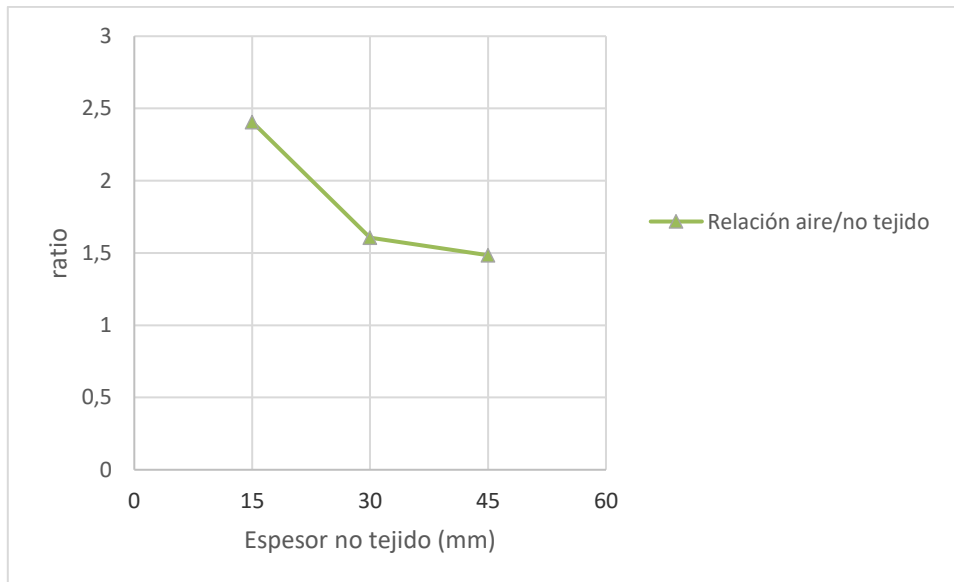


Figura 3.3.2. Influencia del empleo de no tejido en lugar de cámara de aire.

3.3.2 Influencia de la aplicación de tejido según el espesor de no tejido

Al comparar los coeficientes de absorción acústica de una capa de no tejido de forma individual y el mismo no tejido recubierto por una capa de tejido con ligamento tafetán y densidades de 45 h/cm y 30 p/cm se aprecia una menor influencia a medida que aumenta el grosor de la capa de no tejido. Los valores de diferencias acumuladas se muestran en la tabla 3.3.2. en la que también se observa una disminución, de forma global. Asimismo, en las figuras 3.3.3 a 3.3.5 se aprecia como la diferencia entre las curvas es menor según aumenta el espesor de no tejido.

Tabla 3.3.2. Sumatorio de las diferencias entre el coeficiente de absorción de sonido de un material compuesto por una capa de tejido con ligamento tafetán y 45 h/cm y 30 p/cm junto a tres espesores de no tejido y el mismo no tejido de forma individual, entre 400 y 4000 Hz.

15 mm no tejido	30 mm no tejido	45 mm no tejido
1818,54	1310,49	768,05

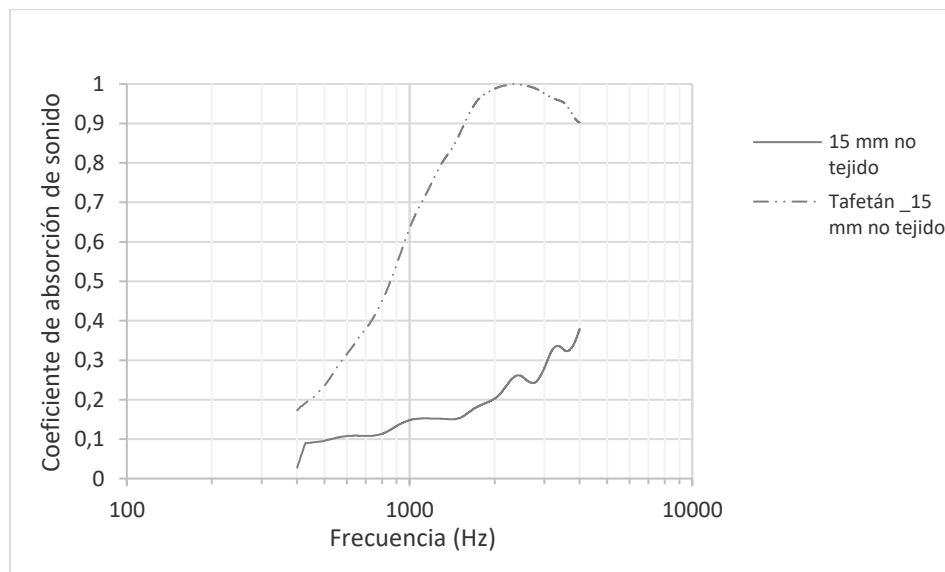


Figura 3.3.3. Coeficiente de absorción de sonido de un material compuesto por una capa de tejido con ligamento tafetán y 45 h/cm y 30 p/cm y 15 mm de no tejido y del no tejido de forma individual.

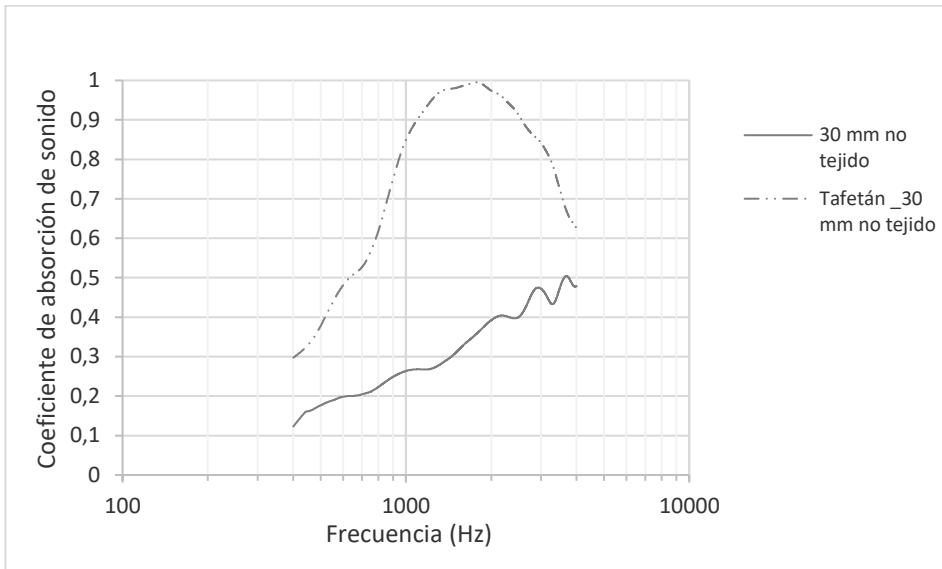


Figura 3.3.4. Coeficiente de absorción de sonido de un material compuesto por una capa de tejido con ligamento tafetán y 45 h/cm y 30 p/cm y 30 mm de no tejido y del no tejido de forma individual.

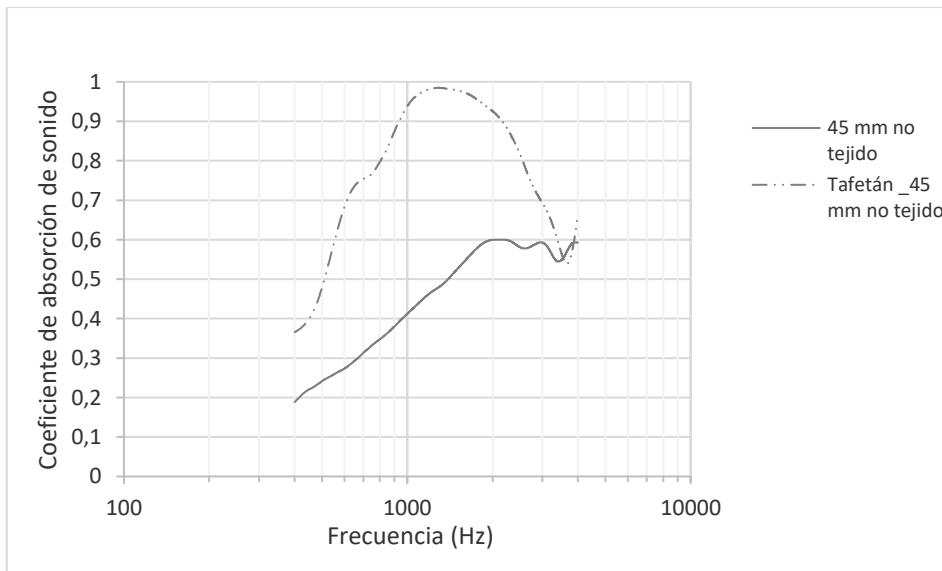


Figura 3.3.5. Coeficiente de absorción de sonido de un material compuesto por una capa de tejido con ligamento tafetán y 45 h/cm y 30 p/cm y 45 mm de no tejido y del no tejido de forma individual.

3.3.3 Efecto negativo de la capa resistiva de tejido sobre el coeficiente de absorción de sonido del no tejido

La capa resistiva de tejido puede producir un efecto contrario al deseado. Se ha encontrado un efecto negativo al combinar el empleo del mayor espesor de no tejido estudiado, 45mm, con las mayores densidades de urdimbre y trama empleadas, como se muestra en la figura 3.3.5. En el caso de utilizar un tejido de tafetán con 45 h/cm y 30 p/cm junto a 45 mm de no tejido, aparece un pequeño intervalo de frecuencias entre 3551 y 3869 Hz en las que el coeficiente de absorción de sonido es menor que empleando el no tejido de forma individual. Lo mismo ocurre cuando se utiliza una tela acolchada con relación 4/1/4, descrita en el apartado 2.5.2.1, con densidades de urdimbre y trama de 60h/cm, y 60p/cm, insertándose la trama de acolchado con retención. En este caso, el intervalo comprende entre 2292 y 3765 Hz.

Por otro lado, esta reducción en el coeficiente de absorción de sonido aparece en las frecuencias más altas del intervalo estudiado, contrastando con el aumento del mismo en las frecuencias más bajas medidas. Este efecto aparece en tejidos diferentes, aunque en distinta medida.

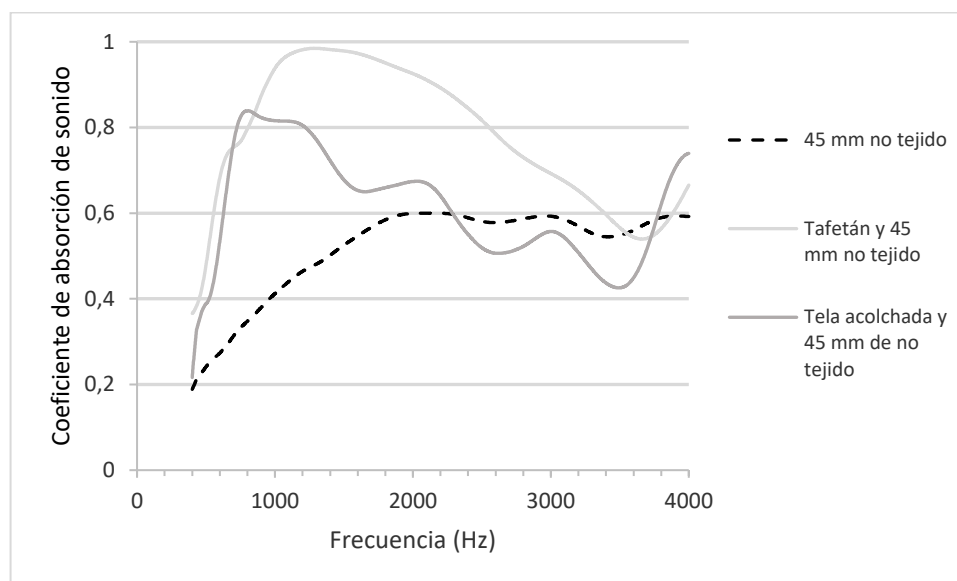


Figura 3.3.5. Coeficientes de absorción de sonido de un material compuesto por una capa de tejido con ligamento tafetán y 45 h/cm y 30 p/cm y 45 mm de no tejido, una capa de tela acolchada con relación 4/1/4 60 h/cm y 60 p/cm y 45 mm de no tejido, y del no tejido de forma individual.

Capítulo 4

Conclusiones

Como se menciona en este trabajo, los materiales textiles están en los inicios de la acústica arquitectónica moderna, con los trabajos de Wallace C. Sabine. Sin embargo, la presencia actual de estos materiales en la mejora del acondicionamiento acústico no parece significativa. Este trabajo se centra en los tejidos de calada, junto a los no tejidos a base de poliéster, fibra reciclable, de fácil producción, manejo, instalación y cuidado. Para ello, se han consultado los estudios y publicaciones disponibles y se han diseñado, producido y estudiado distintos materiales, formados por una capa de tejido y una capa de no tejido. Así, se ha estudiado la capa resistiva, capaz de modificar la absorción del conjunto de tejido y no tejido. **El recubrimiento del no tejido mediante un tejido de calada proporciona, además de una variación en las características acústicas, un valor estético, y viceversa.**

A partir de los trabajos realizados sobre cómo modifican la absorción acústica los distintos parámetros del tejido tales como estructura del tejido, y densidades de urdimbre y trama se ha observado que estas densidades llevan aparejadas una variación en el tamaño, forma, distribución espacial y número de poros del tejido, que abarcan tamaños desde submilimétrico hasta visible. Estos poros se consideran de dos tipos: los poros intra-hilo, que se forman entre las fibras o los filamentos que conforman el hilo, y dependen de la finura de las fibras o los filamentos, y del número de éstos, y los polos inter-hilo, que se forman en la construcción del tejido y dependen de la finura del hilo, de las densidades de urdimbre y trama, así como de la estructura del tejido. Se ha explicado la absorción del conjunto tejido - no tejido como un sistema de resonadores acoplados en el cual los poros del tejido actúan como cuellos de una matriz de resonadores y el no tejido actúa como cavidad trasera que los comunica. Además, el no tejido constituye un sinnúmero de canales que produce el efecto aparente de aumento de la cavidad. Se ha deducido que

este aumento del volumen aparente de la cavidad es mayor cuanto menor es el espesor de los no tejidos estudiados.

En el apartado 3.3 se calcula la distancia a la pared rígida que se necesitaría en caso de emplear aire entre el tejido y dicha pared y se compara con el espesor de no tejido utilizado. La figura 3.3.2 muestra como en el caso de emplear 15 mm de no tejido, el aumento aparente de la cavidad es de 2,4 veces, mientras que con 45 mm es de 1,4 veces.

El empleo en todo momento de un no tejido con bajo coeficiente de absorción acústica, abre la puerta al uso de un gran número de disposiciones y composiciones de no tejidos que, por sí mismos, no proporcionen altos índices de absorción. Al añadir una capa de tejido, **el coeficiente de absorción acústica del conjunto aumenta en gran número de frecuencias**. Mediante el estudio de diferentes tejidos se ha deducido que la **estructura del tejido, así como las densidades de urdimbre y trama modifican en gran medida la absorción de un material compuesto formado por una capa de tejido y una capa de no tejido**. Después de trabajar para conseguir un material con posibilidades de uso real, limitando los espesores de no tejido sin emplear cámara de aire trasera en las mediciones, se han conseguido **valores de coeficiente de absorción acústica superiores a 0,8** en casos como:

Cuando se utiliza no tejido de 15 mm y como capa resistiva una tela simple de poliéster de 45 h/cm, con la configuración de telar descrita en el capítulo 2.2, y con densidad de trama de 7,5 p/cm, a partir de 3079 Hz hasta 4000 Hz (figura 2.2.13). Empleando 22,5 p/cm esta misma absorción se alcanza en el intervalo 1685-4000 Hz, como (figura 2.2.13). Al utilizar un espesor de no tejido de 30 mm, y el mismo tejido de 45 h/cm y 7,5 p/cm, el intervalo en el que se alcanza un coeficiente de absorción acústica superior a 0,8 se sitúa entre 1892 Hz y 3371 Hz (figura 2.2.16). Al aumentar a 22,5 p/cm el intervalo se desplaza hacia frecuencias más bajas, situándose entre 1075 y 3220 Hz (figura 2.2.16). Cuando se emplea un espesor de no tejido de 45 mm, y el mismo tejido de 45 h/cm y 7,5 p/cm, el intervalo en el que se alcanza un coeficiente de absorción acústica superior a 0,8 se sitúa entre 1241 y 2536 Hz (figura 2.2.19). Con 22,5 p/cm (figura 2.2.19) se desplaza hasta 883-2653 Hz. Ninguna otra combinación estudiada alcanzó un coeficiente de absorción acústica de 0,8 con 15 mm de no tejido. Si bien, al emplear 45 mm de no tejido el coeficiente de absorción acústica supera los 0,8 empleando también 30 h/cm y 20 p/cm (1674-2233 Hz) (figura 2.2.18).

Cuando se utilizan telas múltiples de poliéster sobre un espesor de 15 mm de no tejido, sólo las dobles telas de 60 h/cm y 15 p/cm descritas en el apartado 2.3, (figura 2.3.2) tanto equilibradas (dos urdimbres y dos tramas) como desequilibradas (cuatro urdimbres y dos tramas), proporcionan coeficientes de absorción acústica superiores a 0,8. En el primer caso en el intervalo 2603 – 4000 Hz, y en el segundo caso entre 2730 y 4000Hz. El resto de estructuras de tejido estudiadas producen aumentos menores sobre la absorción del conjunto. Del mismo modo, al aumentar el espesor de no tejido a 30 mm son estas mismas estructuras

las que proporcionan el mayor aumento en el coeficiente de absorción acústica. Así la doble tela equilibrada supera el valor de 0,8 en el intervalo 1574-3204 Hz y la desequilibrada entre 1867 y 3449 Hz. Aumentando el espesor de no tejido a 45 mm, de nuevo son las dobles telas las que proporcionan al conjunto tejido-no tejido un mayor coeficiente de absorción acústica, superior a 0,8. Así, la doble tela equilibrada lo hace entre 1170 y 2546 Hz, y la desequilibrada entre 1159 y 2541 Hz.

Analizando las mismas estructuras, pero aumentando la densidad de trama a 30 p/cm, sobre un no tejido de 45 mm (figura 2.3.5), las dobles telas equilibradas aumentan el coeficiente de absorción acústica por encima de 0,8 en los intervalos 848-2359 Hz y 3785-4000 Hz y las desequilibradas lo hacen en los intervalos 952-2554 Hz y 3957-4000 Hz. En este caso, las triples telas equilibradas (tres urdimbres y tres tramas) también superan 0,8 entre 1308 y 2338, las triples telas desequilibradas (cuatro urdimbres y tres tramas) lo hacen entre 1352 y 2368 Hz y las cuádruples telas, entre 1801 y 2080 Hz. Aumentando la densidad de trama a 45 p/cm, y aplicando el tejido de nuevo sobre 45 mm de no tejido (figura 2.3.6), las dobles telas equilibradas aumentan el coeficiente de absorción acústica por encima de 0,8 en los intervalos 698-2425 Hz y 3927-4000 Hz, las desequilibradas lo hacen entre 1088-2347 Hz y 3930-4000 Hz. Asimismo, las triples telas equilibradas superan los 0,8 entre 827 y 2592, las triples telas desequilibradas lo hacen en los intervalos 1108-2351 Hz y 3972-4000 Hz y las cuádruples telas, entre 1544 y 2275 Hz. Al emplear tejidos con 60 p/cm, nuevamente con 45 mm de no tejido (figura 2.3.7), las dobles telas equilibradas aumentan el coeficiente de absorción acústica por encima de 0,8 entre 722 y 985 Hz, así como entre 1396 y 2072 Hz, las desequilibradas lo hacen entre 688 y 2156 Hz, así como entre 3950 y 4000 Hz. En este caso, las triples telas equilibradas también superan los 0,8 entre 903 y 2315 Hz, así como entre 3806 y 4000 Hz, las triples telas desequilibradas lo hacen en los intervalos 994-2385 Hz y 3918-4000 Hz y las cuádruples telas, en los intervalos 1207-2160 Hz, y 2882-4000.

Asimismo, se ha asociado la medida en que **se desplazan las curvas de absorción hacia frecuencias inferiores al aumentar el espesor de no tejido, al tamaño de la cámara de aire trasera necesaria.**

Se ha encontrado una relación entre estos dos valores, dependiente del espesor del no tejido, en cuyo caso el empleo de espesores de no tejido menores proporcionaría una ventaja mayor sobre el empleo de cámara de aire, que el uso de espesores de no tejido mayores (figura 3.3.1). Esta diferencia se asocia al no tejido empleado, pudiendo ser distinta en el caso de un no tejido con diferentes características.

Igualmente, se ha observado que el aumento en los valores del coeficiente de absorción acústica del material compuesto, respecto al no tejido de forma individual, es mayor

cuando el espesor de la capa de no tejido es menor. O sea, **la influencia de la capa de tejido es más importante al disminuir el espesor del no tejido.**

Existe una tendencia (apartado 3.3.2) que se repite en los tejidos estudiados, a producir mayor aumento en los coeficientes de absorción de sonido de forma global, a medida que disminuye el espesor de no tejido. Estos aumentos no son lineales (figuras 3.3.3 a 3.3.5) sino que siguen la forma de una curva similar la de los absorbentes de tipo resonador.

Otro efecto observado es que **la influencia de la capa de tejido sobre la absorción acústica del conjunto tejido-no tejido disminuye al aumentar el tamaño de los poros inter-hilo.**

Esto se puede explicar ya que, al reducirse el tamaño de los poros del tejido, éste se acerca al tamaño de la capa viscosa de la superficie que los rodea, además de que aumenta la fricción en las paredes de los mismos, con lo que aumenta la absorción del conjunto (figuras 2.2.11 a 2.2.13).

Por otro lado, al estudiar determinadas combinaciones de los parámetros del material se ha detectado que el coeficiente de absorción de sonido del conjunto tejido - no tejido era inferior al del no tejido en solitario, concluyendo que **el empleo de un tejido como capa resistiva puede perjudicar la absorción acústica de un no tejido de forma individual**, en determinadas frecuencias.

Utilizando las mayores densidades de urdimbre y trama, así como el no tejido más grueso, se observa una disminución en los coeficientes de absorción de sonido a las frecuencias más altas del intervalo estudiado junto con un aumento a las frecuencias más bajas (figura 3.3.5).

Entre las posibilidades de modificar el tamaño y la forma de los poros del tejido, cuando se utilizan tejidos de microfibras de poliéster/poliamida, el diámetro de los filamentos que componen los hilos es menor que el de los hilos convencionales, así como el espacio interfibrilar entre las fibras de un mismo hilo. De este modo, se generan surcos de dimensiones considerablemente reducidas. En esta tesis se observa cómo, aparte de la transpirabilidad e impermeabilidad que se genera con el empleo de microfibras, demostrada en diversas publicaciones, también existe una influencia considerable en la absorción acústica. Dicha influencia se aprecia a diferentes frecuencias. Ensayos preliminares apuntan a que, además de la estructura del tejido, **la finura de las fibras es un parámetro que condiciona el comportamiento acústico de los textiles.**

Así, la combinación de un tejido de sarga de microfibras y 15 mm de no tejido aumenta la absorción en frecuencias inferiores al resto de telas simples estudiadas, generando un coeficiente de absorción acústica superior a 0,8 entre 932 y 1243 Hz y a 0,9 entre 1258 y 1380 Hz, alcanzando 0,5 a 756 Hz, y 0,97 a 1322 Hz (figura 3.1.3).

Del mismo modo, la combinación de microfibras con estructuras de tejidos especiales puede favorecer la absorción de sonido. Así, **el empleo de tejido de rizo de microfibras**

permite alcanzar coeficientes de absorción acústica muy elevados en un intervalo de frecuencias muy amplio.

Utilizando un tejido de rizo de microfibra, se obtiene un coeficiente de absorción acústica superior a 0,8 desde 1660 hasta 4000 Hz, siendo superior a 0,99 en el intervalo 2845-3100 Hz (figura 3.1.3).

Por otro lado, al aplicar algunos acabados superficiales sobre los tejidos, y observarse influencias diferentes de los mismos en la absorción del conjunto, se deduce que **es posible modificar la absorción del conjunto tejido-no tejido mediante la aplicación de acabados que modifiquen la superficie del tejido.**

Como se puede observar, los textiles estudiados en este trabajo proporcionan elevados niveles de absorción acústica en frecuencias situadas aproximadamente entre 1000 y 4000 Hz. Esto los hace especialmente indicados para su empleo en locales donde se genere ruido en este rango de frecuencias y se requiera una acústica adecuada, por ejemplo, para mantener una conversación. Además, la componente de diseño que puede aportar el textil también debe ser un incentivo para su empleo. De este modo, las aplicaciones que mejor podrían aprovechar las características de estos productos, podrían ser las de acondicionamiento acústico en aulas, oficinas, salones de actos, restaurantes, centros comerciales, pabellones deportivos... pero también interiores de vehículos, trenes, embarcaciones, aeronaves, y posiblemente interiores de instalaciones industriales.

Finalmente, se ha constatado la **utilidad de las técnicas estadísticas como el diseño de experimentos** como herramienta necesaria para mejorar el diseño de materiales textiles compuestos para absorción acústica, así como para el análisis de resultados.

Capítulo 5

Acciones futuras

Como acciones futuras, se propone ampliar el estudio a otros materiales procedentes de reciclaje y de origen natural, que puedan proporcionar resultados similares con el mínimo coste medioambiental. Por un lado, se propone aprovechar el conocimiento existente sobre los no tejidos y, por otro lado, mejorar el conocimiento de los tejidos en solitario. Para poder realizar el estudio de los tejidos de forma individual, con cámara de aire posterior, se propone diseñar un soporte que permita realizar las mediciones de forma sencilla utilizando el tubo de ondas estacionarias. Este soporte no debe interferir en las mediciones y debe permitir fijar y soltar las muestras de forma ágil, y conforme a la norma, así como variar el tamaño de la cámara de aire también fácilmente. Para que esta caracterización de los tejidos tuviese aplicación directa, se propone hacerla atendiendo a parámetros de fabricación de los mismos, como los vistos en este trabajo y otros.

Por otro lado, las mediciones realizadas entre 400 y 4000 Hz, muestran que los coeficientes de absorción acústica se mantienen suficientemente altos a esta última frecuencia. Un estudio más amplio para determinar su comportamiento a frecuencias superiores ayudaría a completar la caracterización de estos materiales.

En cuanto a la finura de los hilos, se han propuesto algunos factores que se consideran convenientes para una futura caracterización de los tejidos de rizo de microfibra. En concreto: forma y tamaño de las fibras, cantidad de microfibras segmentadas (*split*), altura del bucle y el número de bucles por unidad de superficie. Por otro lado, se propone el estudio de la absorción de sonido, de materiales compuestos, empleando como capa resistiva tejidos especiales a base de microfibras, tales como tejidos de rizo y pelo. Para ello se propone estudiar la influencia de los parámetros anteriormente mencionados. También su caracterización de forma individual, empleando cámara de aire trasera.

Asimismo, sería interesante disponer de tejidos de microfibras con características de construcción similares a las de los tejidos de fibras convencionales estudiados, para poder cuantificar la influencia de la finura de la fibra.

Otro aspecto de importancia a considerar es el estudio de objetos de tres dimensiones, tales como muebles y objetos ornamentales, que se puedan instalar de diferentes formas, tales como suspendidos, sobre la pared o sobre el suelo, ya sean directamente construidos con este material compuesto de tejido y no tejido, o recubiertos por el mismo. Para ello se propone la creación de prototipos y su estudio desde el punto de vista de la acústica. Estos prototipos pueden incorporar otros elementos en su interior para mejorar sus características de absorción acústica, por ejemplo, a frecuencias más bajas. Para ello sería necesario el empleo de cámara reverberante.

Finalmente, a la hora de caracterizar los tejidos respecto a su comportamiento acústico, no podemos olvidar la variación que los acabados textiles producen en sus características. En nuestro caso, hemos visto la importancia de la modificación de la porosidad del tejido y cómo esta influye sobre las características acústicas del mismo. Los acabados pueden modificar esta porosidad. La mayoría de acabados son tratamientos en húmedo, que pueden alterar las dimensiones de los tejidos, así como modificar tanto su superficie, como incluso el interior de las fibras. Existen infinidad de tratamientos disponibles para una diversidad de tejidos, que dependen por un lado de su composición y por otro del uso al que está destinado el tejido. Algunos tratamientos que se propone evaluar son la limpieza, el lavado, suavizado, apresto, rameado, estampado, hidrófugo, y retardante a la llama. Además de los acabados comunes, existen acabados que modifican la superficie del tejido como espumado (se puede estudiar el efecto de la aplicación de una espuma de celdas abiertas en mayor o menor grado por el envés del tejido), gofrado mediante rodillos que aporten relieve, estampado con tintas hinchables, flocado, perchado, laminado, etc. Por otro lado, en este trabajo se han aplicado recubrimientos con microesferas con PCMs, partículas de carbón y turmalina. Es posible aplicar otras partículas, así como estudiar otros métodos de aplicación que permitan aumentar la concentración de las mismas. También se puede estudiar su comportamiento al ser aplicadas en el envés del tejido. Por último, los textiles soportan un mantenimiento a lo largo de su vida útil que consiste principalmente en el lavado (en seco o en húmedo) y planchado. Es conveniente realizar un estudio sobre el efecto del uso y de los sucesivos lavados sobre las características acústicas tanto de los tejidos como de los no tejidos, para de este modo establecer unas recomendaciones de mantenimiento.