

Tesis Doctoral

**Nuevos materiales, modelos y técnicas
de caracterización en acústica de la edificación y
acústica medioambiental**

Laura Bertó Carbó

Noviembre 2015

Directores:

Dr. Jesús Alba Fernández

Dra. Romina Del Rey Tormos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Nuevos materiales, modelos y técnicas de
caracterización en acústica de la edificación
y acústica medioambiental

Laura Bertó Carbó

Tesis Doctoral

Noviembre 2015

Directores

Dr. Jesús Alba Fernández

Dra. Romina Del Rey Tormos

A Vicent, Bea i Angel

Agradecimientos

A lo largo de estos años he tenido la oportunidad de conocer personas excepcionales, que me han ayudado a crecer personal y profesionalmente, (quizás lo primero más importante). La lista es amplia, y el espacio corto, pero quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los compañeros de la EPSG, especialmente, a Fernando por su ayuda incondicional en todo momento, por su constante apoyo moral y por un largo etc., a Ester por su compañía y los buenos momentos vividos, a Silvia por sus ánimos en esta recta final y a Ali por estar siempre pendiente y por enseñarme tantos trucos con office. También quiero recordar a Carlos y a Eva como estupendos compañeros de batalla y agradecerles tantos conocimientos transmitidos.

Quiero agradecer a Jesús Alba la confianza depositada en mí a lo largo de estos años, por brindarme la oportunidad de poder desarrollarme profesionalmente y apoyarme como director en el desarrollo de este trabajo de Tesis. Gracias también a Romina Del Rey, codirectora de esta Tesis, por su implicación y por su ayuda.

A mi familia y a mis amigas, que de alguna manera también forman parte de este trabajo y a Luzea por permitirme formar parte de su aventura.

A todos ellos, y a algunos más, gracias!

Resumen

El presente trabajo de Tesis se enmarca en el contexto de la acústica en la edificación y de la acústica medioambiental y sus objetivos están muy relacionados con los establecidos en dos proyectos de investigación de financiación pública. En primer lugar en el proyecto europeo '*LIFE09 ENV/ES/000461: Demonstrative solutions to reduce noise pollution in industrial áreas, using finishing technologies in textile materials*'. En él se evalúan y validan laboratorios de tamaño reducido donde se obtienen parámetros acústicos de nuevos materiales en fase de investigación, reduciendo costes y esfuerzos. En segundo lugar, en el proyecto nacional BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT '*Desarrollo de nuevos eco-materiales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basado en el uso de residuos y materias primas renovables*') que está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y cofinanciado con fondos FEDER., dentro del Programa Estatal I+D+I orientada a los Retos de la Sociedad 2013. Las instalaciones de tamaño reducido se depuran para conseguir medidas fiables de bajo coste de nuevos ecomateriales: materiales absorbentes acústicos reciclados y/o naturales, nanomateriales (nanofibras y nanopapel) y eco-composites de base natural y/o reciclada (fibra de naranjo, cáñamo, lino, etc.). Actualmente, buscar soluciones acústicas que se ajusten a los nuevos roles de vida se ha convertido en algo necesario. Por una parte, la nueva legislación incluye exigencias más estrictas que sus precursoras. En el ámbito de la edificación, la aprobación del Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación (DB-HR del CTE) ha dado un giro importante en cuanto a calidad y control, solicitando nuevos parámetros a evaluar y aumentando la exigencia de los ya definidos.

En el caso de acústica ambiental, la Ley 37/2003 de 17 de Noviembre tiene la finalidad de determinar la exposición de la población al ruido ambiental y adoptar planes de acción con vistas a prevenirlo y reducirlo. El intento de disminuir la contaminación acústica, ajustándose a estos planes de acción, supone revisar y optimizar las funciones de las barreras acústicas, uno de los dispositivos de control de ruido más extendido en este campo. Por otra parte, el incremento del coste de la vida y la preocupación creciente de utilizar productos ecoinnovadores que permitan la transición hacia una economía verde, hace necesaria la búsqueda de soluciones acústicas que, cumpliendo con las nuevas exigencias legislativas, resulten más económicas y sostenibles.

Tradicionalmente, las soluciones acústicas se han diseñado empleando, como material absorbente, lanas minerales tóxicas o de difícil reciclaje. Sin embargo, esta tendencia está cambiando y prueba de ello es la puesta en marcha del ‘*HORIZONTE2020*’, H2020, Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Este programa financia proyectos de investigación e innovación de diversas áreas temáticas en el contexto europeo y, concretamente, su Acción 5, ‘*Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas*’, plantea diferentes líneas de actuación. Una de ellas hace referencia a “*posibilitar la transición hacia una economía y una sociedad verdes a través de la ecoinnovación*” reforzando, entre otros, los productos ecoinnovadores. Así pues, dentro de este nuevo grupo de productos se pueden incluir ecomateriales elaborados a partir de desechos de otros procesos de fabricación, de fibras naturales o materiales reciclados que sean susceptibles de convertirse en materiales acústicos aplicables a construcción, medioambiente, industria o, incluso, transportes. Se abre, por tanto, una importante línea de investigación basada en el estudio acústico de este tipo de materiales.

Para probar su aplicabilidad al campo de la acústica deben demostrarse sus propiedades, tales como absorción o aislamiento acústicos, entre otras, y compararlas con las propiedades que presentan materiales tradicionales actualmente implantados en el mercado. No obstante, las normativas de aplicación para obtener estas propiedades, requieren una gran cantidad de material para su evaluación que, a nivel de investigación y desarrollo de producto, es difícil adquirir. Esto lleva a plantear, el objetivo principal de este trabajo de Tesis el cual radica en la evaluación, validación y puesta en marcha de laboratorios de tamaño reducido (cámara de transmisión y cámara reverberante), en los cuales obtener parámetros acústicos esenciales para la caracterización de nuevos materiales y/o ecomateriales, soluciones constructivas y barreras acústicas. La finalidad es contar pequeños laboratorios en los que obtener resultados comparables a los que se obtendrían en un laboratorio de grandes dimensiones, de una forma, rápida, cómoda y, sobretodo, económica.

Tras la consecución del objetivo principal, el objetivo secundario es la incorporación práctica al ámbito de la acústica en la edificación y la acústica medioambiental, de ecomateriales y Green Composites, evaluados en estos nuevos laboratorios de tamaño reducido, como paso previo a su certificación final.

En cuanto a la estructura del trabajo de Tesis, éste se ha dividido en las siguientes partes:

El capítulo 1, plantea el objeto y los antecedentes que motivan esta investigación y detalla la importancia que supone la consecución de los objetivos planteados. El capítulo 2 ubica al lector en el marco legislativo a tener en cuenta durante el desarrollo del trabajo y enumera las adaptaciones y limitaciones obvias que supone trabajar con prototipos de tamaño reducido. Los capítulos 3 y 4 desarrollan el objetivo planteado y los resultados que nos llevan a la consecución del mismo. El capítulo 5, resultados y conclusiones, da una idea de las ventajas que supone contar con laboratorios de tamaño reducido que, validados, se convierten en eficaces herramientas de investigación. En ellos se pueden obtener propiedades acústicas de materiales ecoinnovadores en fase de investigación, con un ahorro en el coste y la posibilidad de realizar un estudio de viabilidad acústica de cualquier nuevo material previa certificación final del mismo. Por último, en el capítulo 6 se reflexiona sobre las futuras líneas de trabajo muy relacionadas con este trabajo de Tesis y algunas de ellas ya en fase de prueba.

Dada la importancia, resulta imprescindible unificar criterios de construcción y estandarización de laboratorios acústicos de tamaño reducido dentro de la comunidad científica. Criterios tales como procedimientos para su construcción, calibración y técnicas de medida, con el fin de homogeneizar los resultados obtenidos, independientemente del laboratorio empleado, son necesarios. Los criterios adoptados en este trabajo de Tesis deberían servir de ayuda a dicha homogeneización.

Resum

El present treball de Tesi s'emmarca en el context de l'acústica en l'edificació i de l'acústica mediambiental i els seus objectius estan molt relacionats amb els establerts en dos projectes d'investigació de finançament públic. D'una banda el projecte europeu 'LIFE09 ENV/ES/000461: *Demonstrative solutions to reduce noise pollution in industrial areas, using finishing technologies in textile materials*'. En aquest s'hi avaluen i validen laboratoris de mida reduïda on s'obtenen paràmetres acústics de nous materials en fase d'investigació, reduint costos i esforços. D'altra banda, en el projecte nacional BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT '*Desarrollo de nuevos eco-materiales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basado en el uso de residuos y materias primas renovables*') que està finançat pel Ministeri d'Economia i Competitivitat de Espanya i cofinançat amb fons FEDER., dins el Programa estatal I+D+I orientat als Reptes de la Societat 2013. Les instal·lacions de mida reduïda es depuren per aconseguir mesures fiables de baix cost de nous ecomaterials: materials absorbents acústics reciclats i / o naturals, nanomaterials (nanofibres i nanopaper) i ecompositos de base natural i/o reciclada (fibra de taronger, cànem, lli, etc.). Actualment, buscar solucions acústiques que s'ajustin als nous rols de vida s'ha convertit en una cosa necessària. D'una banda, la nova legislació inclou exigències més estrictes que les seves precursores. En l'àmbit de l'edificació, l'aprovació del Document Bàsic de Protecció Front al Soroll del Codi Tècnic de l'Edificació (DB-HR del CTE) ha donat un gir important pel que fa a qualitat i control, sol·licitant nous paràmetres a avaluar i augmentant l'exigència dels ja definits.

En el cas d'acústica ambiental, la Llei 37/2003 de 17 de Novembre té la finalitat de determinar l'exposició de la població al soroll ambiental i adoptar plans d'acció per a la seua reducció i prevenció. L'intenta per disminuir la contaminació acústica, ajustant-se a aquests plans d'acció, suposa revisar i optimitzar les funcions de les barreres acústiques, un dels dispositius de control de soroll més estès en aquest camp. D'altra banda, l'augment del cost de la vida i la preocupació creixent d'utilitzar productes ecoinnovadores que permetin la transició cap a una economia verda, fa necessària la recerca de solucions acústiques que, complint amb les noves exigències legislatives, resultin més econòmiques i sostenibles.

Tradicionalment, les solucions acústiques s'han dissenyat emprant, com a material absorbent, llanes minerals tòxiques o de difícil reciclatge. No obstant això, aquesta tendència està canviant i prova d'això és la posada en marxa del *HORIZONTE2020'*, H2020, Programa Marc de Recerca i Innovació de la Unió Europea. Aquest programa finança projectes de recerca i innovació de diverses àrees temàtiques en el context europeu i, concretament, la seva Acció 5, '*Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas*', planteja diferents línies d'actuació. Una d'elles fa referència a "possibilitar la transició cap a una economia i una societat verdes a través de l'ecoinnovació" reforçant, entre altres, els productes ecoinnovadors. Així doncs, dins d'aquest nou grup de productes es poden incloure ecomaterials elaborats a partir de deixalles d'altres processos de fabricació, de fibres naturals o materials reciclats que siguin susceptibles de convertir-se en materials acústics aplicables a construcció, medi ambient, indústria o, fins i tot, transports. S'obre, per tant, una important línia d'investigació basada en l'estudi acústic d'aquest tipus de materials.

Per provar la seva aplicabilitat al camp de l'acústica han de demostrar les seves propietats, com són absorció o aïllament acústics, entre d'altres, i comparar-les amb les propietats que presenten materials tradicionals actualment implantats en el mercat. No obstant això, les normatives d'aplicació per obtenir aquestes propietats, requereixen una gran quantitat de material per a la seva avaluació que, a nivell de recerca i desenvolupament de producte, és difícil adquirir. Això porta a plantejar, l'objectiu principal d'aquest treball de Tesi el qual rau en l'avaluació, validació i posada en marxa de laboratoris de mida reduïda (cambra de transmissió i cambra reverberant), en els quals obtenir paràmetres acústics essencials per a la caracterització de nous materials i/o ecomaterials, solucions constructives i barreres acústiques. La finalitat és comptar amb petits laboratoris en els quals obtenir resultats comparables als que s'obtidrien en un laboratori de grans dimensions, d'una forma, ràpida, còmoda i, sobretot, econòmica.

Després de la consecució de l'objectiu principal, l'objectiu secundari és la incorporació pràctica a l'àmbit de l'acústica en l'edificació i l'acústica mediambiental, d'ecomaterials i Green Composites, avaluats en aquests nous laboratoris de mida reduïda, com a pas previ a la seva certificació final.

Pel que fa a l'estructura del treball de Tesi, aquest s'ha dividit en les següents parts:

El capítol 1, planteja l'objecte i els antecedents que motiven aquesta investigació i detalla la importància que suposa la consecució dels objectius plantejats. El capítol 2 situa el lector en el marc legislatiu a tenir en compte durant el desenvolupament del treball i enumera les adaptacions i limitacions òbvies que suposa treballar amb prototips de mida reduïda. Els capítols 3 i 4 desenvolupen l'objectiu plantejat i els resultats que ens porten a la consecució del mateix. El capítol 5, resultats i conclusions, dóna una idea dels avantatges que suposa comptar amb laboratoris de mida reduïda que, validats, esdevenen eficaços eines d'investigació. En ells es poden obtenir propietats acústiques de materials ecoinnovadores en fase d'investigació, amb un estalvi en el cost i la possibilitat de realitzar un estudi de viabilitat acústica de qualsevol nou material amb el certificat final del mateix. Finalment, en el capítol 6 es reflexiona sobre les futures línies de treball, molt relacionades amb aquest treball de Tesi, i algunes d'elles ja en fase de prova.

Donada la importància, resulta imprescindible unificar criteris de construcció i estandardització de laboratoris acústics de mida reduïda dins de la comunitat científica. Criteris com ara procediments per a la seva construcció, avaluació i tècniques de mesura per tal d'homogeneïtzar els resultats obtinguts, independentment del laboratori emprat, són necessaris. Els criteris adoptats en aquest treball de Tesi haurien de servir d'ajuda a aquesta homogeneïtzació.

Summary

This thesis work is framed in the context of building acoustics and environmental acoustics and its objectives are closely related to those established in two research projects of public funding: First, the European project 'LIFE09 ENV / ES / 000 461: Demonstrative solutions to reduce noise pollution in industrial, using finishing technologies in textile materials', which assess and validate small size laboratories where parameters of new acoustic materials are obtained in the research phase, reducing costs and efforts. Second, the national project BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT 'Development of new eco-sustainable building materials and construction solutions based on the use of waste and renewable raw materials' which is funded by the Ministry of Economy and Competitiveness Spain and cofunded with FEDER funds, within The State Program R+D+I, challenge 2013. Small size facilities are refined in order to obtain reliable low cost measures of new ecomaterials: recycled absorbent acoustic materials and/or nanomaterials (nanofibers and nanopanel) and eco-composites based on natural and/or recycled fibers (orange fiber, hemp , linen, etc.). Currently, find acoustic solutions that meet the new roles of life has become necessary. On the one hand, the new law includes stricter requirements than its precursor. In the field of construction, approval of the Basic Document Protection Against Noise of Technical Building Code (CTE DB-HR) has taken a significant turn for quality and control, applying new parameters to evaluate and increasing requirement already defined.

In the case of environmental acoustics, Law 37/2003 of November 17 is intended to determine the exposure of the population to environmental noise and to adopt action plans in order to prevent and reduce this exposure. The attempt to reduce noise pollution, adjusting to these action plans, suppose a review and optimization the functions of

noise barriers, one of the devices most widespread noise control in this field. Moreover, the increased cost of living and the growing concern of using eco-innovative products, which enable the transition to a green economy, makes it necessary to search for acoustic solutions that meet the new legislative requirements and that be more economical and sustainable.

Traditionally, acoustic solutions are designed using toxic mineral wool or difficult recycling as absorbent material. However, this trend is changing and the proof is the launch of 'HORIZONTE2020' H2020, Framework Program for Research and Innovation of the European Union. It funds research and innovation projects in various subject areas in the European context and, in particular, its Action 5, 'Climate action, environment, resource efficiency and raw materials', poses different lines of action. One refers to "facilitate the transition to a green economy and society through eco-innovation" strengthening, among others, the eco-innovative products. So, within this new product group, we may include ecomaterials made from waste from other manufacturing processes or made from natural or recycled fibers

which are liable to become in acoustic materials applicable to construction, environment, industry or even transport. Therefore, it opens an important line of research based on the acoustic study of these types of materials.

In order to test their applicability to the acoustic field, we have to demonstrate their properties, such as sound absorption and acoustic insulation, among others, and compare the results with the properties of traditional materials currently on the market. However, in order to obtain these properties according the Standard specifications, we need large amounts of material and, at the level of research and product development is difficult to have large quantities. This raises the main objective of this thesis which lies in the assessment, validation and implementation of small laboratories (transmission chamber and reverberation chamber), in which obtain essential acoustic parameters for the characterization of new materials and / or eco-materials, construction solutions and noise barriers. The aim is to have small laboratories where the results are comparable to those obtained in a laboratory of great dimensions, in a way, fast, convenient and above all economic.

After achieving the main objective, secondary objective is the practical addition to the field of building acoustics and environmental acoustics, ecomaterials and Green Composites, evaluated in these new small laboratories, prior to final certification step.

Regarding to the structure of the thesis work, it has been divided into the following parts:

Chapter 1 presents the objectives and the background that motivates this research and details the importance that implies the achievement of the objectives. Chapter 2 places the reader in the legislative framework to be considered during the development of the work and lists the adaptations and obvious limitations of working with prototypes of small size. Chapters 3 and 4 develop the proposed objective and the results which lead us to achieve it. Chapter 5, results and conclusions, gives an idea of the advantages of having small size laboratories. These laboratories, validated, become effective research tools. In these laboratories we can obtain acoustic properties of eco-innovative materials with a cost savings and the ability to have an acoustic feasibility study of any new material before its final certification. Finally, Chapter 6 reflects the future lines of work closely related to this research and some of them are already being tested.

Given the importance of have this type of laboratories, it is essential the unification of criteria of construction and standardization of small acoustic laboratories within the scientific community. Such as procedures for construction, calibration and measurement techniques, in order to homogenize the obtained results, regardless of the laboratory used. The criteria adopted in this thesis should be of assistance to such homogenization.

Contenido

Capítulo 1. Objeto y antecedentes	1
Capítulo 2. Introducción.....	9
2.1. Marco legislativo.....	11
2.1.1. Legislación aplicable a la cámara de transmisión de tamaño reducido	16
2.1.2. Legislación aplicable a la cámara reverberante de tamaño reducido.....	19
2.2. Adaptaciones y limitaciones de la legislación al trabajar con prototipos de tamaño reducido.	20
Capítulo 3. Cámara de transmisión de tamaño reducido.....	29
3.1. Introducción.	29
3.2. Diseño y construcción	30
3.2.1. Diseño de la geometría y el aislamiento acústico de la cámara.	31
3.3. Estado inicial y aplicación de mejoras	35
3.3.1. Comprobación de la geometría.....	35
3.3.2. Actuación sobre el porta-muestras y automatización de movimiento del micrófono.	36
3.4. Micrófonos, posiciones de medida y fuentes de ruido.	40
3.5. Evaluación acústica de la cámara de transmisión de tamaño reducido.	45
3.5.1. Difusividad del campo sonoro.....	47
3.5.2. Transmisiones laterales.	53
3.6. Método de ensayo y resultados.	64
3.7. Influencia de las transmisiones laterales sobre los resultados obtenidos.	68
3.8. Validación de la cámara de transmisión como laboratorio de tamaño reducido	78

3.9. Utilización de la cámara de transmisión de tamaño reducido en proyectos de investigación.....	80
3.10. Análisis de resultados.....	83

Capítulo 4. Cámara reverberante de tamaño reducido.....85

4.1. Introducción.....	85
4.2. Diseño, construcción y primeros resultados.....	87
4.3. Evaluación del estado inicial de la cámara reverberante de tamaño reducido....	92
4.3.1. Geometría y propiedades físicas.....	92
4.3.2. Posiciones de micrófono, fuente y muestra.....	93
4.3.3. Tiempo de reverberación y área de absorción equivalente.....	97
4.3.4. Frecuencia de corte.....	99
4.4. Ensayos en estado inicial y comparativa con ensayos realizados en cámara reverberante normalizada.....	101
4.4.1. Método de ensayo y materiales a evaluar.....	101
4.4.2. Resultados en estado inicial de caracterización de la cámara.....	103
4.5. Propuestas de mejora.....	106
4.5.1. Automatización del movimiento de micrófono durante los ensayos.....	106
4.5.2. Diseño y colocación de paneles difusores.....	111
4.6. Evaluación del efecto de la implementación de mejoras.....	112
4.6.1. Sobre la difusividad del campo sonoro.....	112
4.6.2. Sobre el tiempo de reverberación y área de absorción sonora.....	114
4.7. Ensayos en estado final y comparativa con ensayos realizados en cámara reverberante estandarizada.....	117
4.7.1. Resultados en estado Final.....	118
4.7.2. Propuesta de corrección del coeficiente de absorción y resultados.....	122
4.8. Utilización de la cámara reverberante de tamaño reducido en proyectos de investigación.....	128

4.9. Análisis de resultados.....	131
Capítulo 5. Conclusiones	133
Capítulo 6. Futuras líneas de trabajo.....	137
Referencias	143
Listado de tablas	151
Listado de figuras y gráficos	155
Anexos	163
Anexo 1. Datos adicionales.....	163
Anexo 2. Instrumentación empleada.....	179

Capítulo 1

Objeto y antecedentes

Este documento se presenta para su evaluación como Tesis Doctoral en el Programa de Doctorado en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales de la Universitat Politècnica de València. El desarrollo del trabajo de Tesis ha sido financiado por diversas líneas. Entre el 01 de enero de 2012 y el 31 de diciembre de 2013 se financia por medio de una Beca de Formación de Personal Investigador (FPI de Subprograma 2 de la Universitat Politècnica de València). A partir de esta fecha y hasta el 30 de septiembre de 2014 la financiación proviene del proyecto interno UPV denominado '*Nuevos Composites con Refuerzos de Fibras Naturales para Soluciones Acústicas*'. Al mismo tiempo se trabaja desde el 1 de enero de 2014 en el proyecto Nacional BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT '*Desarrollo de nuevos eco-materiales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basado en el uso de residuos y materias primas renovables*') que está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y cofinanciado con fondos FEDER., dentro del Programa Estatal I+D+I orientada a los Retos de la Sociedad 2013, donde la financiación formal llega el 1 de Octubre de 2014.

En la fase como FPI, donde se inicia este trabajo de Tesis, también se participa de forma activa en el desarrollo del proyecto Europeo LIFE09 ENV/ES/000461: '*Demonstrative solutions to reduce noise pollution in industrial areas, using finishing technologies in textile materials*' (LIFE09 ENV/ES/000461), colaborando estrechamente en el diseño y fabricación de los prototipos de tamaño reducido objeto a estudio de este trabajo, hasta la finalización del proyecto el 31 de diciembre de 2013.

Por otra parte, se lleva a cabo, durante el transcurso del trabajo de Tesis, la dirección, por parte del doctorando, de dos Tesinas Finales de Máster, estrechamente relacionadas

con su trabajo de investigación. La primera de ellas en 2012, '*Mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV*' (Hernández García F. et al., 2012) y la segunda en 2014 '*Aislamiento acústico a ruido aéreo de soluciones multicapa en cámara a escala de sistemas base de pantallas acústicas*' (Garrido-Jiménez, P. et al., 2014) ambas con calificación satisfactoria.

También son fruto de este trabajo los siguientes artículos publicados en revistas de reconocido prestigio y congresos, que se referencian.(Alba J. et al, 2012a; Alba J. et al, 2012b; Alba J. et al, 2014a; Alba J. et al, 2014b; Bertó L. et al, 2013; Del Rey R. et al, 2012c; Del Rey R. et al, 2013a; Del Rey R. et al, 2013b; Del Rey R. et al, 2015)

- Alba J., Del Rey R., Torres J.V., Bertó L., Hervás C. (2012a). *Cámara de transmisión acústica a escala para el estudio de pantallas acústicas*. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.
- Alba J., Del Rey R., Arrebola F., Bertó L., Hervás C. (2012b). '*Cámara reverberante a escala para el estudio de pantallas acústicas*'. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.
- Alba J., Bertó L., Del Rey R. (2014a). '*Validación de una cámara de transmisión a escala para medidas de elementos ligeros*'. 45º Congreso Español de acústica y 8º Congreso Ibérico de acústica – Murcia – Spain.
- Alba J., Bertó L., Arenas J.P. y Del Rey R. (2014b), '*Medida de la resistividad al flujo con un método alternativo electroacústico*'. IX Congreso Iberoamericano de Acústica FIA-2014. Valdivia – Chile.
- Bertó L., Del Rey R., alba J., Teira A. (2013). '*Characterization and validation of a reverberation chamber built to scale in order to test small prototypes of acoustic barriers*'. 42º International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Internoise 2013 – Innsbruck – Austria
- Del Rey R., Alba J., Bertó L., Hervás C., Sanchis V. (2012c). '*Construcción de un tubo de impedancia para la medida de las pérdidas por transmisión*'. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.
- Del Rey, R., Alba, J., Bertó, B., Balart, R., Quirós, R., Sanchis. V.J. (2013a). '*Diseño de prototipos de pantallas acústicas a partir de composites textiles*'. 44º congreso español de acústica, Tecniacústica 2013 – Valladolid – Spain.
- Del Rey R., Alba J., Bertó L., Teira A. (2013b), '*Cosntrucción de un dispositivo de medida para la resistencia al flujo de materiales de bajo coste*'. XXXIV Reunión Bienal de la Sociedad Española de Física. Valencia – Spain.
- Del Rey R., Bertó L., Alba J., Arenas. (2015). '*Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barriers*'. Noise Control Engineering Journal. PENDIENTE DE ACEPTACIÓN.

La conclusión del presente trabajo de Tesis supone un punto y seguido en la investigación de nuevos materiales acústicos ecoinnovadores, aporta potentes herramientas de trabajo en este campo y abre una serie de futuras líneas de investigación en las que, a día de hoy, ya se está trabajando e incluso se han publicado primeros resultados de algunas de ellas (Alba J. et al, 2014b; Del Rey R. et al 2013b; Del Rey, R. et al, 2012c)

El **objetivo principal** de este trabajo de Tesis es la evaluación, validación y puesta en marcha de laboratorios de tamaño reducido, en los cuales podemos obtener parámetros acústicos esenciales para la caracterización de nuevos materiales y/o ecomateriales, soluciones constructivas y barreras acústicas. La finalidad es contar con pequeños laboratorios en los cuales se puedan obtener resultados comparables a los que se obtendrían en un laboratorio de grandes dimensiones. Así pues, se convierten en potentes herramientas en el campo de la investigación de nuevos materiales o soluciones constructivas, ya que nos permiten realizar ensayos con el 2.5% o 3% de la cantidad de material que se utiliza habitualmente en un laboratorio normalizado. Esta reducción en la cantidad de material necesario para realizar ensayos, supone un ahorro importante, tanto desde el punto de vista de fabricación de prototipos como desde el punto de vista de transporte y evaluación del material.

Además, tras la consecución del objetivo principal, y como objetivo secundario, se pretende llevar a cabo la incorporación práctica al ámbito de la acústica en la edificación y de la acústica medioambiental, de ecomateriales y Green Composites, evaluados acústicamente en los nuevos laboratorios de tamaño reducido.

Cabe destacar que el objetivo de este trabajo de Tesis está relacionado con la *Acción 5* del *HORIZONTE2020* (www.eshorizonte2020.es) *Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas*. *HORIZONTE2020*, H2020, es el Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. Este programa financia proyectos de investigación e innovación de diversas áreas temáticas en el contexto europeo, contando con casi 80.000 millones de euros para el periodo 2014-2020. Investigadores, empresas, centros tecnológicos y entidades públicas tienen cabida en este programa.

La *Acción 5, Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas*, es la quinta prioridad temática de los Retos Sociales planteados en Horizonte 2020. El objetivo general es lograr una economía y una sociedad más eficientes en el uso de los diversos recursos naturales y del agua que sean resistentes al cambio climático, la protección y la gestión sostenible de los recursos y ecosistemas naturales, así como un uso y abastecimiento sostenibles de materias primas, a fin de satisfacer las necesidades de una población mundial cada vez mayor dentro de los límites sostenibles de los recursos naturales y ecosistemas del planeta. Dentro de esta *Acción*, se plantean diversas líneas de actuación. Entre ellas se encuentra la línea referente a *posibilitar la transición hacia una economía y una sociedad verdes a través de la ecoinnovación*. El objetivo de esta actividad es mejorar todas las formas de “ecoinnovación” que permitan

la transición hacia una economía verde, entre ellas, reforzar las tecnologías, los procesos, los servicios y los productos ecoinnovadores.

Dentro de este nuevo grupo de productos ecoinnovadores se pueden incluir ecomateriales elaborados a partir de desechos de otros procesos de fabricación, de fibras naturales o de materiales reciclados y que sean susceptibles de convertirse en materiales acústicos aplicables a construcción, medioambiente, industria o incluso transportes. Para probar la aplicabilidad al campo de la acústica de estos materiales ecoinnovadores deben demostrarse sus propiedades acústicas tales como absorción acústica o aislamiento acústico, entre otras, y compararlas con las propiedades que presentan materiales tradicionales actualmente implantados en el mercado.

No obstante, las normativas de aplicación para obtener las propiedades acústicas de absorción y aislamiento de cualquier producto, requieren cantidades grandes de dicho producto para poder evaluarlo, entre 10m^2 y 12m^2 ⁽¹⁾ para absorción acústica (UNE-EN ISO 354:2004) y un mínimo de 10m^2 para aislamiento acústico (UNE-EN ISO 10140-5:2011). El inconveniente es que, a nivel de investigación y desarrollo de un nuevo ecomaterial, no se suele contar con grandes cantidades del mismo

De ahí, la importancia de contar con laboratorios de tamaño reducido, calibrados y validados, como potente herramienta de trabajo en investigación, donde poder obtener estas propiedades acústicas con pequeñas cantidades de material, ahorrando costes y permitiendo realizar un estudio de viabilidad acústica de nuevos materiales ecoinnovadores previa certificación final de los mismos.

Por lo que se refiere a los antecedentes y estado actual de los conocimientos científico-técnicos en cada uno de estos campos, y relacionado con la aportación a los mismos, de nuevos materiales sostenibles y técnicas de caracterización acústica, podemos comentar lo siguiente:

Dentro de la acústica en la edificación, la entrada en vigor de la parte de ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) (DB-HR CTE, 2010) supuso importantes cambios a la hora de abordar la acústica en este campo. Su principal objetivo fue limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios.

Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que los conforman tengan las características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos, del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio y del ruido reverberante de los recintos. Para alcanzar estas nuevas exigencias, el desarrollo del DB-HR ha ido

¹ La muestra debe tener un área de entre 10m^2 y 12m^2 . Si el volumen, V , de la cámara es mayor de 200m^3 , el límite superior para el área de la muestra de ensayo debe incrementarse en el factor $(V/200)^{2/3}$. El área elegida depende del volumen de la cámara y de la capacidad de absorción de la muestra a ensayo.

unido a la ejecución de un Catálogo de Elementos Constructivos (CEC) (CEC, 2010) que sirve como referencia a la hora de diseñar una determinada solución constructiva o de acondicionar acústicamente un recinto. Este catálogo contempla actualmente el resultado de un análisis detallado de las soluciones que, hasta la fecha, se han ido utilizando. No obstante, cabe apuntar que no es un documento de carácter reglamentario, por lo que se puede utilizar cualquier solución constructiva elaborada a partir de nuevos materiales no contemplada en él, siempre que se justifique el cumplimiento de estos nuevos materiales a las exigencias establecidas en el CTE (DB-HR CTE, 2010).

Desde finales de siglo XIX, cuando el profesor Wallace Clement Sabine (Sabine W.C. et al, 1964) consiguió eliminar el exceso de reverberación en el auditorio del museo de Arte Fogg de la Universidad de Harvard, colocando paneles de fieltro de pelo de animal en paredes y techos, los materiales absorbentes acústicos han evolucionado considerablemente, tanto en forma como en eficiencia, hasta llegar a los materiales que hoy en día existen en el mercado.

En la actualidad se incrementa la necesidad de buscar nuevos materiales y utilizar materiales ecoinnovadores reciclados o reciclables. Son muchas las líneas de investigación abiertas acerca de nuevos ecomateriales elaborados a partir de restos o desechos de otros materiales u otros procesos de fabricación como, por ejemplo, neumáticos fuera de uso, materiales de construcción, restos de procesos de fabricación en industria textil, etc. (Bertomeu, D. et al., 2012; Serrano, A. et al., 1962; Benkreira, H. et al., 2011; Leiva, C. et al., 2013; Del Rey, R. et al., 2012^a; Rushforth, I.M. et al., 2005; Maderuelo-Sanz, R. et al., 2012). Además se han introducido en la fabricación de nuevos materiales el uso de fibras naturales como el Kenaf (*Hibiscus cannabinus*, planta tropical de la familia de las malváceas), el cáñamo, el algodón o el Jute (*Corchorus capsularis*, también de la familia de las malváceas) (Glé, P. et al., 2011; Fatima, S. et al., 2011; Ramis, J. et al., 2010; Del Rey, R. et al., 2011a; Ekici, B. et al., 2012).

En la misma línea, contamos actualmente con materiales elaborados a partir de poliéster reciclado (Younoun, I. et al., 2003; CHING-WEN, L. et al., 2005) o lanas de poliéster elaboradas a partir de los reciclados de botellas de plástico PET (Del Rey, R. et al., 2011b), así como espumas elaboradas de desechos textiles y utilizadas como láminas anti-impacto en la ejecución de suelos flotantes (Del Rey, R. et al., 2010).

En definitiva, se intenta introducir materiales amigables con el medioambiente como solución a problemas de ruido o reverberación acústica. Para ello, es necesario caracterizarlos acústicamente, conociendo su comportamiento frente a la incidencia de una onda acústica, bien de forma experimental, bien mediante modelos predictivos, (Delany, M.E. et al., 1970; Qunli, W. et al., 1988; Miki, Y. et al., 1990; Mechel, F.P. et al., 1988; Mechel, F.P. et al., 1992; Komatsu, T. et al., 2008; Allard, J.F. et al., 1992; Del Rey, R. et al., 2012b; Garai, M. et al., 2005), que evalúan el comportamiento acústico de materiales porosos a partir de magnitudes conocidas, como la resistencia específica al flujo o el coeficiente de absorción en incidencia normal.

Desde el punto de vista de caracterización experimental, los laboratorios de tamaño reducido, objeto estudio de esta Tesis, juegan un papel fundamental para la caracterización acústica de nuevos materiales en fase de investigación y desarrollo, obteniendo directamente sus propiedades de absorción acústica en el caso de materiales absorbentes.

Respecto al campo de acústica medioambiental, sabemos que, hoy en día, la contaminación acústica afecta a gran parte de la sociedad. Los informes de la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2000) el desarrollo y puesta en marcha de legislación sobre el ruido a nivel europeo (COM, 2002), y proyectos subvencionados por la European Commission en su 7º Programa Marco como el proyecto QUIESST (QUIESST, 2009), dan idea de su importancia. En este sentido, uno de los elementos más utilizados son las barreras acústicas, que reducen los niveles sonoros que llegan a la población, procedentes de los grandes ejes viarios, ferroviarios y aglomeraciones. En España, la Ley 37/2003 de 17 de Noviembre del ruido (Ley 37/2003, 17 de Noviembre, 2003), tiene como finalidad determinar la exposición de la población al ruido ambiental, poner a su disposición información sobre dicha exposición y sus consecuencias y adoptar planes de acción con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental, así pues, el intento de disminuir la contaminación acústica ajustándose a estos planes de acción ha hecho necesario revisar y/o optimizar las funciones de las barreras acústicas, puesto que es uno de los elementos reductores de ruido más utilizados para paliar este problema. Además, debido a la puesta en marcha de la norma ISO 3382-3:2012 (UNE-EN ISO 3382-3:2012), referente a la medida de los parámetros de calidad acústica en oficinas diáfanas, el uso de este tipo de elementos puede extenderse a estos ámbitos con la finalidad de mejorar las condiciones acústicas en los puestos de trabajo, en ocasiones deficientes, (Bozena, S. et al., 2010; Nilsson, E. et al., 2010) (Bradley, J.S. et al., 2003; Patel, J.A. et al., 2002), adaptando las barreras acústicas empleadas como elementos reductores de ruido en exteriores, a paneles de separación acústica empleados en interiores o a elementos unitarios de absorción acústica.

Algunas barreras acústicas incorporan materiales absorbentes fabricados en muchos casos con base mineral y una carcasa, habitualmente de acero o plástico. Sin embargo, la tendencia actual, anteriormente comentada, nos lleva a utilizar materiales absorbentes reciclados y reciclables como parte componente de barreras acústicas para exteriores (Del Rey, R. et al., 2013a; García-Valles, M. et al., 2008), de paneles de separación acústica en oficinas o elementos de absorción acústica para interiores y materiales tipo composite (López, J.P. et al., 2012; Zhu X. et al., 2014) como estructura de dichas barreras o elementos de separación. De esta forma, no solo estamos utilizando materiales más ecológicos, sino que estamos dando solución a otro problema ambiental, que es la acumulación de residuos y la necesidad de gestión de los mismos, dándoles una nueva vida útil.

De la misma forma que en la caracterización acústica de materiales absorbentes, el hecho de desarrollar en este trabajo de Tesis laboratorios de medida de tamaño reducido, con los que poder evaluar las propiedades de absorción y aislamiento de las nuevas barreras ecológicas, con muestras pequeñas de las mismas, ayudará a reducir significativamente los costes y los recursos necesarios para el impulso de nuevos productos.

Toda esta evolución en el desarrollo de nuevos materiales reciclados y reciclables, así como la evolución en las técnicas y dispositivos de caracterización acústica desde el punto de vista experimental o en el desarrollo de nuevos modelos predictivos, nos da una idea de la importancia que están alcanzando este tipo de materiales frente a los utilizados más comúnmente: tales como la lana de roca o la fibra de vidrio (Ballagh, K.O. et al., 1996). Así como la relevancia que tiene contar con herramientas adecuadas para su caracterización acústica en fase de investigación y desarrollo de producto, que nos permitan obtener resultados óptimos ahorrando costes y esfuerzos.

Respecto al diseño, construcción y utilización de laboratorios de tamaño reducido, se debe tener en cuenta que autores como Christoph Kling (Kling, C. et al., 2008), Katarzyna Baruch (Baruch, K. et al., 2014), Chung. Y (Chung, Y. et al., 1976) o Eric D. Ricciardi (Ricciardi, E.D. et al., 2013) entre otros, ya diseñan y utilizan este tipo de recintos de tamaño reducido adaptados muy específicamente a sus investigaciones. Estos recintos o laboratorios, son cada vez más empleados para desarrollo de productos en fase de investigación, debido, entre otros aspectos, a la reducción de costes que su utilización supone.

No obstante, parece ser que no existe en la comunidad científica una uniformidad a la hora de construirlos y/o utilizarlos. Aunque la mayoría de investigadores parten de la misma base teórica para su diseño, aspectos tales como los materiales empleados para su construcción, los pasos a seguir para su validación una vez construidos o la técnica empleada en el proceso de medida, no siguen un mismo patrón, no están normalizados.

En el presente trabajo de Tesis, se desarrollan con detalle estos aspectos para una cámara de transmisión y para una cámara reverberante, ambas de tamaño reducido, con la intención de adaptarlos, con la mayor precisión posible, a los procesos normalizados.

El resultado del trabajo da una idea de la importancia que supone la utilización de estos laboratorios en procesos de desarrollo e investigación de nuevos productos y, como tal, se considera imprescindible abordar esta necesidad de unificar criterios de construcción y fijar criterios de normalización en recintos acústicos de tamaño reducido dentro de la comunidad científica con la finalidad de homogeneizar resultados obtenidos independientemente del laboratorio de tamaño reducido empleado.

Capítulo 2

Introducción

Vista la importancia que supone contar con laboratorios de tamaño reducido, evaluados y validados, para la caracterización acústica de materiales y configuraciones en fase de desarrollo, pasamos a ver en este capítulo cuáles son las principales características de los estudiados en este trabajo de Tesis. Conjuntamente, se verán diferentes aspectos normativos necesarios para poder desarrollar el trabajo, así como algunos términos y definiciones de interés.

Un laboratorio o cámara acústica de tamaño reducido es aquel que reproduce a escala la geometría de laboratorios o cámaras acústicas normalizadas. A día de hoy no existe estandarización para su diseño, construcción y evaluación, pero sí se pretende que sigan las especificaciones de las normas que rigen el comportamiento de sus homólogos de tamaño normalizado, bajo ciertas y obvias limitaciones, ya que sus dimensiones reducidas no les permiten alcanzar algunas de dichas especificaciones. No obstante, el principal objetivo de este trabajo de Tesis es evaluar y validar estos laboratorios para que su comportamiento sea lo más afín posible a sus homólogos normalizados y puedan servir de predecesores o antesala a éstos, convirtiéndose en una potente herramienta de trabajo en investigación con la cual poder obtener propiedades acústicas de nuevos materiales usando muestras de tamaño reducido. Con ellas se consigue ahorrar costes y se permite realizar un estudio de viabilidad acústica de nuevos materiales ecoinnovadores previa certificación final de los mismos.

Los laboratorios o cámaras acústicas de tamaño reducido en los que se centra este trabajo de Tesis son una Cámara de Transmisión y una Cámara Reverberante. La primera es un laboratorio específico compuesto por dos recintos acoplados y aislados acústicamente del exterior, en el que se evalúa el aislamiento acústico a ruido aéreo de determinados materiales o soluciones constructivas. La segunda consta de un solo recinto aislado del ruido exterior, con superficies internas muy reflectantes de tal manera que en su interior se consiga un tiempo de reverberación elevado en un amplio margen de frecuencias. En este tipo de recintos se realizan ensayos, entre otros, del coeficiente de absorción sonora de materiales y objetos.

Respecto a la Cámara de Transmisión de Tamaño Reducido, su diseño y construcción se basa en las especificaciones normativas para este tipo de laboratorios (UNE-EN ISO 10140-5:2011) y su tamaño está escalado en un factor 1:5 respecto a un laboratorio normalizado.

En el caso de la Cámara Reverberante de Tamaño Reducido, su diseño y construcción se basa en la cámara reverberante normalizada de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia y, en consecuencia, en las especificaciones de la norma UNE EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004). Su tamaño está escalado en un factor 1:6 respecto a su homóloga normalizada.

Las relaciones de escalado seleccionadas son el resultado de un compromiso entre el tamaño de la cámara y el margen de frecuencias que se puede evaluar. Relaciones más bajas (1:4 o 1:3) darían como resultados prototipos que ya no se pueden considerar de tamaño reducido, mientras que relaciones superiores darían como resultado prototipos de tamaño tan pequeño que sólo podrían ser fiables a frecuencias altas.

La puesta en marcha de estos pequeños laboratorios o cámaras acústicas supondrá, por supuesto, el desarrollo y validación de una adaptación de las técnicas de medición convencionales a los laboratorios de tamaño reducido.

2.1. Marco legislativo

Como se ha comentado anteriormente, los laboratorios o cámaras acústicas de tamaño reducido siguen las especificaciones de las normas que rigen el comportamiento de sus homólogos de tamaño normalizado, bajo ciertas y obvias adaptaciones y limitaciones, ya que sus dimensiones reducidas no les permiten alcanzar algunas de dichas especificaciones.

Dichas normas son:

- UNE-EN ISO 10140-2:2011. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2. Medición del aislamiento acústico a ruido aéreo (ISO-10140-2:2010).
- UNE-EN ISO 10140-4:2011. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 4. Procedimientos y requisitos de medición. (ISO-10140-4:2010).
- UNE-EN ISO 10140-5:2011. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5. Requisitos para instalaciones y equipos de ensayos. (ISO 10140-5:2010).
- UNE-EN ISO 354:2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003)

En los apartados 2.1.1. y 2.1.2. se concreta la legislación aplicable a cada uno de los prototipos de tamaño reducido estudiados. Mientras que en el apartado 2.2. se especifican cuáles son las adaptaciones y limitaciones de la legislación a tener en cuenta, resumiéndolas de manera gráfica en la Figura 2.1.

Por otra parte, resulta de interés enumerar algunos términos, relacionados con la legislación aplicable, cuya definición es de utilidad por su aplicación para los fines de este documento de Tesis.

Estos términos son:

Tiempo de reverberación, T: Tiempo, en segundos, necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60dB después del cese de la emisión de la fuente sonora.

Nota 1 – El tiempo de reverberación se expresa en segundos

Nota 2 – La definición de T con una caída de 60dB puede obtenerse por extrapolación lineal de rangos de evaluación más cortos.

Nota 3 – Esta definición se basa en la suposición de que, en el caso ideal, hay una relación lineal entre el nivel de presión sonora y el tiempo, y que el nivel de ruido de fondo es suficientemente bajo

Área de absorción sonora equivalente de un recinto, A: área hipotética de una superficie totalmente absorbente sin efectos de difracción que, si fuera el único elemento absorbente en el recinto, tendría el mismo tiempo de reverberación que el recinto considerado.

Nota 1 – El área se expresa en metros cuadrados

Nota 2 – Para la cámara reverberante vacía, esta magnitud se representa por A1; para la cámara reverberante con la muestra se representa por A2.

Coefficiente de absorción sonora, α_s : Cociente entre el área de absorción sonora equivalente de una muestra de ensayo y el área de la muestra de ensayo.

Nota 1 – Para absorbentes en los que ambos lados se encuentran expuestos, el coeficiente de absorción sonora es el área de absorción sonora equivalente de la muestra dividida por el área de los dos lados de la muestra

Nota 2 – El coeficiente de absorción sonora evaluado a partir de mediciones de tiempo de reverberación puede tomar valores superiores a 1,0 (por ejemplo, a causa de efectos de difracción) y, por lo tanto, α_s no se expresa como porcentaje.

Nota 3 – Se emplea el subíndice “s” para evitar confusión con el coeficiente de absorción sonora definido como el cociente de energía entre la energía sonora no reflejada y energía sonora incidente en el caso en que una onda plana alcanza una superficie plana con un cierto ángulo de incidencia. Ese coeficiente de

absorción sonora geométrico es siempre menor que 1.0 y puede, por lo tanto, expresarse como porcentaje.

Índice de reducción acústica, R: Diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica, W_1 , que incide sobre el elemento de ensayo y la potencia acústica, W_2 , radiada por el elemento de ensayo hacia el otro lado

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2}$$

Nota 1 – R se expresa en decibelios

Nivel de ruido de fondo: En medidas de aislamiento acústico se refiere al nivel de presión sonora medido en el recinto receptor procedente de todas las fuentes distintas al altavoz o a la máquina de martillos en el recinto emisor. En medidas de coeficiente de absorción sonora de materiales, se refiere al nivel de presión sonora medido en el interior de la cámara reverberante procedente de todas las fuentes distintas al altavoz.

Nota 1 – El nivel de ruido de fondo se expresa en decibelios

Índice de reducción de vibraciones, K_{ij} : Magnitud relacionada con la transmisión de potencia vibratoria a través de una unión entre elementos estructurales, normalizada con objeto de hacerla una magnitud invariante. Se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas direcciones sobre la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la siguiente ecuación:

$$K_{ij} = \bar{D}_{v,ij} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}}$$

donde

$\bar{D}_{v,ij}$ es la diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente entre los elementos i y j, en decibelios.

l_{ij} es la longitud de la unión entre los elementos i y j, en metros.

a_i, a_j son las longitudes de absorción equivalentes de los elementos i y j, en metros.

La longitud de absorción equivalente, de cada elemento i o j, viene dada por:

$$a = \frac{2,2\pi^2 S}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}}$$

donde

T_s es el tiempo de reverberación estructural del elemento i o j, en segundos;

S es el área del elemento i o j, en metros cuadrados;

f es la frecuencia central de la banda, en Hercios;

f_{ref} es la frecuencia de referencia: $f_{ref} = 1000Hz$;

c_o es la velocidad del sonido en el aire, en metros por segundo.

Nota 1 – El K_{ij} se expresa en decibelios

Nota 2 – La longitud de absorción equivalente es la longitud de una arista imaginaria totalmente absorbente de un elemento al que se le supone una frecuencia crítica de 1000Hz, y que da las mismas pérdidas que las pérdidas totales del elemento en una situación dada.

Transmisión directa: Transmisión debida sólo al sonido incidente sobre un elemento separador y radiado directamente por él (procedencia estructural) o transmitido a través de sus partes (procedencia aérea) tales como rendijas, dispositivos que mueven aire o colijas.

Transmisión indirecta: Transmisión del sonido desde un recinto emisor al recinto receptor, a través de caminos de transmisión distintos del directo. Se puede dividir en transmisión aérea y estructural. Ésta última se llama transmisión por flancos.

Índice de reducción acústica por flancos, R_{ij} : Es menos diez veces el logaritmo del factor de transmisión por flancos, que es el cociente entre la potencia acústica, W_{ij} , radiada desde la construcción de flanco j al recinto receptor debida al sonido incidente sobre la construcción i del recinto emisor, y la potencia acústica W_1 que incide sobre un área de referencia en el recinto emisor. El área del elemento separador se elige como área de referencia.

$$R_{ij} = -10 \lg \tau_{ij} \quad dB$$

donde

$$\tau_{ij} = W_{ij} / W_1$$

Nota 1 – El R_{ij} se expresa en decibelios.

Nota 2 – El área del elemento separador se elige como referencia ya que así la contribución de cada camino de transmisión a la transmisión total está directamente indicado lo que no sucede en otros casos.

Tiempo de reverberación estructural, T_s : Tiempo requerido para que el nivel de aceleración en una estructura decrezca en 60dB una vez que la fuente sonora estructural ha cesado

Nota 1 – El tiempo de reverberación estructural se expresa en segundos

Nota 2 – T_s se calcula utilizando la extrapolación lineal de rangos de evaluación mucho más cortos que 60dB, preferiblemente 15dB o 20dB

Elemento ligero: Elemento para el que las condiciones en los límites, cuando se monta en la instalación de ensayo, no tienen una influencia en el resultado de ensayo, por ejemplo porque el elemento es más ligero que la instalación de ensayo que le rodea o está altamente amortiguado.

Nota 1 – Un elemento de ensayo se puede considerar como altamente amortiguado en el caso de una fuerte disminución de las vibraciones a través del elemento

Nota 2 – Las paredes sujetas por rastreles de madera o de metal, o los suelos de madera sobre vigas, a menudo cumplen con esta definición de elemento ligero.

2.1.1. Legislación aplicable a la cámara de transmisión de tamaño reducido

La legislación aplicable a una cámara de transmisión la rige el conjunto de normas ISO 10140, en todas sus partes, que se refieren a la medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos de construcción.

En la Tabla 2.1. se puede ver la estructura y contenidos del conjunto de normas ISO 10140.

Tabla 2.1. Estructura y contenidos del conjunto de Normas ISO 10140

Parte relevante de la Norma ISO 10140	Objetivo principal, contenidos y uso	Contenido detallado
ISO 10140-1:2010	<i>Indica el procedimiento de ensayo adecuado para elementos y productos. Para algunos tipos de elementos/productos, puede contener instrucciones adicionales o más específicas sobre las magnitudes y el tamaño del elemento de ensayo y sobre la preparación, el montaje y las condiciones de funcionamiento. Si no se incluyen detalles específicos se seguirán las directrices generales de acuerdo con la Norma ISO 10140-2 y la Norma ISO 10140-3</i>	Referencias adecuadas a la Norma ISO 10140-2 y a la Norma ISO 10140-3 e instrucciones específicas y adicionales relacionadas con el producto sobre: <ul style="list-style-type: none"> - Magnitudes específicas medidas; - Tamaño del elemento de ensayo; - Condiciones límite y de montaje; - Acondicionamiento, condiciones de ensayo y funcionamiento; - Características adicionales para el informe de ensayo.
ISO 10140-2:2010	<i>Indica un procedimiento completo para las mediciones de aislamiento acústico al ruido aéreo, de acuerdo con la Norma ISO 10140-4 y la Norma ISO 10140-5. Para productos sin normas de aplicación específicas, es suficientemente completo y general para la realización de las mediciones. Sin embargo, para productos con normas de aplicación específicas, las mediciones se realizan de acuerdo con la Norma ISO 10140-1, si está disponible.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Definiciones de las principales magnitudes medidas - Montaje general y condiciones en los límites - Procedimiento general de medición - Procesamiento de datos - Informe de ensayo (puntos generales)
ISO 10140-3:2010	<i>Indica un procedimiento completo para las mediciones del aislamiento acústico al ruido de impactos, de acuerdo con la Norma ISO 10140-4 y la Norma ISO 10140-5. Para productos sin normas de aplicación específicas, es suficientemente completo y general para la realización de las mediciones. Sin embargo, para productos con normas de aplicación específicas, las mediciones se realizan de acuerdo con la Norma ISO 10140-1, si está disponible.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Definiciones de las principales magnitudes medidas - Montaje general y condiciones en los límites - Procedimiento general de medición - Procesamiento de datos - Informe de ensayo (puntos generales)

ISO 10140-4:2010	<i>Indica todas las técnicas de medición básicas y los procesos para la medición, de acuerdo con la Norma ISO 10140-2 y la Norma ISO 10140-3 o cualificaciones de instalaciones de acuerdo con la Norma ISO 10140-5. La mayoría del contenido se complementa con un software.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Definiciones.</i> - <i>Rango de frecuencias</i> - <i>Posiciones de micrófono</i> - <i>Medición del nivel de presión sonora Promediado, espacial y temporal</i> - <i>Corrección por ruido de fondo</i> - <i>Mediciones del tiempo de reverberación</i> - <i>Mediciones del factor de pérdida</i> - <i>Mediciones de baja frecuencia</i> - <i>Potencia acústica radiada mediante la medición de la velocidad</i>
ISO 10140-5:2010	<i>Especifica toda la información necesaria para diseñar, construir y cualificar la instalación del laboratorio, sus accesorios adicionales y el equipo de medición (hardware)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Instalación de ensayo, criterios de diseño:</i> - <i>Volúmenes, dimensiones</i> - <i>Transmisión por flancos</i> - <i>Factor de pérdidas en laboratorio</i> - <i>Índice de reducción acústica máximo alcanzable</i> - <i>Tiempo de reverberación</i> - <i>Influencia de la falta de difusividad en el laboratorio</i> - <i>Aberturas de ensayo:</i> - <i>Aberturas estándar para paredes y suelos</i> - <i>Otras aberturas (ventanas, puertas, elementos técnicos pequeños)</i> - <i>Paredes de relleno en general</i> - <i>Requisitos para el equipo:</i> - <i>Altavoces, número, posiciones</i> - <i>Máquinas de martillos y otras fuentes de impacto</i> - <i>Equipo de medición</i> - <i>Construcciones de referencia:</i> - <i>Elementos básicos para la mejora del aislamiento al ruido aéreo y de impactos</i> - <i>Curvas de rendimiento de referencia correspondientes.</i>

Desde el punto de vista de **diseño y construcción** es de aplicación la Norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 (UNE-EN ISO 10140-5:2011) en la que se definen los criterios de diseño tales como dimensiones y volúmenes, transmisión por flancos, tiempos de reverberación y difusividad del campo sonoro en el recinto emisor.

Respecto al **método de medición** del aislamiento acústico a ruido aéreo de productos de construcción en este tipo de laboratorios, se siguen las especificaciones de la Norma UNE-EN ISO 10140-2:2011 (UNE-EN ISO 10140-2:2011). Esta Norma define el procedimiento general de ensayo, cómo se procesan los datos obtenidos de dicho ensayo y cómo se expresan los resultados finales. Además define los requisitos generales para la preparación, el curado, la instalación y el montaje del elemento a ensayo, en función del tipo de elemento y del tipo de abertura en que se instale y presenta los aspectos que se deberían incluir en el informe final de resultados.

En cuanto a **procedimientos y requisitos de medición**, es de aplicación la Norma UNE-EN ISO 10140-4:2011 (UNE-EN ISO 10140-4:2011) en la que se define el rango de frecuencias a evaluar, las distancias de separación mínimas entre posiciones de micrófono y número de posiciones, los tiempos de promediado, las correcciones a aplicar por ruido de fondo, cómo medir el tiempo de reverberación en el recinto receptor, etc.

Queda fuera de aplicación, para este trabajo de Tesis en concreto, la parte 3 del conjunto de Normas ISO 10140, pues hace referencia a la medida del aislamiento acústico a ruido de impactos y la cámara de transmisión de tamaño reducido evaluada en este trabajo de Tesis está pensada, en principio, sólo para evaluación de aislamiento acústico a ruido aéreo.

2.1.2. Legislación aplicable a la cámara reverberante de tamaño reducido

Al contrario que para una cámara de transmisión, una cámara reverberante no cuenta con una normativa concreta que especifica toda la información necesaria para diseñar, construir y cualificar la instalación, sus accesorios adicionales y el equipo de medición.

No obstante estos factores quedan recogidos en Normas que hacen uso de este tipo de laboratorios para alcanzar sus objetivos. Normas como la Norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004) que hace referencia a la normalización del proceso de medición de la absorción acústica en una cámara reverberante o la Norma UNE-EN ISO 3741:2011 (UNE-EN ISO 3741:2011) que hace referencia a la determinación de los niveles de potencia acústica y de energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica.

Se diseña y construye la cámara reverberante de tamaño reducido estudiada en el presente trabajo de Tesis para poder evaluar el coeficiente de absorción acústica de nuevos materiales ecoinnovadores. Por tanto, respecto a diseño, construcción y parámetros a cumplir se emplearán las especificaciones marcadas en la Norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004).

La Norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004), tiene como objetivo especificar un método de medición del coeficiente de absorción sonora de materiales acústicos empleados como tratamientos de paredes o de techos, o el área de absorción sonora equivalente de objetos, tales como muebles, personas o absorbentes volumétricos, en una cámara reverberante. Así pues, integra, en su apartado 6.1. las condiciones que debe cumplir una cámara reverberante en cuanto a volumen, forma, difusión del campo sonoro y área de absorción sonora. Además cuenta con un Anexo normativo (Anexo A) donde se define cómo alcanzar una correcta difusividad del campo sonoro en el interior de la cámara reverberante.

Respecto a las características de las muestras a ensayo en una cámara reverberante, sigue siendo la Norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004) la que las define, así como los métodos de medición del tiempo de reverberación, la expresión y presentación de los resultados y los datos que debe contener un informe que hace referencia a ensayos en este tipo de laboratorios.

2.2. Adaptaciones y limitaciones de la legislación al trabajar con prototipos de tamaño reducido.

A continuación se describen, de manera general, las especificaciones normativas que requieren una adaptación y/o suponen una limitación para trabajar con prototipos de tamaño reducido, concretamente con los laboratorios estudiados en este trabajo de Tesis.

Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido.

Respecto al diseño y construcción de la cámara de transmisión: UNE-EN ISO 10140-5:2011, al trabajar con prototipos de tamaño reducido, se plantean las siguientes adaptaciones y limitaciones.

Tabla 2.2. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Generalidades

Generalidades. Cámara de transmisión			
Especificación de norma UNE-EN ISO 10140-5:2011	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
Instalación con dos recintos adyacentes con una abertura de ensayo entre ellos		No requiere adaptación	No supone limitación

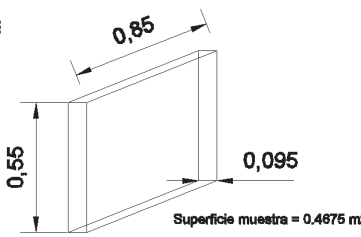
Tabla 2.3. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Recintos de Ensayo

Recintos de ensayo. Cámara de transmisión			
Especificación de norma UNE-EN ISO 10140-5:2011	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
Volumen		Sí requiere adaptación	No supone limitación
$V_{\min} = 50\text{m}^3$ Diferencia entre V_{emisor} y $V_{\text{receptor}} \geq 10\%$	$V_{\min} = 0.4\text{m}^3$ $V_{\text{receptor}} = 0.39 \approx 0.40 \text{ m}^3$ $V_{\text{emisor}} = 0.48 \text{ m}^3$ Diferencia entre V_{emisor} y $V_{\text{receptor}} > 10\%$		
Difusión		Sí requiere adaptación	Sí supone limitación
Se deben instalar elementos difusores para evitar grandes variaciones de niveles de presión sonora en el interior del recinto, que indiquen la presencia de ondas estacionarias fuertes y dominantes.	Han sido instalados adaptándose a las dimensiones de la cámara y evaluada su influencia. Colocación, características y dimensiones en apartado 3.5.1 del presente trabajo. Debido a las reducidas dimensiones del prototipo, no se consigue una correcta difusión para todo el rango de frecuencias de interés y esto supone una limitación.		
Tiempo de Reverberación, T		Sí requiere adaptación	Sí supone limitación
Debe cumplirse la siguiente ecuación: $1 \leq T \leq 2 \cdot (V/50)^{2/3}$	Teniendo en cuenta el escalado 1:5, respecto a norma, del prototipo de tamaño reducido: $0,2 \leq T \leq 0,40 \cdot (V/0.40)^{2/3}$ Es decir, nuestros límites superior e inferior de tiempo de reverberación serán: Para cámara Emisora: $0.20 \leq T \leq 0.45$ Para cámara Receptora: $0.20 \leq T \leq 0.39$ En el apartado 3.5. del presente trabajo se pueden ver los resultados de T en cada recinto los cuales demuestran que existirá una limitación a partir de una determinada frecuencia por no encontrarse dentro de los márgenes establecidos.		

Transmisiones por flancos			
Se debe garantizar que el sonido transmitido por cualquier vía indirecta debería ser insignificante comparado con el sonido transmitido a través del elemento a ensayo.	<p>Se evalúan las transmisiones laterales adaptando el procedimiento de medición a las dimensiones de la cámara. Apartado 3.5.2. del presente trabajo de Tesis.</p> <p>Se define en el apartado 3.7 del presente trabajo, un método para determinar la influencia de las transmisiones laterales en los resultados obtenidos de cada ensayo realizado.</p> <p>El hecho de construir la cámara de transmisión de tamaño reducido con elementos ligeros, como veremos más adelante, limita el tipo de elementos que se pueden evaluar sin influencia de transmisiones laterales.</p>	Sí requiere adaptación	Sí supone limitación

Tabla 2.4. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Abertura de Ensayo

Abertura de ensayo de tamaño completo. Cámara de transmisión

Especificación de norma UNE-EN ISO 10140-5:2011	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
<p>Área</p> <p>$A_{\min} \approx 10\text{m}^2$,</p> <p>$L_{\text{borde más corto}} \geq 2.3\text{m}$</p>	<p>Se solicita:</p> <p>$A_{\min} \approx 0.40 \text{ m}^2$ y $L_{\text{borde más corto}} \geq 0.46\text{m}$</p> <p>Contamos con:</p> <p>$A_{\text{muestra}} = 0.47 \text{ m}^2$ y $L_{\text{borde más corto}} = 0.55\text{m}$</p> <p>Estamos dentro de las especificaciones adaptadas.</p>  <p>Superficie muestra = 0.4675 m²</p>	Sí requiere adaptación	No supone limitación

Respecto al procedimiento y requisito de medición de la cámara de transmisión: UNE-EN ISO 10140-4:2011, al trabajar con prototipos de tamaño reducido, se plantean las siguientes adaptaciones y limitaciones.

Tabla 2. 5. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Procedimiento de medición y requisitos.

Procedimientos de medición y requisitos. Cámara de transmisión			
Especificación de norma UNE-EN ISO 10140-4:2011	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
Rango de frecuencias			
Las magnitudes evaluadas se deben medir usando filtros de banda de tercio de octava desde 100Hz hasta 5KHz	Aunque se mida para todas las bandas de tercio de octava especificadas, trabajar con prototipos de tamaño reducido supone una importante limitación que viene dada por la frecuencia de corte, frecuencia a partir de la cual los resultados obtenidos son fiables. En el capítulo 3 del presente trabajo se define cuál es dicha limitación	No requiere adaptación	Sí supone limitación
Posiciones de micrófono			
Se establecen distancias mínimas entre posiciones de micrófono y entre ellas y cualquier límite del recinto o fuente.	Dichas distancias se escalan en un factor 1/n (siendo n=5) para poder trabajar en tamaño reducido. En la tabla 3.5. del presente trabajo se refleja esta adaptación.	Sí requiere adaptación	No supone limitación

Respecto a la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo (UNE-EN ISO 10140-2:2011) no se definen adaptaciones o limitaciones específicas, esta parte de la norma hace continua referencia a la UNE-EN ISO 10140-5:2011 y la UNE-EN ISO 10140-4:2011.

Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido.

De acuerdo con las especificaciones de la Norma UNE EN ISO 354:2004, una cámara reverberante debe cumplir con unas condiciones de **volumen**, **forma**, **difusión del campo sonoro** y **área de absorción** sonora. Al trabajar con prototipos de tamaño reducido, dichas condiciones requieren adaptaciones y, en algunos casos, limitaciones.

Tabla 2. 6. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Volumen

Volumen. Cámara reverberante

Especificación de norma UNE-EN ISO 354:2004	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
$200\text{m}^3 < V < 500\text{m}^3$	$0.93\text{ m}^3 < V < 2.31\text{ m}^3$ $V = 1.12\text{ m}^3$	Sí requiere adaptación	No supone limitación

Tabla 2. 7. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Forma.

Forma. Cámara reverberante

Especificación de norma UNE-EN ISO 354:2004	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
$l_{\text{max}} < 1.9 \cdot V^{1/3}$	$l_{\text{max}} < 1.9 \cdot V^{1/3} < 2.05\text{ m}$ $l_{\text{max}} = 1.93\text{ m}$	Sí requiere adaptación	No supone limitación

Tabla 2.8. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Difusión del campo sonoro..

Difusión del campo sonoro. Cámara reverberante			
Especificación de norma UNE-EN ISO 354:2004	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
Anexo A de la norma. Se requiere el uso de difusores suspendidos, fijos o móviles.	Han sido instalados adaptándose a las dimensiones de la cámara y evaluada su influencia. Colocación, características y dimensiones en apartado 4.5.2. del presente trabajo. Debido al tamaño de la cámara, no se alcanza una correcta difusión para todo el rango de frecuencias de interés y ello supone una limitación.	Sí requiere adaptación	Sí supone limitación

Tabla 2.9. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Área de absorción sonora..

Área de absorción sonora. Cámara reverberante			
Especificación de norma UNE-EN ISO 354:2004	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
El área de absorción sonora equivalente, en bandas de tercio de octava, no debe superar unos valores determinados y la curva que la representa debe ser lisa, sin baches ni picos.	Los valores dados en Norma de absorción sonora máxima se corrigen a un volumen de 1.12m ² , lo que supone una adaptación de la norma. No obstante, tal y como se muestra en la tabla 4.10 del presente trabajo, no se cumplen o quedan al límite las especificaciones adaptadas para frecuencias por debajo de 500Hz, lo que supone una limitación	Sí requiere adaptación	Sí supone limitación

Además, las muestras a ensayo en cámara reverberante, deben cumplir unas condiciones de tamaño, relación ancho/largo y distancia a las aristas de la cámara.

Tabla 2. 10. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Muestras a ensayo.

Muestras a ensayo. Cámara reverberante			
Especificación de norma UNE-EN ISO 354:2004	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
$A_{\min} \approx 10 - 12 \text{ m}^2$ Ancho/largo= 0.7 - 1 $L_{\text{borde muestra a arista de cámara}} \geq 1\text{m.}$	El área, relación de aspecto y distancias se escalan en un factor $1/n$ (siendo $n=6$) para poder trabajar en tamaño reducido. Quedando: $A_{\min} \approx 0.28 - 0.33 \text{ m}^2$ Ancho/largo= 0.7 - 1 $L_{\text{borde muestra a arista de cámara}} \geq 0.17\text{m.}$ Estas adaptaciones quedan reflejadas en el apartado 4.3. del presente trabajo de Tesis.	Sí requiere adaptación	No supone limitación

Por otra parte, para llevar a cabo las mediciones oportunas que nos conducirán a la obtención del coeficiente de absorción sonora del material bajo test en nuestro recinto reverberante, se especifican una serie de posiciones de micrófono y fuente y unas distancias mínimas entre ellas y los límites del recinto.

Tabla 2.11. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Procedimiento de medición y requisitos.

Procedimiento de medición y requisitos. Cámara reverberante			
Especificación de norma UNE-EN ISO 354:2004	En prototipo de tamaño reducido.	Adaptación	Limitación
Posiciones de micrófono y fuente			
Se establecen distancias mínimas entre posiciones de micrófono y entre ellas y cualquier límite del recinto o fuente.	Dichas distancias se escalan en un factor $1/n$ (siendo $n=6$) para poder trabajar en tamaño reducido. En la tabla 4.3. del presente trabajo se refleja esta adaptación.	Sí requiere adaptación	No supone limitación
Rango de frecuencia			
Las magnitudes evaluadas se deben medir usando filtros de banda de tercio de octava desde 100Hz hasta 5KHz	Aunque se mida para todas las bandas de tercio de octava especificadas, trabajar con prototipos de tamaño reducido supone una importante limitación que viene dada por la frecuencia de corte, frecuencia a partir de la cual los resultados obtenidos son fiables. En el capítulo 4 del presente trabajo se define cuál es dicha limitación.	No requiere adaptación	Sí supone limitación

Cuadro resumen de las adaptaciones y limitaciones a tener en cuenta.

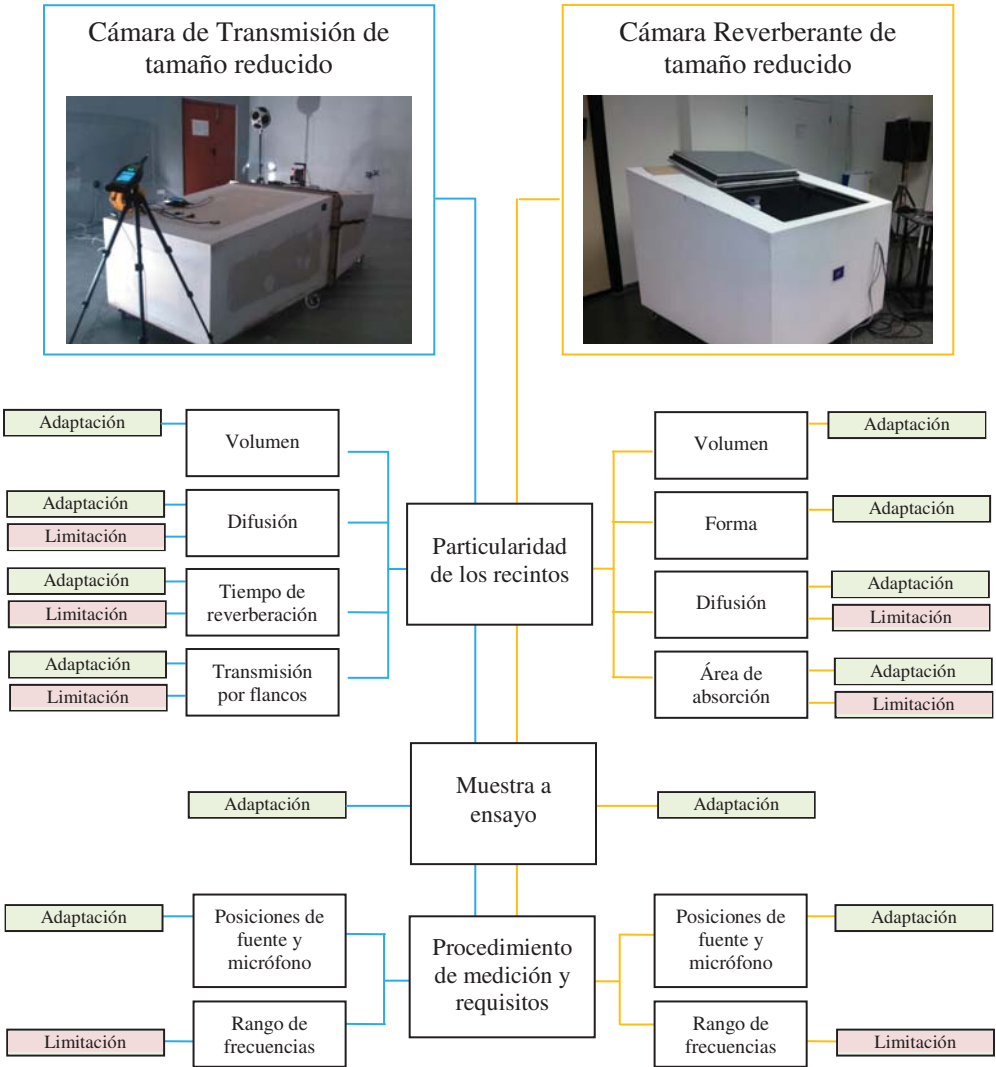


Figura 2.1. Cuadro resumen de adaptaciones y limitaciones de especificaciones normativas a tener en cuenta cuando se trabaja con prototipos de tamaño reducido

Capítulo 3

Cámara de transmisión de tamaño reducido

3.1. Introducción.

En acústica se entiende por *cámara de transmisión* a un laboratorio específico compuesto por dos recintos acoplados en el que se evalúa el aislamiento acústico a ruido aéreo de determinados materiales o soluciones constructivas (recintos acoplados horizontalmente) o la mejora a ruido de impacto que producen dichos materiales (recintos acoplados verticalmente). Una de sus principales características es la garantía de que las transmisiones laterales son despreciables, evaluando así, únicamente, la transmisión de sonido a través de la muestra a ensayo.

Estos laboratorios deben cumplir los requisitos establecidos en la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 (UNE-EN ISO 10140-5:2011) y su primera modificación, UNE-EN ISO 10140-5:2011/A1. Esta parte de la Norma ISO 10140 tiene como objetivo especificar toda la información necesaria para diseñar, construir y cualificar la instalación del laboratorio, sus accesorios adicionales y el equipo de medición. Detalla contenidos relacionados con las instalaciones de ensayo y los criterios de diseño, las aberturas de ensayo o los requisitos que deben cumplir los equipos.

Los resultados de ensayo obtenidos se pueden utilizar para comparar las propiedades del aislamiento acústico de los elementos de construcción, para clasificar los elementos según sus capacidades de aislamiento acústico, para ayudar a diseñar productos de construcción que requieren determinadas propiedades acústicas y para estimar el rendimiento “in situ” en edificios completos.

La muestra del elemento o solución constructiva a evaluar se coloca entre los dos recintos y se convierte en la principal vía de transmisión del ruido generado en el recinto emisor, debiendo resultar el resto de vías de transmisión (Flanco-flanco, Flanco-directo y Directo-flanco) prácticamente despreciables.

Ahora bien, debemos tener en cuenta que la construcción de un laboratorio de estas características es costosa económicamente y cada ensayo es excesivo tanto en tiempo como en costes. Además, según normativa (UNE-EN ISO 10140-5:2011) para poder evaluar un nuevo material o solución constructiva en incidencia aleatoria, se requieren muestras de alrededor de 10m^2 para paredes, y entre 10m^2 y 20m^2 para suelos.

A nivel de investigación y desarrollo de nuevos materiales, la mayoría de veces es complicado contar con grandes cantidades de producto para poder evaluarlo bajo norma. **Esta es una de las principales motivaciones para construir y poner en marcha una cámara de transmisión de tamaño reducido, pues se convierte en una excelente herramienta en investigación y desarrollo de nuevas soluciones constructivas y en un laboratorio imprescindible para un grupo de trabajo, en continua fase de desarrollo y mejora, cuyo principal campo de investigación se centra en el desarrollo y validación acústica de nuevos materiales y ecomateriales, en continua fase de desarrollo y mejora.**

3.2. Diseño y construcción

Parte del objetivo general de este trabajo de Tesis es poder disponer de un laboratorio de ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos ligeros. Para ello se diseña, construye, calibra y valida una cámara de transmisión de tamaño reducido cuya finalidad es poder evaluar, bajo ciertas limitaciones, el aislamiento acústico de nuevos materiales y prototipos en proceso de desarrollo, empleando, para ello, muestras de alrededor de 0.5m^2 . Esto supondrá un ahorro importante en cuanto a costes de fabricación y transporte de material, una optimización del tiempo de ensayo y se convertirá en una potente herramienta de trabajo para investigaciones posteriores.

El diseño y construcción corresponde a trabajos anteriores (Torres J.V. et al., 2011; Alba, J. et al., 2012a), La evaluación y validación de la misma es parte del objetivo general de este trabajo de Tesis y se desarrolla en el presente capítulo.

No obstante, en este apartado, se resumen los aspectos más importantes del diseño y construcción, pudiendo ampliar la información en trabajos previos (Torres J.V. et al., 2011; Alba, J. et al., 2012a).

El diseño y construcción de la cámara de transmisión de tamaño reducido se lleva a cabo en el año 2011, y es prototipo particular del proyecto europeo LIFE NOISE-FREETEX (LIFE09 ENV/ES/461). Dicho diseño se basa en la norma UNE EN ISO 140-1:1997 (UNE-EN ISO 140-1:1198) (norma actualmente anulada y sustituida por UNE-ISO 10140-5:2011 (UNE-EN ISO 10140-5:2011)), que indica las condiciones básicas con las que debe contar un laboratorio de estas características. Su diseño ha sido elaborado cuidando los detalles de la teoría de escalamiento, aislamiento acústico, distribución espacial de la difusividad, y se ha predicho el funcionamiento del mismo.

3.2.1. Diseño de la geometría y el aislamiento acústico de la cámara.

La relación geométrica propuesta para los recintos se evalúa a través de las frecuencias propias de resonancia usando el método de elementos finitos (FEM) y se evalúa el diseño de interacción de energía usando un Modelo SEA (Análisis estadístico de energía). (Torres J.V. et al., 2011; Alba, J. et al., 2012a)

Es importante tener presente la condición de campo difuso y las especificaciones referentes al tiempo de reverberación. Partiendo de estos supuestos se empieza el proceso de diseño (Papadopoulos, C.I. et al., 2002). En la Tabla 3.1 se muestra la comparativa entre las exigencias de la norma (UNE-EN ISO 10140-5:2011) y sus valores reducidos en un factor 1:5 para la construcción final de la cámara.

Tabla 3.1. Datos de partida del diseño de la cámara

	Valores de acuerdo Norma	Valores de norma reducidos en 1:5	Valores propuestos para construcción
Volumen Emisor (m ³)	60.00	0.48	0.44
Volumen Receptor (m ³)	50.00	0.40	0.38
Tiempo de reverberación (s)	2.0 ≤ 1.0	0.7 ≤ 0.3	0.5 ≤ 0.3
Superficie separación (m ²)	10.00	0.40	0.40
Longitud mínima de arista (m)	2.30	0.46	0.55

FUENTE: (Torres J.V. et al., 2011; Alba J. et al, 2012*)

A partir de los volúmenes se calcula la superficie total y el área de absorción acústica que debe tener la cámara de transmisión de tamaño reducido (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Comparación entre el modelo real o estándar y el modelo de tamaño reducido

	Modelo estándar	Modelo reducido
Volumen de la cámara Emisora (m ³)	60.0	0.44
Volumen de la cámara Receptora (m ³)	50.0	0.38
Área de la Muestra (m ²)	10.0	0.40
Superficie acústica total. Cámara Emisora (m ²)	103.17	3.76
Superficie acústica total. Cámara Receptora (m ²)	88.8	3.29
Área de absorción acústica. Cámara Emisora (m ²)	6.44	0.17
Área de absorción acústica. Cámara Receptora (m ²)	5.36	0.15

Fuente (Torres J.V. et al., 2011; Alba J. et al, 2012a)

Respecto a la geometría de la cámara, la base para definirla es la teoría de modos propios y el criterio de Bolt, con la finalidad de obtener una distribución modal lo más homogénea posible. La teoría de modos (Everest, F. et al., 2009) analiza la presencia del fenómeno de resonancia, de ocurrencia frecuente en recintos pequeños y el criterio de Bolt es uno de los más utilizados para obtener la densidad modal deseada (Everest, F. et al., 2009). Se puede obtener más información sobre el diseño de la geometría en trabajos anteriores (Torres J.V. et al., 2011; Alba J. et al, 2012a).

Además de diseñar una geometría que favorezca una distribución modal lo más uniforme posible en el interior de los recintos, el aislamiento acústico de los cerramientos que conforman las cámaras juega un papel importante ya que deben ser recintos donde la transmisión por flancos sea despreciable y además se deben garantizar niveles de ruido de fondo suficientemente bajos como para evitar la realización de correcciones por ruido de fondo. Por tanto, el tipo de solución constructiva que se propone debe ser robusta pero a la vez liviana. El sistema parte de la premisa de garantizar por encima de los 50dB el nivel de aislamiento de cada cerramiento que conforma la cámara de transmisión, además se debe utilizar un material que sea versátil y permita inclinar aquellas paredes que lo precisen según el diseño de la geometría. Por tanto, se opta por utilizar un sistema compuesto por placas de yeso laminado y material absorbente, concretamente se utilizan los materiales que se definen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Materiales empleados para la construcción de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Material	Uso
Composite (Alucobond) de 6mm de espesor	Recubrimiento interior de recinto emisor y receptor
Placas de Yeso Laminado de 12.5mm de espesor	Paredes interiores del sistema constructivo
Placas de Yeso Laminado de 15mm de espesor	Paredes exteriores del sistema constructivo
Fibras termo-fusionadas	Material absorbente colocado en el cámara del sistema constructivo
Perfiles de aluminio de 90mm	Estructura del sistema constructivo
MDF de 15mm de espesor	Base estructural del sistema, suelo y marcos de adaptación
Material visco elástico de 10mm de espesor	De alta densidad colocado entre placas de yeso laminado para evitar resonancias
Accesorios	Materiales básicos para el acabado.

La definición de la solución constructiva quedaría de la siguiente forma:

- Paredes y techo compuestos por sistema de construcción tipo SAA (tabique de estructura alternada). Consiste en un muro doble formado por una estructura metálica simple con una doble línea de montantes, de tal manera que se reduce el espesor del tabique sin que se efectúen uniones metálicas entre las estructuras evitando puentes acústicos.
- Para el suelo se utiliza un sistema formado por una placa de madera a modo de base estructural seguido de doble lamina de yeso de 15 mm, después un material absorbente formado por dos capas asimétricas de lana de poliéster adheridas térmicamente a una lámina visco elástica de alta densidad, y finalmente doble placa de yeso de 12 mm con acabado de Alucobond®

También juega un papel importante en el correcto funcionamiento de la cámara, el tiempo de reverberación en el interior de la misma. Este parámetro está directamente relacionado con el acondicionamiento acústico interior, es decir, con las propiedades del material de recubrimiento interior, denominado comercialmente Alucobond®. Se trata de un material tipo sándwich compuesto por dos láminas de aluminio con una capa de polietileno tipo LPDE (Polietileno de baja densidad) entre ellas. La inclusión de esta capa de polietileno entre las dos láminas de aluminio, contribuye al desacople de la estructura del sistema de aislamiento.

Siguiendo la solución constructiva y la geometría propuesta anteriormente y bajo supervisión técnica con la finalidad de que la ejecución fuera lo más adecuada posible, se construye la cámara de transmisión objeto de estudio en este trabajo de Tesis.

A continuación se muestran algunas fotografías del prototipo ya construido.



Figura 3.1. Cámara de transmisión de tamaño reducido construida. Estado inicial.

3.3. Estado inicial y aplicación de mejoras

Tal y como se ha citado en los objetivos del presente trabajo de Tesis, la validación de la cámara de transmisión de tamaño reducido como laboratorio de ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo de muestras de tamaño reducido, es uno de los objetivos a alcanzar. Su alcance permitirá evaluar nuevos materiales y dispositivos en fase de investigación y desarrollo.

Esta validación comienza con una evaluación física del estado inicial de la cámara de transmisión y una aplicación, en caso de ser necesario, de mejoras.

3.3.1. Comprobación de la geometría

La primera etapa para llevar a cabo la validación de la cámara de transmisión de tamaño reducido, se centra en la geometría de la misma, comprobando que las dimensiones construidas coinciden con la que se plantearon en diseño.

Tabla 3. 4. Comparación de dimensiones planteadas en diseño y dimensiones reales tras la construcción de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

	RECINTO EMISOR		RECINTO RECEPTOR	
	En diseño	En construcción	En diseño	En construcción
<i>Volumen (m^3)</i>	0.44	0.48	0.38	0.39
<i>Superficie total (m^2)</i>	3.76	3.95	3.29	3.32
<i>Área de la muestra (m^2)</i>	0.40	0.47	0.40	0.47

Excepto pequeñas diferencias, se ajusta el dimensionado en construcción al dimensionado de diseño, quedando la geometría tal y como se muestra en la Figura 3.2.

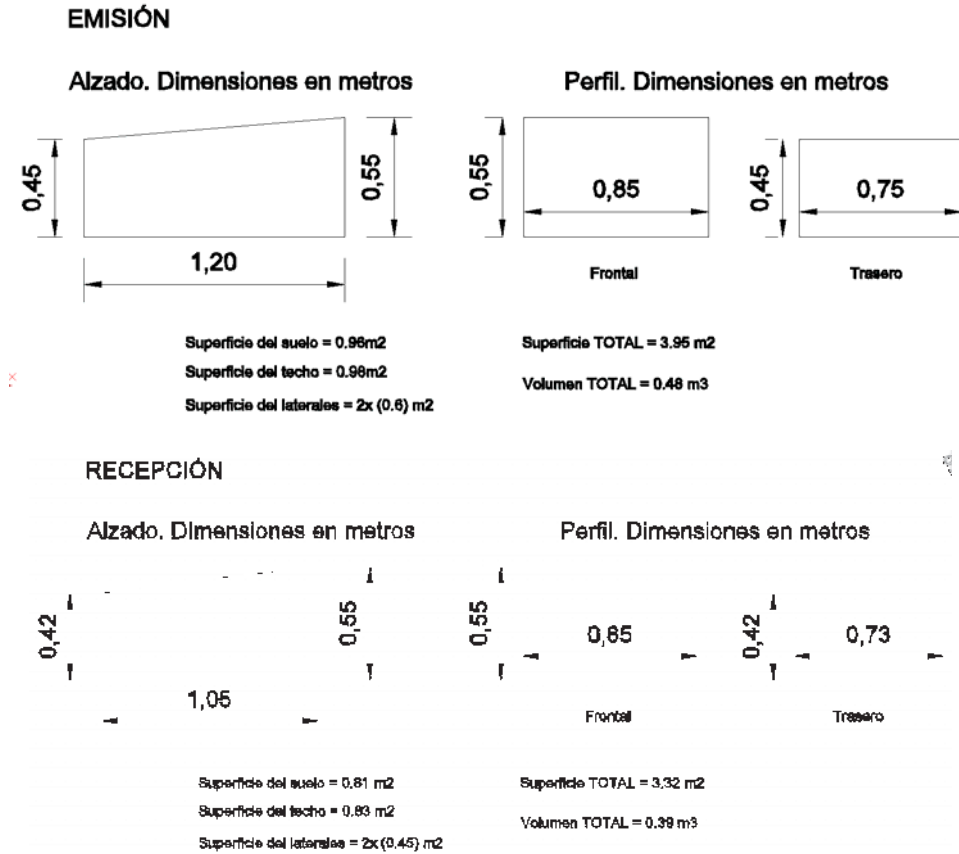


Figura 3.2. Dimensiones reales (tras su construcción) de los recintos emisor y receptor que conforman la cámara de transmisión de tamaño reducido.

3.3.2. Actuación sobre el porta-muestras y automatización de movimiento del micrófono.

En un laboratorio de ensayo, tanto en acústica como en cualquier otro campo, es necesario trabajar bajo condiciones controladas, en un espacio cómodo y, en determinados casos, utilizando un sistema automatizado que facilite el trabajo y minimice los errores humanos que se pueden producir durante los procesos de test. Por esta razón, y en este proceso de validación del estado inicial de la cámara de transmisión de tamaño reducido, se considera necesario realizar un análisis de viabilidad de uso de la misma, es decir, detectar aquellas deficiencias que puedan entorpecer el desarrollo fluido de un ensayo y darles solución.

En la Figura 3.3 se puede ver un detalle de la composición, a grandes rasgos, de la cámara de transmisión de tamaño reducido. Esto es recinto emisor o cámara emisora, recinto receptor o cámara receptora y porta-muestras.

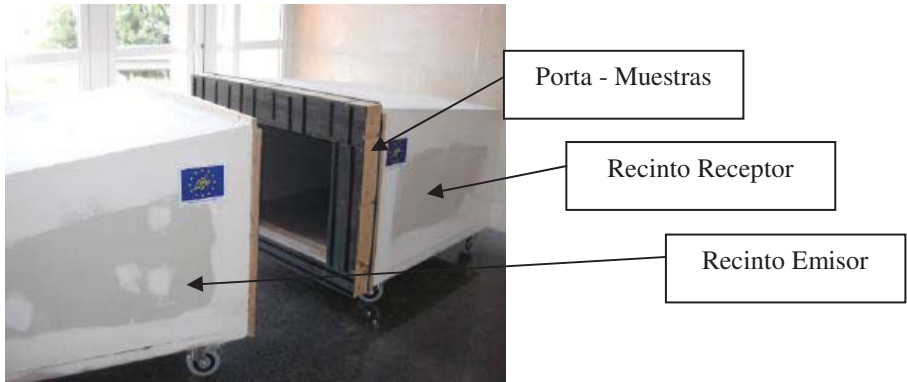


Figura 3.3. Cámara de transmisión de tamaño reducido

Como podemos observar, el porta-muestras queda sujeto a la cámara receptora. Esto supone varios inconvenientes: Por una parte, imposibilita trabajar con comodidad en la instalación de la muestra a ensayo, por otra parte, una vez instalada dicha muestra no se podrá acceder al recinto receptor y deberá desmontarse cada vez que se quiera acceder al mismo, además, al no tener acceso al porta-muestras por sus dos caras, no será sencillo instalar el elemento a ensayo en el espacio destinado a ello y será imposible instalar elementos de configuración doble. Por todo ello se decide independizar el porta-muestras de la cámara de transmisión.

Para ello se fabrica un carro sobre el que se colocará el porta-muestras de forma que sea totalmente independiente de las cámaras y se pueda mover con facilidad. Dicho carro consiste en dos soportes sustentados por ruedas con freno. Cada uno de estos soportes se instala en los extremos del porta-muestras. Es importante tener en cuenta que se ha instalado un material anti-vibratorio entre la rueda y el carril con la finalidad de evitar posibles transmisiones de ruido estructural proveniente de la estructura del edificio. El resultado se puede ver en la Figura 3.4.

Notar que entre el porta-muestras y los recintos emisor y receptor de la cámara, se instala un elemento elástico. De esta manera dicho porta-muestras queda desrigidizado de la estructura de los recintos emisor y receptor de la cámara.



Figura 3.4. Preparación del sistema de ruedas que soportará el porta-muestras y porta-muestras independizado del recinto receptor

La norma UNE-EN ISO 10140-4:2010 (UNE-EN ISO 10140-4:2011), establece los procedimientos de medición básicos para el aislamiento acústico a ruido aéreo en instalaciones de ensayo de laboratorio. Entre ellos, especifica que para cada posición de altavoz fija se deben utilizar un mínimo de cinco posiciones de micrófono en cada recinto. Como se aprecia en la Figura 3.3, el único acceso al interior de cada recinto se realiza por su parte delantera. Esto supone que cada vez que se tenga que cambiar la posición de micrófono, se deberán separar ambos recintos, desplazar el porta-muestras con la muestra a ensayo, cambiar la posición de micrófono, colocar el porta-muestras en su sitio y volver a sellar ambos recintos. Por tanto, implica una cantidad de tiempo considerable además del error humano que se puede producir cada vez que se sellan ambos recintos.

Por esta razón, se decide diseñar un sistema que, una vez finalizado el montaje de la muestra a ensayo, permita desplazar el micrófono a sus posiciones de medida sin necesidad de acceder al interior de la cámara. Para ello se decide emplear dos webcam Aqprox modelo IP01WV4 controlada por IP, con motor rotatorio incorporado, atornillada al suelo de cada recinto. A ella se le acopla un tubo de PVC de 1 cm de diámetro que porta en su extremo el micrófono de medida.

Mediante conexión on-line a la IP de cada webcam, se puede observar desde cualquier explorador, a tiempo real, el interior de cada recinto y dirigir la posición de micrófono, ya que éste se desplaza simultáneamente con el giro de la webcam. En la Figura 3.5 se puede ver un detalle de las cámaras web empleadas y la colocación de una de ellas en el recinto receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido.



Figura 3.5. Cámaras controladas por IP e instalación de una de ellas en el interior de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

3.4. Micrófonos, posiciones de medida y fuentes de ruido.

Las mediciones de aislamiento acústico que se llevarán a cabo en este laboratorio de tamaño reducido, se realizarán, bajo ciertas limitaciones, en base a las especificaciones de la Norma *UNE EN ISO 10140-4:2011 - Procedimientos y requisitos de medición* (UNE-EN ISO 10140-4:2011).

Dicha norma detalla, en su apartado 4.2.2. las distancias de separación mínima entre posiciones de micrófono y en su apartado 4.4.2. especifica que dos posiciones de micrófono no se deben situar en el mismo plano con respecto a los límites del recinto.

Las distancias mínimas escaladas al tamaño de la cámara de transmisión de tamaño reducido y que se deberían respetar, serían las que se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Distancia de separación mínima entre posiciones de micrófono

De acuerdo con Norma UNE EN ISO 10140-4:2011	Distancias escaladas a tamaño de cámara de transmisión de tamaño reducido.
0.7 m entre posiciones de micrófono fijas.	0.14 m entre posiciones de micrófono fijas.
0.7 m entre cualquier posición de micrófono y los límites del recinto.	0.14 m entre cualquier posición de micrófono y los límites del recinto.
0.7 m entre cualquier posición de micrófono y cualquier difusor.	0.14 m entre cualquier posición de micrófono y cualquier difusor.
1.0 m entre cualquier posición de micrófono y el elemento a ensayo.	0.2 m entre cualquier posición de micrófono y el elemento a ensayo.
1.0 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora.	0.2 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora.

Por otra parte, respecto a la imposibilidad que establece la Norma de colocar dos posiciones de micrófono en el mismo plano con respecto a los límites del recinto, el plano de giro de la cámara IP que sostiene el micrófono no puede ser paralelo al suelo de la cámara. Así pues, se plantean dos posibles planos de giro y se evalúa cada uno de ellos con la finalidad de seleccionar el más apropiado. En la Figura 3.6 se puede ver los planos de giro propuestos frente al plano de giro horizontal del micrófono.

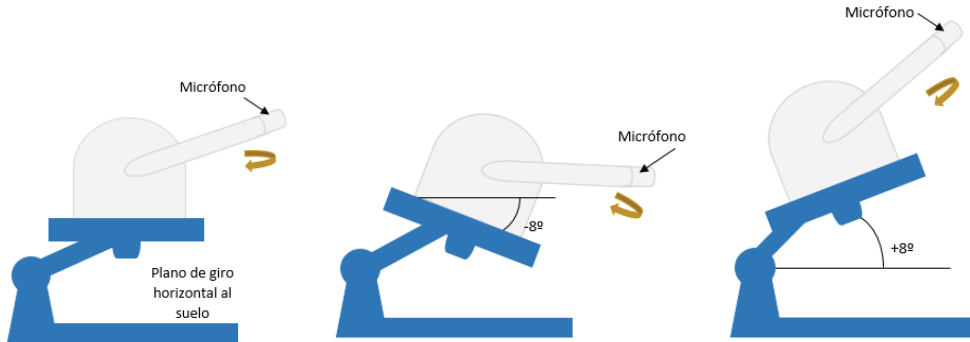


Figura 3.6. Planos de giro propuestos (+8° y -8°) frente al plano de giro horizontal

Los grados de inclinación seleccionados fueron +8° y -8°, inclinación suficiente para evitar un plano de giro paralelo al suelo y para mantener las distancias de separación entre posición de micrófono y límites del recinto establecidas en la Tabla 3.5.

En cada plano se definen 6 posiciones de micrófono separadas entre sí una distancia de 0.16m, en dos opciones diferentes, Opción A y Opción B.

Con la finalidad de evaluar las posiciones de micrófono más óptimas para la realización de los ensayos se evalúan los siguientes casos:

En cámara Emisora:

- Ensayo 1 con un ángulo de inclinación del plano de giro de 8° respecto al suelo - Opción A. Puntos de Medida. M1a a M6a. (Ver Figura 3.7)
- Ensayo 2 con un ángulo de inclinación del plano de giro de 8° respecto al suelo - Opción B. Puntos de Medida. M1b a M6b. (Ver Figura 3.7)
- Ensayo 3 con un ángulo de inclinación del plano de giro de -8° respecto al suelo - Opción A. Puntos. M1a a M6a. (Ver Figura 3.7)
- Ensayo 4 con un ángulo de inclinación del plano de giro de 8° respecto al suelo - Opción B. Puntos. M1b a M6b. (Ver Figura 3.7)

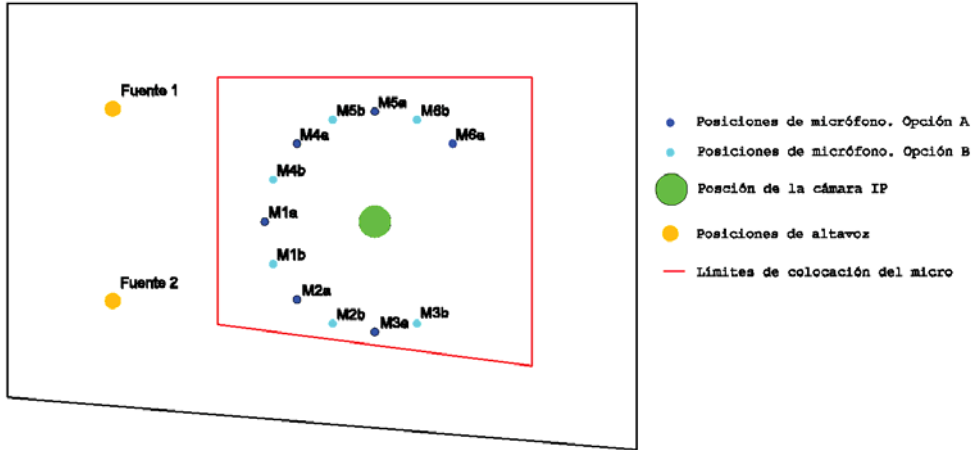


Figura 3.7. Posiciones de micrófono y fuente en recinto emisor.

Se registra el Nivel de Presión Sonora en cada uno de los puntos y se obtiene la desviación típica entre ellos. La configuración “Ensayo 2” es la que presenta valores menores de esta desviación, por tanto, seleccionamos la inclinación (+8°) y posiciones de micrófono definidas en Ensayo 2 como posiciones fijas para realizar los ensayos de aislamiento a ruido aéreo.

En el Anexo 1, tablas 3.1 a 3.4, se pueden ver todos los resultados obtenidos para cada Ensayo de 1 a 4 en el recinto emisor.

En cámara Receptora:

- Ensayo 1 con un ángulo de inclinación del plano de giro de 8° respecto al suelo- Opción A. Puntos de Medida. M1a a M6a. (Ver Figura 3.8)
- Ensayo 2 con un ángulo de inclinación del plano de giro de 8° respecto al suelo- Opción B. Puntos de Medida. M1b a M6b. (Ver Figura 3.8)
- Ensayo 3 con un ángulo de inclinación del plano de giro de -8° respecto al suelo- Opción A. Puntos. M1a a M6a. (Ver Figura 3.8)
- Ensayo 4 con un ángulo de inclinación del plano de giro de -8° respecto al suelo- Opción B. Puntos. M1b a M6b. (Ver Figura 3.8)

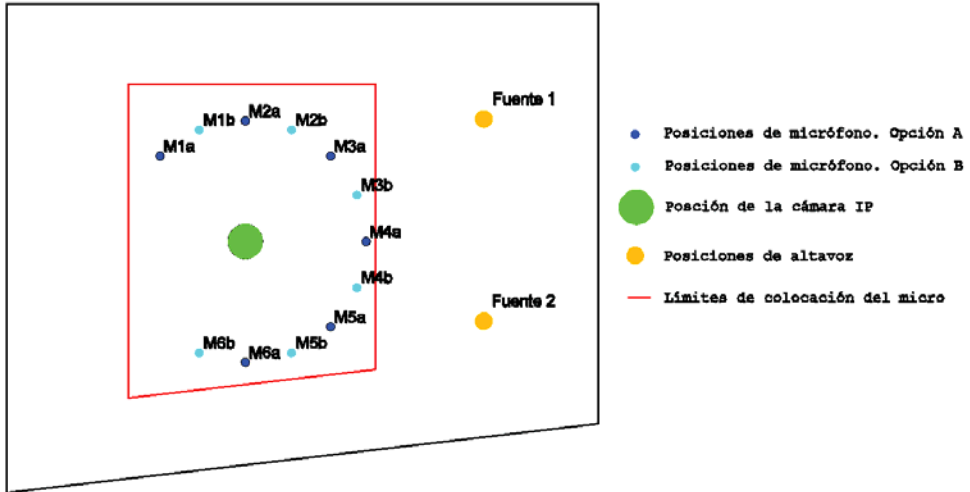


Figura 3.8. Posiciones de micrófono y fuente en recinto receptor.

Al igual que en el recinto emisor, en el recinto receptor se registra el nivel de presión sonora en cada uno de los puntos y se obtiene la desviación típica entre ellos. En este caso, la menor desviación entre posiciones de micrófono se da para un ángulo de inclinación de -8° respecto al plano horizontal del suelo, Ensayo 4. Por tanto, se seleccionan las posiciones de micrófono M1b a M6b como posiciones de micrófono fijas para posteriores ensayos en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

En el Anexo 1, tablas A.1. a tabla A.1.8., se pueden ver todos los resultados obtenidos para cada Ensayo de 1 a 4 en el recinto receptor.

NOTA. Los ensayos de selección de los puntos de medida se realizaron colocando una placa de yeso laminado de 13mm de espesor sobre el portamuestras a modo de elemento separador entre recinto emisor y receptor.

La Figura 3.9 resume las posiciones de micrófono fijas seleccionadas para la realización de los ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

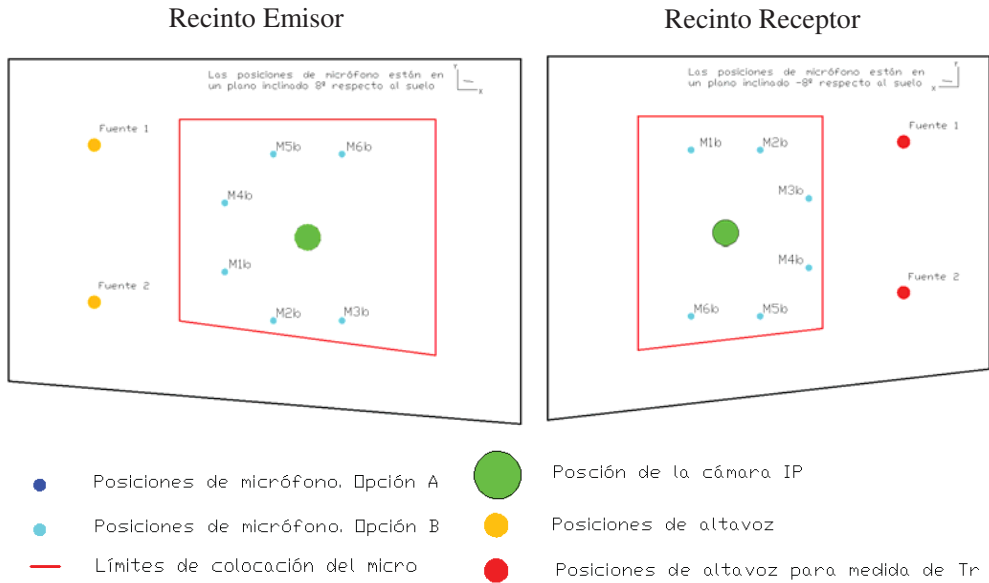


Figura 3.9. Posiciones de micrófono fijas en recinto emisor y receptor para ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido.

El sonido se genera en el recinto emisor por medio de dos posiciones fijas de altavoz (Figura 3.9). Estas posiciones se ubican en las esquinas del recinto emisor. Puesto que los altavoces empleados no son omnidireccionales, se orientan hacia la pared de fondo del recinto evitando así que las posiciones de micrófono fijas seleccionadas para realizar los ensayos se situen dentro del campo acústico directo de dicho altavoz.

3.5. Evaluación acústica de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Una vez evaluado el estado inicial de la cámara de transmisión de tamaño reducido, establecidas e instaladas las mejoras definidas, y concretadas las posiciones fijas de micrófono y fuente, se pasa a la evaluación acústica de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Bajo la premisa de que un laboratorio de ensayo debe cumplir una serie de condiciones para que los valores medidos reflejen las propiedades del producto sin verse influenciados por las características del propio laboratorio. Como ya se ha mencionado, en el caso de una cámara de transmisión, se deben cumplir las especificaciones definidas en la UNE-ISO 10140-5:2011 (UNE-EN ISO 10140-5:2011). La cámara de transmisión de tamaño reducido seguirá, bajo ciertas limitaciones, dichas especificaciones. Una de estas limitaciones es la exigencia, por parte de la norma, de un tiempo de reverberación en el interior de los recintos que cumpla la siguiente condición:

$$1 \leq T \leq 2 \cdot (V/50)^{2/3} \quad (3.1)$$

Donde T es el tiempo de reverberación en segundos y V es el volumen del recinto en m³.

La condición anterior, adaptada al escalado en volumen de la cámara de transmisión, establece los límites para el tiempo de reverberación entre 0.20 y 0.39 segundos para el recinto receptor y entre 0.20 y 0.45 segundos para el recinto emisor.

El Gráfico 3.1 y el Gráfico 3.2 representan los tiempos de reverberación en recinto emisor y receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

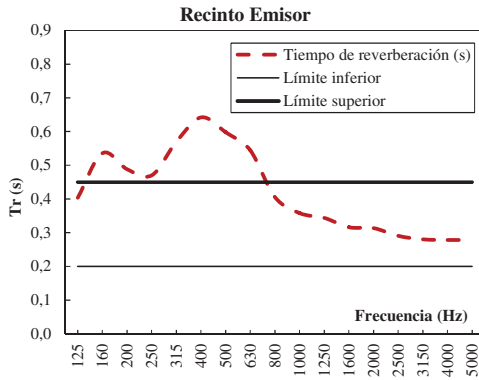


Gráfico 3.1. Tiempo de reverberación en el recinto emisor.

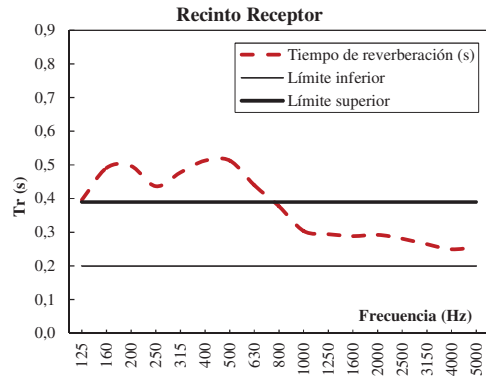


Gráfico 3.2. Tiempo de reverberación en el recinto receptor.

Podemos ver que, tanto en recinto emisor como en recinto receptor el tiempo de reverberación queda fuera de los límites establecidos por debajo de, aproximadamente, 800Hz. Esto supondrá una limitación respecto a las especificaciones a cumplir, así pues, los resultados obtenidos por debajo de esta frecuencia deberían tratarse con cuidado. Esta limitación estará relacionada, como veremos más adelante, con la frecuencia de corte de la cámara.

En el caso de ensayos de aislamiento acústico, el elemento a evaluar debe ser la principal vía de transmisión de ruido entre el recinto emisor y el receptor ya que toda transmisión indirecta dará como resultado un aislamiento medido inferior al que se podría obtener con el mismo producto en condiciones óptimas. Además, se debe garantizar que el campo sonoro (sobre todo en el recinto emisor) sea difuso para que las medidas sean repetibles. La repetitividad permite que unas medidas sean comparables con otras y se pueda, por ejemplo, cuantificar la mejora aportada a un producto mediante una modificación. Así pues, además de la evaluación del tiempo de reverberación, se deben satisfacer, principalmente, dos premisas: Difusividad del campo sonoro y minimización de transmisiones laterales

3.5.1. Difusividad del campo sonoro.

Sabemos que ningún recinto tiene la capacidad de producir un campo sonoro difuso perfecto, son muchos los factores que influyen en este objetivo; desde la propia geometría del recinto y sus dimensiones, hasta la fuente de ruido, los micrófonos, la ubicación de todos ellos, la presencia o no de difusores, y un larguísimo etcétera de circunstancias que impiden la consecución de la difusividad perfecta en cada ensayo. Este es un asunto ampliamente discutido dentro de la comunidad científica (Cremer, L. et al., 1982a; Cops, J. et al., 1995).

No obstante, si se tuviera que dar una definición teórica de lo que es un campo sonoro difuso, esta podría ser, según (Everest, F. et al., 2009), un campo sonoro en el que el sonido puede llegar a cualquier punto del recinto desde cualquier dirección y en el que el nivel de presión sonora es el mismo en todo el recinto.

En la fase de diseño de la cámara de transmisión de tamaño reducido, se estudió la difusividad del campo sonoro (Torres J.V. et al., 2011), aunque, una vez construida, se debe proceder a su comprobación y ajuste.

Los recintos, tanto emisor como receptor, que conforman la cámara de transmisión de tamaño reducido carecen de paneles difusores. Estudios anteriores (Hernández García F. et al., 2012) demuestran la importancia que tiene la instalación de estos dispositivos en un recinto empleado como laboratorio de ensayos acústicos. Así pues, mediante el uso de paneles difusores conseguiremos optimizar el campo sonoro en los recintos emisor y receptor.

Para saber cómo colocar dichos paneles difusores nos apoyamos en las recomendaciones dadas en el Anexo A de la Norma UNE EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004). Se colocarán de manera aleatoria, será un total de 4 paneles de madera contrachapada de 5mm de espesor en el recinto emisor y 5 paneles del mismo espesor en el recinto receptor. Sus dimensiones oscilan entre 150cm^2 y 500cm^2 , cubriendo una superficie (a doble cara) de 0.27m^2 en recinto emisor y 0.25m^2 en recinto receptor. En la Figura 3.10 podemos ver la instalación de los difusores en los recintos emisor y receptor.



Figura 3.10. Paneles difusores de contrachapado de madera colocados en el interior del recinto emisor (derecha) y receptor (izquierda) de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Para comprobar la mejora de la difusividad se registra el nivel de presión sonora, tanto en recinto emisor como en recinto receptor, en diez posiciones fijas de micrófono² antes y después de la colocación de los difusores y se valora el efecto de los mismos mediante comparación de los resultados obtenidos.

Como elemento separador entre recinto emisor y receptor se selecciona una placa de yeso laminado de 13mm (en la Figura 3.11 se puede ver un detalle de montaje de este elemento sobre el porta-muestras de la cámara).



Figura 3.11. Elemento de separación a base de placa de yeso laminado de 12.5mm de espesor

El Gráfico 3.3 representan la desviación en los niveles de presión sonora entre posiciones de medida, antes y después de la colocación de paneles difusores, tanto en recinto emisor (a) como en receptor (b).

² Según la Figura 3.9, las diez posiciones de micrófono en cada recinto corresponden a: Con la posición de fuente F1 en el recinto emisor se mide en las posiciones M1b, M2b, M3b, M5b y M6b en recinto emisor y M1b, M3b, M4b, M5b y M6b en recinto receptor. Con la posición de fuente F2 en el recinto emisor se mide en las posiciones M1b, M2b, M3b, M5b y M6b en recinto emisor y M2b, M3b, M4b, M5b y M6b en recinto receptor

Se observa que la instalación de difusores deriva en una disminución de la desviación del Nivel de Presión Sonora entre puntos de medida, sobre todo a frecuencias medias y bajas. Esto supone una mejora en la uniformidad del campo sonoro que se traduce en una mayor repetitividad, y por tanto fiabilidad, de las mediciones.

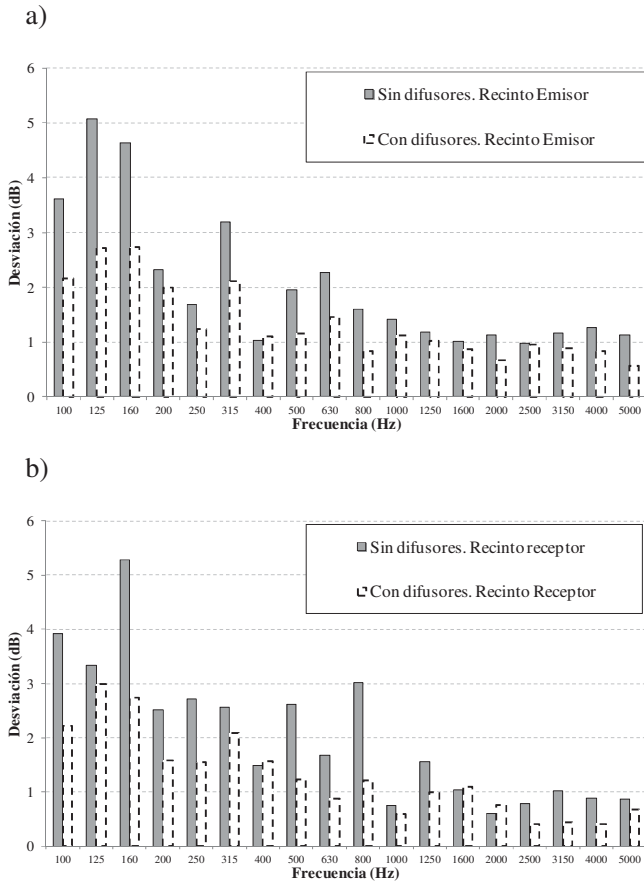


Gráfico 3.3. Desviación en los niveles de presión sonora antes y después de la colocación de paneles difusores, tanto en el recinto emisor (a) como en el recinto receptor (b).

Además, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 (UNE-EN ISO 10140-5:2011), apartado 5.1, el ruido generado en el recinto emisor debe ser estable y tener un espectro continuo en el rango de frecuencias considerado. El espectro registrado en el recinto emisor, al menos por encima de los 100Hz, no debe tener una diferencia de nivel de más de 6dB entre bandas de tercio de octava adyacentes.

Se evalúan los espectros registrados en el recinto emisor antes y después de la colocación de paneles difusores.

En el Gráfico 3.4 y el Gráfico 3.5 se puede ver la diferencia entre bandas de tercio de octava adyacentes en cada punto de medida seleccionado, antes y después de la colocación de paneles difusores.

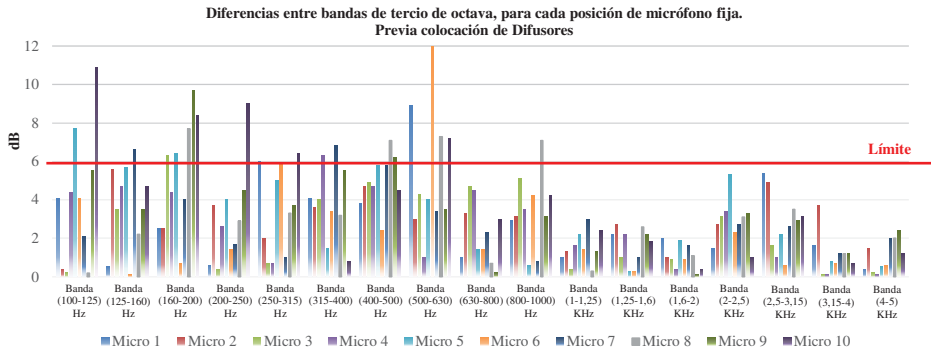


Gráfico 3.4. Diferencias entre bandas de tercio de octava adyacentes para cada posición de micrófono fija seleccionada. **PREVIA COLOCACIÓN DE DIFUSORES**

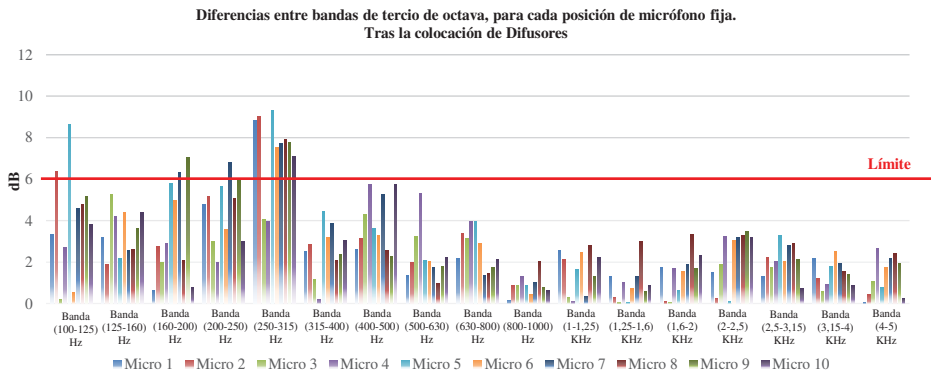


Gráfico 3.5. Diferencias entre bandas de tercio de octava adyacentes para cada posición de micrófono fija seleccionada. **TRAS LA COLOCACIÓN DE DIFUSORES**

Como podemos observar en estos gráficos, tras la colocación de paneles difusores, los espectros registrados en las posiciones de medida fijadas son mucho más estables que previa colocación de dichos paneles. Se consigue obtener diferencias entre bandas adyacentes de tercios de octava por debajo del límite de 6dB a partir de los 400Hz, presentando mayor estabilidad a partir de 500Hz – 630Hz. Este comportamiento, en torno los 500-630 Hz, estará relacionado, como veremos más adelante, con la frecuencia de corte de la cámara. La frecuencia de corte es aquella a partir de la cual dejan de dominar los modos propios de la sala y empieza a dominar el comportamiento de frecuencias altas.

Frecuencia de corte del recinto:

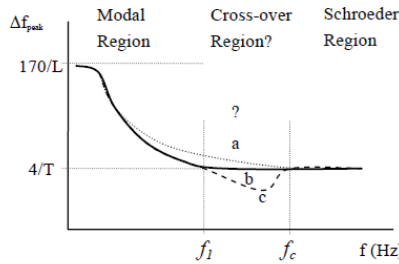
En un recinto, a una determinada frecuencia, la densidad modal es lo suficientemente alta como para que los modos propios no supongan una variación de la respuesta frecuencial de la sala. Esa frecuencia marcará el límite superior de la zona de bajas frecuencias de la sala y se le denomina frecuencia crítica o frecuencia de corte.

En 1954 (Schroeder, M.R. et al., 1954) Schroeder determinó esta frecuencia crítica basándose en 10 modos por tercio de octava, no obstante, tras años de experiencia y mediciones realizadas, encuentra una ecuación más adecuada (Schroeder, M.R. et al., 1962) que da lugar a la actual frecuencia de corte o frecuencia de Schroeder, definida por la ecuación (3.2)

$$F_c = 1849 \cdot \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (3.2)$$

No obstante, en 2011, Magne Skålevik, (Skålevik, M. et al., 2011) realiza una revisión de la frecuencia de Schroeder, proponiendo una nueva ecuación, que consiste en multiplicar la frecuencia de Schroeder en un factor 0.45.

Para realizar esta corrección, Magne Skålevik se basa en que las propiedades de alta frecuencia en un recinto se obtienen por encima de la frecuencia, F_c , definida por Schroeder. Sin embargo, no se establece que estas mismas propiedades no puedan encontrarse por debajo de la frecuencia de corte, ya que ésta no fue diseñada para ser límite superior de la región modal de un espectro, sino para ser límite inferior de la región de alta frecuencia. Por tanto Skålevik plantea una región de cruce medible entre la región de alta frecuencia y la región modal del espectro, que extiende la frecuencia de corte a $0.45F_c$. (Figura 3.12).



FUENTE: Magne Skålevik. (Skålevik, M. et al., 2011).

Figura 3.12. Definición de la región de cruce entre la región modal y la región de Schroeder.

Tomamos esta nueva condición para obtener la frecuencia de corte en el recinto emisor de la cámara de transmisión de dimensiones reducidas a partir del tiempo de reverberación, T_{60} , (ver Tabla 3.6) y el volumen de la cámara ($V=0.48 \text{ m}^3$, ver Figura 3.2).

Tabla 3.6. Tiempo de reverberación en el recinto emisor de la cámara de transmisión de tamaño reducido tras la colocación de paneles difusores.

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
RT (s)	0.20	0.34	0.33	0.58	0.50	0.49	0.53	0.50	0.39	0.35
Frecuencia (Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000		
RT (s)	0.34	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.27	0.25	0.26	

Aplicando la ecuación (3.2) a cada banda de tercio de octava, y calculando el valor promedio, la frecuencia de corte de nuestro recinto se establece en 1485Hz, no obstante, mediante la revisión de la frecuencia de Schroeder por parte de Skålevik, podemos establecer la frecuencia de corte de nuestro recinto entorno a 668Hz, que podríamos redondear al tercio de octava de 630Hz.

En teoría, parece ser que por debajo de 630Hz, nos encontraremos en una región modal donde dominan los modos propios de la sala. Es decir, en principio, los resultados obtenidos en esta cámara de transmisión de tamaño reducido, por debajo de 630Hz deben evaluarse con cuidado.

3.5.2. Transmisiones laterales.

Como se comenta en un principio, las transmisiones laterales en un laboratorio deben ser despreciables frente a la transmisión directa a través del elemento a ensayo.

Las transmisiones laterales son la transmisión de potencia vibratoria a través de una unión entre elementos estructurales. La magnitud directamente relacionada con las transmisiones laterales es el Índice de Reducción Vibracional, K_{ij} , el cual normaliza dicha transmisión de potencia con el objeto de hacerla una magnitud invariante. Según UNE EN 12354-1:2000 (UNE-EN ISO 12354-1:2000), el índice de reducción Vibracional, K_{ij} , se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas las direcciones sobre la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la ecuación (3.3).

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \cdot \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \text{ dB} \quad (3.3)$$

Donde

$D_{v,ij}$ es la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos i y j, cuando el elemento i es excitado, en dB;

$D_{v,ji}$ es la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos j e i, cuando el elemento j es excitado, en dB;

l_{ij} es la longitud común de la unión entre elementos i y j, en metros;

a_i es la longitud de absorción equivalente del elemento i, en metros;

a_j es la longitud de absorción equivalente del elemento j, en metros.

La longitud de absorción equivalente viene dada por la ecuación (3.4).

$$a = \frac{2,2\pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (3.4)$$

Donde

T_s es el tiempo de reverberación estructural del elemento i o j, en segundos;

S es el área del elemento i o j, en metros cuadrados;

f es la frecuencia central de la banda, en Hercios;

f_{ref} es la frecuencia de referencia: $f_{ref} = 1000\text{Hz}$;

c_0 es la velocidad del sonido en el aire, en metros por segundo.

La magnitud K_{ij} debe ser determinada según UNE EN ISO 10848-1:2007 (UNE-EN ISO 10848-1:2007).

La Figura 3.13 ilustra los diferentes caminos de transmisión que pueden existir en un cerramiento vertical, como puede ser la pared de separación entre recinto emisor y receptor de nuestra cámara de transmisión de tamaño reducido.

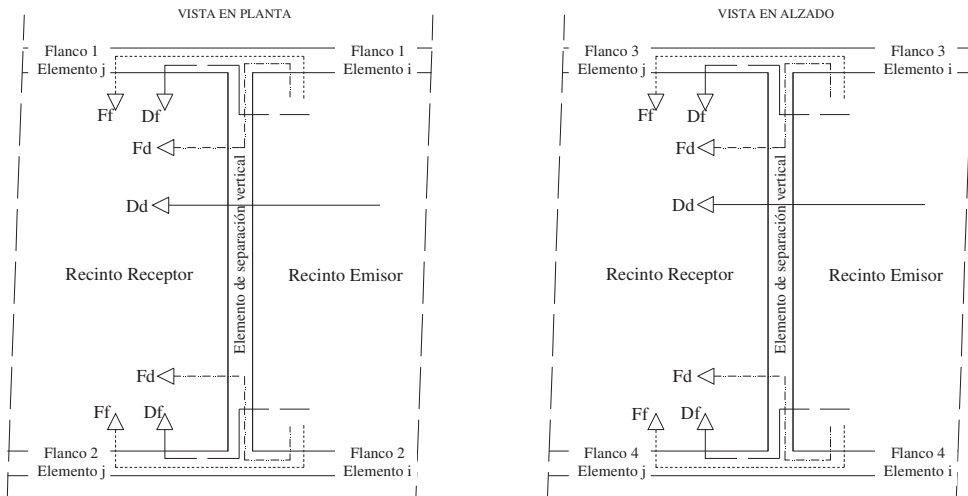


Figura 3.13. Posibles caminos de transmisión de potencia vibratoria a través de un elemento de separación vertical.

Los flancos 1 y 2 corresponden a las paredes laterales en contacto con el elemento separador o elemento a estudio y los flancos 3 y 4 se corresponden con el techo y el suelo respectivamente. Por cada elemento de flanco pueden darse tres caminos de transmisión diferente, transmisión Flanco-flanco (Ff), transmisión Directo-flanco (Df) y transmisión Flanco-directo (Fd). Estos caminos de transmisión junto con la transmisión directa a través del elemento de separación hacen un total de 13 caminos de transmisión.

En el caso que nos ocupa se evaluarán “in situ” únicamente las transmisión Flanco-flanco entre recinto emisor y recinto receptor, con el portamuestras colocado pero sin ninguna muestra, es decir, sin ningún cerramiento de separación entre recinto emisor y receptor. De esta manera se evaluará el efecto del porta-muestras en el conjunto, es decir, la transmisión de potencia vibratoria entre el recinto emisor y el receptor a través del porta-muestras. A partir de este dato “in situ” obtendremos el índice de reducción vibracional de cada flanco cuando se instale un elemento a ensayo sobre el porta-muestras y podremos evaluar la influencia de las transmisiones laterales sobre el mismo.

Según las ecuaciones (3.3) y (3.4), para obtener el K_{FF} “in situ”, debemos disponer de dos parámetros: niveles de velocidad y tiempos de reverberación estructural, ambos se obtendrán siguiendo las especificaciones de la Norma UNE-EN ISO 10848-1:2007 (UNE-EN ISO 10848-1:2007).

El nivel de velocidad se debe obtener a ambos lados de la unión en ambos sentidos; el nivel de velocidad en el elemento i y el elemento j de cada flanco, cuando se excita el elemento i (D_{vij}) y el nivel de velocidad en el elemento i y el elemento j de cada flanco cuando se excita el elemento j (D_{vji}). El tiempo de reverberación estructural se obtendrá de cada paramento (paredes laterales, suelo y techo) en recinto emisor y receptor.

3.5.2.1. Niveles de velocidad.

Las diferencias del nivel de velocidad $D_{v,ij}$ y $D_{v,ji}$, se obtendrán a partir del registro de niveles de aceleración. Se excita cada elemento de flanco (mediante un shaker o excitador mecánico) y se registra el nivel de aceleración sobre la superficie de ambos elementos, i y j (empleando un acelerómetro).

Puntos de medición y excitación.

Los criterios establecidos para la ubicación de las posiciones del excitador mecánico y acelerómetro son los siguientes: En cada elemento de flanco (*elemento i y elemento j*) se debe utilizar un mínimo de tres posiciones de excitación y 9 posiciones de acelerómetro (tres posiciones de acelerómetro para cada posición de excitación).

De acuerdo con (UNE-EN ISO 10848-1:2007) las posiciones de acelerómetro y los puntos de excitación se distribuyen de forma aleatoria pero no simétrica, respetando, siempre, las siguientes distancias mínimas:

- 0,5 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayar
- 1,0 m entre los puntos de excitación y la unión sometida a ensayo
- 1,0 m entre los puntos de excitación y las posiciones de transductor asociadas
- 0,25 m entre las posiciones del transductor y los límites del elemento a ensayo
- 0,5 m entre cada posición del transductor.

Máximo 3,50 m entre las posiciones del transductor y la unión sometida a ensayo.

No obstante, como los ensayos se realizan sobre un laboratorio escalado en tamaño (1:5), estas distancias mínimas se reducen en el mismo factor de escalado, quedando de la siguiente forma:

- 0,1 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayar
- 0,2 m entre los puntos de excitación y la unión sometida a ensayo
- 0,2 m entre los puntos de excitación y las posiciones de transductor asociadas
- 0,05 m entre las posiciones del transductor y los límites del elemento a ensayo
- 0,1 m entre cada posición del transductor.

Máximo 0,7 m entre las posiciones del transductor y la unión sometida a ensayo.

Metodología de medición.

Los niveles de velocidad se obtendrán a partir de registros de nivel de aceleración. Cada elemento i de flanco (desde Flanco 1 hasta Flanco 4) se excita con el shacker emitiendo un ruido blanco (excitación estacionaria) y se registra, con acelerómetros colocados en el elemento i y el elemento j , el nivel de aceleración a ambos lados de la unión. A continuación se invierte el proceso, colocando los puntos de excitación sobre los elementos de flanco j y registrando de manera simultánea los niveles de aceleración a ambos lados de la unión (sobre elementos i y j).

La Figura 3.14 ilustra de forma visual el proceso de medición y en la Figura 3.15 se pueden ver unas imágenes tomadas durante el proceso de medición.

Es muy importante asegurar que la fijación del acelerómetro al elemento a ensayo sea estable, en la dirección normal a la superficie del elemento y su masa sea lo suficientemente pequeña como para minimizar la carga estructural sometida a ensayo.

Para un movimiento armónico en que la velocidad puede ser descrita por su amplitud y fase, las diferencias de niveles de velocidad son análogas a las diferencias de los niveles de aceleración, como se puede ver en las ecuación (3.7).

$$\left. \begin{aligned} v &= A \cdot \omega \cos(\omega t + \theta) \\ v_{\max} &= \omega A \end{aligned} \right| \begin{aligned} a &= -A\omega^2 \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) \\ a_{\max} &= -A\omega^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

A partir de las ecuaciones (3.5) y (3.6), tenemos que $a = -2\pi f * v$, por tanto:

$$L_a = L_v + 20 \log(\omega)$$

Entonces,

$$D_{v12} = L_{v2} - L_{v1} = [L_{a2} - 20 \log(\omega)] - [L_{a1} - 20 \log(\omega)] = L_{a2} - L_{a1} \quad (3.7)$$

Así pues, una diferencia entre niveles de aceleración registrados a ambos lados de una unión equivale a una diferencia entre niveles de velocidad, que es el parámetro buscado.

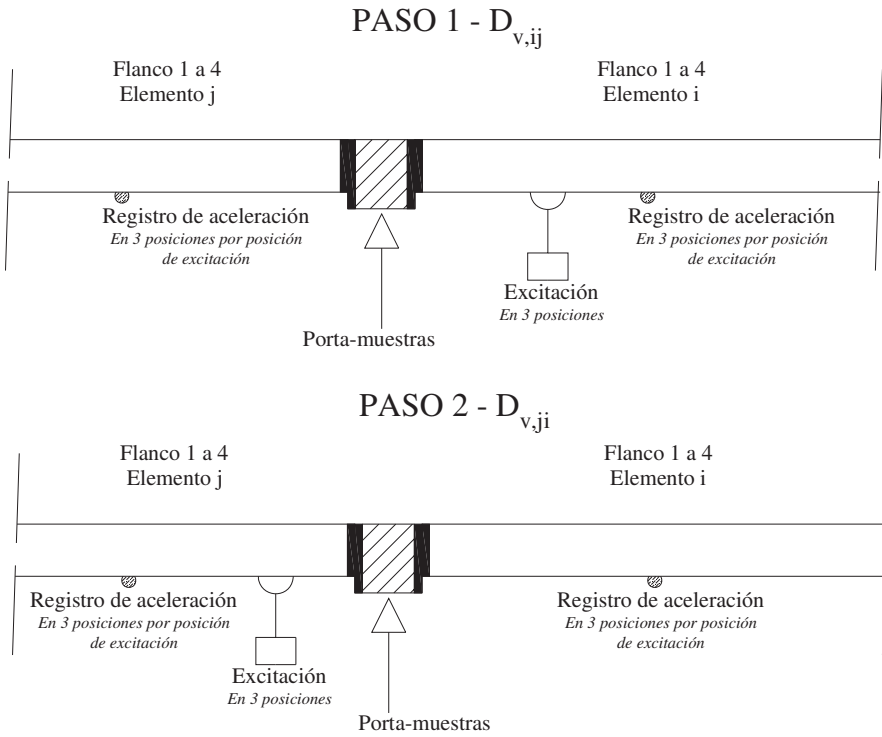


Figura 3.14. Croquis de metodología de medición para la obtención de las diferencia de nivel de velocidad promediada direccionalmente sobre una unión



FUENTE. (Garrido-Jiménez, P. et al., 2014)

Figura 3.15. Registro de niveles de aceleración durante las mediciones “in situ”, excitando sobre el flanco 1 lateral izquierdo (izquierda) y sobre el flanco 3, techo (derecha)

Resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de diferencias de niveles de velocidad (dB) promediadas direccionalmente sobre la unión para cada elemento de flanco en unión con el elemento a ensayo.

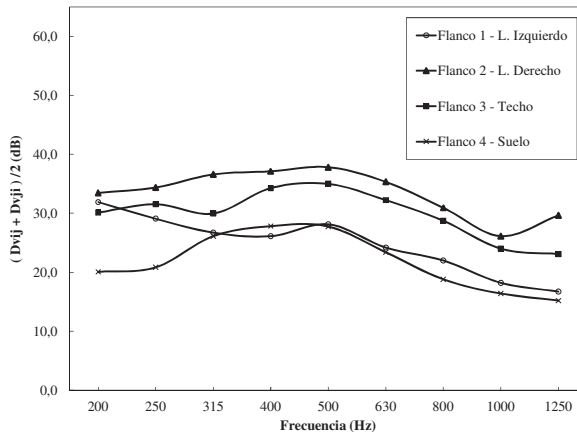


Gráfico 3.6. Diferencias de Velocidad (dB) promediadas direccionalmente sobre la unión para cada elemento de flanco en unión con el elemento a ensayo

A la vista de los resultados presentados en el Gráfico 3.6, podemos ver que los elementos de flanco 1 y 4, es decir, la pared lateral izquierda y el suelo, son los que ofrecen menor diferencia de niveles de velocidad a ambos de la unión, por tanto serán más débiles y proporcionarán una mayor transmisión de potencia vibratoria en el camino de transmisión Flanco-flanco.

3.5.2.2. Tiempo de reverberación estructural.

El tiempo de reverberación estructural, T_s , se define como el tiempo que se requiere para que la velocidad o nivel de aceleración en una estructura disminuya 60dB después de que la fuente sonora estructural haya cesado (UNE-EN ISO 10848-1:2007).

Este parámetro se determina con excitaciones puntuales y mediciones puntuales de la velocidad o la aceleración en diferentes posiciones del transductor. Tal y como se define en el apartado 7.3.2 de la Norma UNE EN ISO 10848-1:2007, se pueden usar dos métodos de excitación: la excitación por vibrador o la excitación por martillo. En nuestro caso particular utilizaremos la excitación por martillo, atendiendo a todas las especificaciones que se deben tener en cuenta para utilizar esta técnica.

Puntos de medición y excitación.

De acuerdo con (UNE-EN ISO 10848-1:2007), se deben utilizar, al menos, tres posiciones de excitación sobre el elemento a ensayo, y al menos, tres posiciones de transductor para cada punto de excitación. Lo que hace un total de nueve posiciones de acelerómetro en cada uno de los elementos de flanco, tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor. Para un tamaño estándar de elementos de construcción, las posiciones de transductor y los puntos de excitación se deben disponer utilizando las siguientes distancias mínimas:

- 0.5 m entre posición de transductor y límites del elemento a ensayo
- 1.0 m entre los puntos de excitación y las posiciones del transductor asociadas
- 0.5 m entre cada posición del transductor.

No obstante, como los ensayos se realizan sobre un laboratorio escalado en tamaño (1:5), estas distancias mínimas se reducen en el mismo factor de escalado, quedando de la siguiente forma:

- 0.1 m entre las posiciones del transductor y los límites del elemento a ensayo
- 0.2 m entre los puntos de excitación y las posiciones del transductor asociadas
- 0.1 m entre cada posición del transductor.

Metodología de medición.

Se evalúa el tiempo de reverberación estructural de cada uno de los elementos de flanco, desde el flanco 1 hasta el flanco 4, tanto en el recinto emisor (elementos i) como en el recinto receptor (elementos j). Se excita cada elemento a ensayo con un golpe seco de martillo, se registra la respuesta temporal de la caída de la amplitud de vibración en cada banda de frecuencia, mediante un acelerómetro y utilizando un analizador de respuesta temporal.

El martillo excitador cuenta con diferentes puntas de diferentes materiales, por lo que se prueba con varias de ellas para asegurar que todas las bandas de frecuencia son excitadas. Una vez seleccionada la punta adecuada y realizados los nueve registros (3 posiciones de acelerómetro por cada posición de excitación) para cada elemento, el tiempo de reverberación estructural de cada uno de ellos se determina promediando aritméticamente los tiempos de reverberación individuales.

En la Figura 3.16 se puede ver un detalle de las mediciones del tiempo de reverberación estructural en el interior de la cámara de transmisión a estudio.



Figura 3.16. Medida del tiempo de reverberación estructural de los elementos del recinto receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido

Resultados.

(3)

En el Gráfico 3.7 se muestran los resultados de tiempo de reverberación estructural, T_s , para cada elemento de flanco, tanto en recinto emisor (elementos i) como en recinto receptor (elementos j).

Podemos observar que existe una diferencia importante entre los resultados obtenidos para el elemento de flanco 4 (suelo) y el resto de elementos. Esto se debe a la propia composición del elemento. Tal y como se ha comentado anteriormente, aunque el acabado interior es el mismo, los materiales que componen el suelo no son los mismos que los materiales que componen paredes y techo de la cámara de transmisión. Esto hace que la respuesta de este elemento constructivo ante una excitación transitoria sea distinta a la del resto, en este caso, la diferencia se refleja en un aumento del tiempo de reverberación estructural entre las frecuencias de 125Hz a 1000Hz.

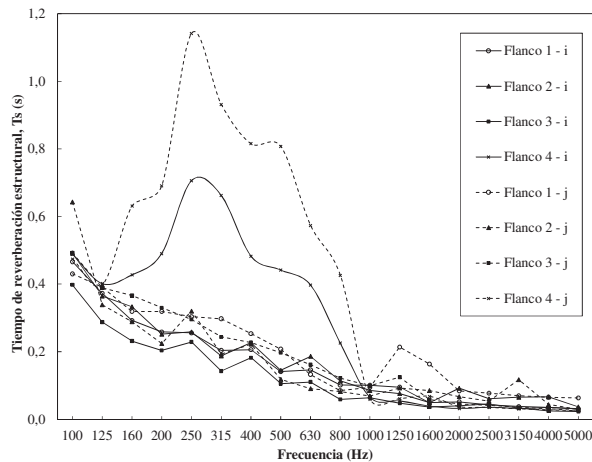


Gráfico 3.7. Tiempos de reverberación estructural para cada elemento de flanco, tanto en recinto emisor (elementos i) como en recinto receptor (elementos j).

³ Parte de los resultados presentados en este apartado, corresponden al Trabajo Final de Máster de Pablo Garrido Jiménez, titulado “aislamientos acústico a ruido aéreo de soluciones multicapa en cámara de transmisión a escala” y dirigido por Laura Bertó (autora del presente trabajo) y Jesús Alba, director del presente trabajo (Garrido-Jiménez, P. et al., 2014).

3.5.2.3. Índice de Reducción Vibracional, K_{ij} .

Una vez obtenidas las diferencias de velocidad promediadas direccionalmente sobre la unión y los tiempos de reverberación estructural de cada elemento de flanco, tenemos los datos necesarios para obtener el índice de reducción vibracional, K_{ij} , de cada unión en el camino de transmisión Flanco-flanco.

Recordemos que este parámetro es el que está directamente relacionado con las transmisiones laterales, por tanto, será el que se utilizará más adelante para estudiar la influencia de las transmisiones laterales en las medidas realizadas en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

El índice de reducción vibracional por frecuencias se obtiene mediante la aplicación de las ecuaciones (3.3) y (3.4), teniendo en cuenta, además de los datos de D_{vij} y T_s , los siguientes datos de entrada: para los flancos laterales, $L_{ij} = 0.55m$; $S_i = 0.6m^2$; $S_j = 0.5m^2$ y $F_{ref} = 1000Hz$. Para el suelo y el techo, $L_{ij} = 0.86m$; $S_i = 0.93m^2$; $S_j = 0.78m^2$ y $F_{ref} = 1000Hz$.

Se debe tener en cuenta que, de acuerdo con el Anexo A de la Norma UNE EN ISO 10848-1:2007 (UNE-EN ISO 10848-1:2007) los resultados en bandas de un tercio de octava se pueden expresar con un único número. El índice único de K_{ij} , indicado como el índice de reducción de vibraciones medio, es el promedio aritmético de K_{ij} dentro del rango de frecuencias de 200Hz a 1250Hz. Si K_{ij} varía considerablemente dentro del rango de frecuencias indicado, se deberá utilizar con prudencia.

Los resultados de K_{ij} , en bandas de tercio de octava desde 200Hz hasta 1250Hz, se presentan en el Gráfico 3.8, En la Tabla 3.7 se muestran los valores globales de K_{ij} para cada flanco.

(4)

Tabla 3.7. K_{ij} global para el camino de transmisión Flanco – flanco (Flanco 1 a Flanco 4)

Índice de Reducción vibracional Flanco – flanco (Desde Flanco 1 a 4)				
	Flanco 1	Flanco 2	Flanco 3	Flanco 4
	K_{11} - L. Izquierdo	K_{22} - L. Derecho	K_{33} - Techo	K_{44} - Suelo
Global (dB)	27.7	35.6	32.0	27.8

⁴ Parte de los resultados presentados en este apartado, corresponden al Trabajo Final de Máster de Pablo Garrido Jiménez (Garrido-Jiménez, P. et al., 2014), titulado “aislamientos acústico a ruido aéreo de soluciones multicapa en cámara de transmisión a escala” y dirigido por Laura Bertó (autora del presente trabajo) y Jesús Alba.

Podemos ver que el índice de reducción vibracional global es menor para el flanco lateral izquierdo y para el suelo. Estos resultados están asociados a la menor diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente sobre la unión para estos dos flancos. Sin embargo la diferencia en el tiempo de reverberación estructural en el flanco 4 respecto al resto no supone tanta influencia en el resultado final de K_{ij} .

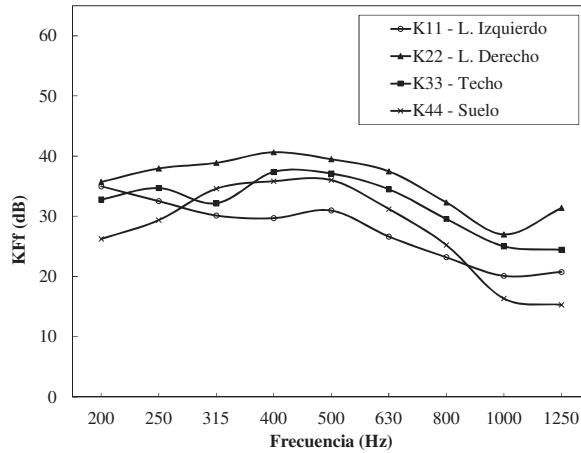


Gráfico 3.8. Índice de reducción vibracional, K_{ij} , de cada unión, en el camino de transmisión Flanco-flanco (K_{Ff}).

3.6. Método de ensayo y resultados.

Tras la evaluación acústica se empieza a evaluar el aislamiento acústico a ruido aéreo de determinadas configuraciones. El procedimiento de ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo sigue las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 10140-2:2011 (UNE-EN ISO 10140-2:2011). En la Figura 3.17 se puede ver un esquema sencillo del conexionado y equipo empleado durante las mediciones y en la Figura 3.18 una imagen tomada durante la preparación de uno de los ensayos de aislamiento acústico en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

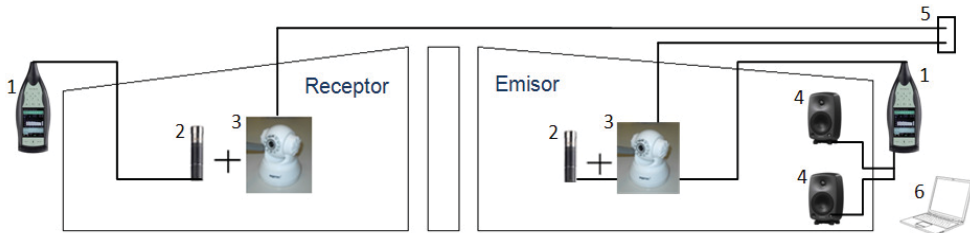


Figura 3.17. 1-Sonómetro 2250; 2-micrófono 4189; 3-cámara ACQPX; 4-Altavoces Genelec; 5-tomas de red; 6-portátil para control mediante IP de cámaras ACQPX.



Figura 3.18. Captura de imagen durante la puesta en marcha de un ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido.

En cada ensayo de aislamiento acústico se mide el tiempo de reverberación en el recinto receptor mediante el método de ruido interrumpido, según se describe en la Norma UNE EN ISO 3382-2:2008 (UNE-EN ISO 3382:2008).

Para ello se utiliza uno de los altavoces Genelec como fuente de ruido. Además, en cada ensayo se comprueba que el ruido de fondo en el recinto receptor sea 15dB inferior al ruido recibido durante el ensayo.

Los materiales a ensayar para calibrar y poner en marcha la pequeña cámara de transmisión serán materiales ampliamente extendidos en el mercado y de los que conozcamos bien su comportamiento acústico.

La finalidad de estos primeros ensayos de calibración, además de buscar la validación de la cámara, es buscar el máximo aislamiento posible de medir en nuestro pequeño laboratorio (UNE-EN ISO 10140-5:2011) siempre teniendo en cuenta ciertas limitaciones como, por ejemplo, el espesor del porta-muestras, que nos limita a configuraciones de 80mm de espesor máximo.

Se realizan 5 ensayos para configuración simple (Config. 1 a 5) y un ensayo para configuración doble (Config. 6), entendiéndose por configuraciones dobles aquellas que cuentan con una cámara de aire entre placas de, al menos 40mm, rellena o no con material absorbente.

Las configuraciones a estudio fueron:

- Configuración 1: Una Placa de Yeso Laminado de 13mm/placa, (1 PYL-13mm)
- Configuración 2: Dos Placas de Yeso Laminado de 13mm/placa, (2 PYL-13mm)
- Configuración 3: Tres Placas de Yeso Laminado de 13mm/placa, (3PYL-13mm)
- Configuración 4: Cuatro Placas de Yeso Laminado de 13mm/placa, (4 PYL-13mm)
- Configuración 5: Cinco Placas de Yeso Laminado de 13mm/placa, (5 PYL-13mm)
- Configuración 6: 2 PYL-13mm + espuma de material reciclado de 40mm de espesor + 1 PYL-13mm, (1PYL-13mm + Espuma 40/80 + 2PYL-13mm)

En la Figura 3.19 y la Figura 3.20 se muestran detalles de los montajes de algunas de estas configuraciones.



Figura 3.19. Montajes de Configuraciones simples



Figura 3.20. Montajes de Configuraciones dobles.

En el Gráfico 3.9 se presentan los resultados del índice de reducción sonora, R , obtenidos de acuerdo a las indicaciones de la Norma UNE EN ISO 10140-2:2011 (UNE-EN ISO 10140-2:2011), para cada configuración ensayada.

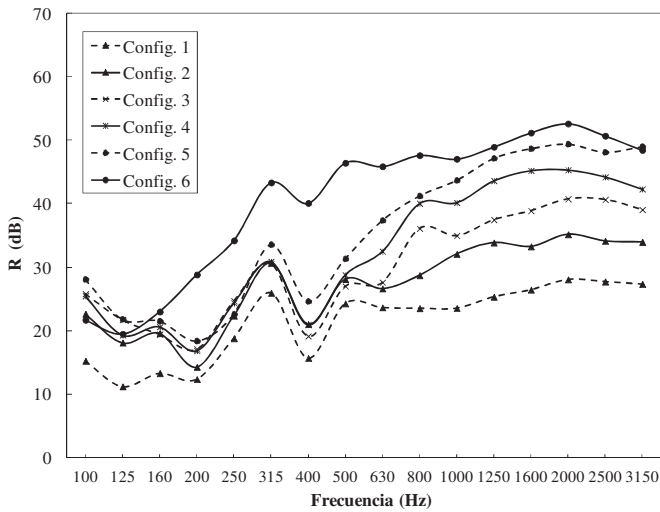


Gráfico 3.9. Índice de reducción sonora, R , para cada configuración de ensayo, en bandas de tercio de octava desde 100Hz hasta 3150Hz.

En la Tabla 3.8 se pueden ver los valores de índice de reducción sonora, ponderado, global para cada caso, obtenido de acuerdo a las especificaciones de la Norma UNE EN ISO 717-1:2013 (UNE-EN ISO 717-1:2013).

Tabla 3.8. Índice de reducción sonora, ponderado, global para cada configuración a ensayo.

	Configuración					
	Config. 1	Config. 2	Config. 3	Config. 4	Config. 5	Config. 6
R_w (C,Ctr)	24 (1-3)	30(-1-4)	32 (-1,-5)	34 (-1,-6)	36 (-1,-6)	44 (-3, -9)

Recordemos que los resultados obtenidos para un margen de frecuencias por debajo de 650Hz deben evaluarse con precaución, pues por debajo de esta frecuencia predomina una escasa densidad de modos propios y las desviaciones entre puntos de medida todavía son considerables. Esto deriva en una débil uniformidad y difusividad de campo sonoro que puede afectar a la estabilidad de los resultados obtenidos.

Así pues, se debe tener en cuenta que los valores globales de aislamiento, R_w , de configuraciones medidas en la cámara de transmisión de tamaño reducido, se obtienen a partir de un rango de frecuencias, parte del cual, puede presentar inestabilidades debido a la falta de densidad de modos propios.

No obstante, a pesar de estas limitaciones que presenta la pequeña cámara de transmisión y que deben tenerse presentes a la hora de evaluar ensayos, los resultados obtenidos presentan una tendencia clara de comportamiento, aumentando la curva de aislamiento a medida que aumentamos la masa en configuración simple, alcanzando un aislamiento máximo de 44dB con la configuración 6 o configuración doble.

3.7. Influencia de las transmisiones laterales sobre los resultados obtenidos.

A partir de aquí se deberá evaluar si las transmisiones laterales afectan a los resultados de aislamiento acústico obtenidos para cada una de las configuraciones a estudio (Gráfico 3.9), cuando éstas son evaluadas en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Para ello partimos de la ecuación (3.8) que representa el valor de ensayo con efecto de las transmisiones laterales.

$$R' = -10 \log \left(10^{-R_{Dd}/10} + \sum_{f=F+1}^n 10^{-R_{Ff}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd}/10} \right) dB \quad (3.8)$$

Los términos R_{Ff} , R_{Df} y R_{Fd} se refieren a los índices de reducción acústica de flanco, para cada camino de transmisión, y vienen definidos por la ecuación (3.9), con $ij = Ff$, Fd y Df , tal como indica la Norma UNE-EN ISO 12354-1:2000.

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_i + \Delta R_j + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{ij}} dB \quad (3.9)$$

donde:

R_i es el índice de reducción acústica del elemento i en el recinto emisor, en decibelios;

R_j es el índice de reducción acústica del elemento j en el recinto receptor, en decibelios;

ΔR_i , ΔR_j son la mejora del índice de reducción acústica de los recubrimientos del elemento i en el recinto emisor y/o del elemento j en el recinto receptor, en decibelios;

K_{ij} es el índice de reducción vibracional para cada camino de transmisión desde el elemento i al j , en decibelios;

S_s es el área del elemento separador, en m^2 ;

l_{ij} es la longitud común de acoplo entre el elemento i y el j , en m;

l_0 es la longitud de referencia, igual a 1 m.

El término R_{Dd} de la ecuación (3.8) corresponde al aislamiento de la pared sin efecto de las transmisiones laterales y por tanto es el valor que buscamos para comparar con el valor medido en cámara de transmisión de tamaño reducido y evaluar si las transmisiones laterales tienen o no efecto sobre los resultados de aislamiento obtenidos.

Este término R_{Dd} también aparece en las ecuaciones que definen R_{Df} y R_{Fd} , de la siguiente forma:

$$R_{Df} = \frac{R_{Dd} + R_f}{2} + \Delta R_D + \Delta R_f + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Df}} \quad (3.10)$$

$$R_{Fd} = \frac{R_f + R_{Dd}}{2} + \Delta R_F + \Delta R_d + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Fd}} \quad (3.11)$$

Por tanto se pueden reorganizar los dos últimos sumatorios de la ecuación (3.8) como:

$$\sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df}}{10}} = \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_{Dd} + R_f}{2} + \Delta R_D + \Delta R_f + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Df}}\right)}{10}} = 10^{\frac{-R_{Dd}}{20}} \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_f}{2} + \Delta R_D + \Delta R_f + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Df}}\right)}{10}} \quad (3.12)$$

$$\sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd}}{10}} = 10^{\frac{-R_{Dd}}{20}} \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_F}{2} + \Delta R_F + \Delta R_d + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Fd}}\right)}{10}} \quad (3.13)$$

Así pues, sustituyendo las ecuaciones (3.12) y (3.13) en la ecuación (3.8) tenemos:

$$\begin{aligned} 10^{\frac{-R'}{10}} &= 10^{\frac{-R_{Dd}}{10}} + 10^{\frac{-R_{Dd}}{20}} \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_f}{2} + \Delta R_D + \Delta R_f + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Df}}\right)}{10}} + 10^{\frac{-R_{Dd}}{20}} \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_F}{2} + \Delta R_F + \Delta R_d + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Fd}}\right)}{10}} + \\ &\quad + \sum_{f=F=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff}}{10}} \\ 10^{\frac{-R'}{10}} &= 10^{\frac{-R_{Dd}}{10}} + 10^{\frac{-R_{Dd}}{20}} \left(\sum_{f=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_f}{2} + \Delta R_D + \Delta R_f + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Df}}\right)}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_F}{2} + \Delta R_F + \Delta R_d + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{Fd}}\right)}{10}} \right) + \\ &\quad + \sum_{f=F=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff}}{10}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) se puede estructurar como una ecuación de segundo grado, con $a=1$, donde:

$$x = 10^{\frac{-R_{Dd}}{20}} \quad x^2 = 10^{\frac{-R_{Dd}}{10}}$$

Y sus coeficientes b y c serán:

$$b = \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_f}{2} + \Delta R_D + \Delta R_f + K_{Df} + 10 \log \frac{S_S}{l_0 l_{Df}}\right)}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-\left(\frac{R_F}{2} + \Delta R_F + \Delta R_d + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_S}{l_0 l_{Fd}}\right)}{10}}$$

$$c = \sum_{f=F=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff}}{10}} - 10^{\frac{-R}{10}}$$

La solución de x será:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \text{ y por tanto:}$$

$$R_{Dd} = -20 \log x = -20 \log \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -20 \log \left(-b \pm \sqrt{b^2 - 4c} \right) + 6 \quad (3.15)$$

La ecuación (3.15) proporciona el aislamiento acústico de la pared principal sin transmisiones laterales, valor que debemos comparar con lo medido “in situ” para comprobar que no existen influencias de dichas transmisiones laterales.

Para poder aplicar la ecuación (3.15), será necesario conocer el índice de reducción vibracional de cada flanco, K_{ij} , con $ij = Ff, Fd$ y Df , y los valores de aislamiento acústico de los elementos de flanco, R_i y R_j .

Aislamiento acústico de los elementos de flanco.

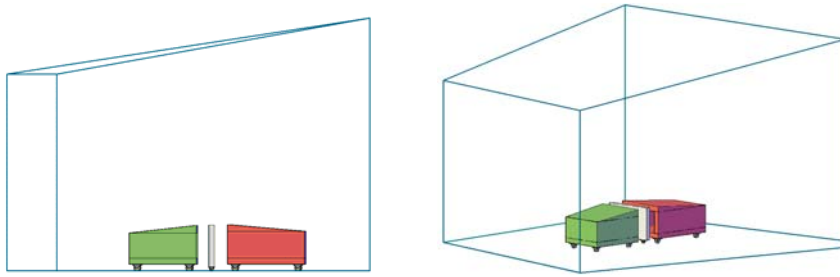
Los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de flanco se obtienen a partir de mediciones “in situ”, mientras que los valores de K_{Ff} , K_{Df} y K_{Fd} , cuando existe un elemento a ensayo instalado en el portamuestras, se obtendrán a partir de estimaciones teóricas, pero basándonos en los datos de K_{Ff} medidos “in situ” obtenidos en ausencia de instalación de un elemento a ensayo sobre el portamuestras.

Para obtener el valor de aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de flanco, tanto del recinto emisor como del recinto receptor, nos basamos en las especificaciones de la norma UNE EN ISO 140-4-1999 (a día de hoy derogada por la norma UNE EN ISO 16283-1:2014 (UNE-EN ISO 16283-1:2014), bajo ciertas limitaciones debido a las dimensiones y características de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

Cada recinto, emisor y receptor, cuenta con dos paredes laterales, suelo y techo que son elementos de flanco del elemento separador a ensayo y la pared de fondo. Debido a sus reducidas dimensiones no se pueden evaluar por separado como si fueran un elemento de separación entre dos recintos, así pues, se decide evaluarlos en global como si fuera un único elemento. Para ello:

- Se introducirán ambos recintos, emisor y receptor, separados por la configuración de ensayo 6 o configuración doble, en un recinto mayor.
- Dicho recinto mayor, actuará como “recinto emisor del ensayo” y los recintos emisor y receptor que conforman la cámara de transmisión, serán los recintos receptores.
- Es importante que el “recinto emisor de ensayo” cuente con un campo sonoro lo más difuso posible. Así pues, se decide utilizar la Cámara Reverberante estandarizada de la Escuela Politécnica Superior de Gandia, en la que las ondas sonoras dentro del recinto tienden a aproximarse a una distribución de probabilidad uniforme donde cualquier ángulo de incidencia sobre un elemento tiene la misma probabilidad para que el nivel de ruido emitido incida de manera aleatoria sobre una superficie (Hernández García F. et al., 2012).

La Figura 3.21 muestra un croquis de la situación a ensayo y en la Figura 3.22 se muestran imágenes tomadas durante las mediciones.



- Recinto receptor de la cámara de transmisión. Actúa como receptor para evaluar el aislamiento de sus cerramientos (R_j)
- Recinto emisor de la cámara de transmisión. Actúa como receptor para evaluar el aislamiento de sus cerramientos (R_i)
- Portamuestras con elemento de separación (Config. 6)
- Cámara Reverberante. Actúa como recinto emisor.

Figura 3.21. Croquis de ubicación de la cámara de transmisión de tamaño reducido en el interior de la cámara reverberante para evaluar el aislamiento acústico de los cerramientos que la conforman.



Figura 3.22. Imágenes tomadas durante las mediciones de aislamiento acústico de los cerramientos que conforman emisor y receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido.

En la Tabla 3.9 se resumen los resultados obtenidos de aislamiento acústico para los elementos de flanco. Podemos observar cómo, a pesar de contar con la misma solución constructiva, el recinto emisor aporta un aislamiento mayor que el recinto receptor. Por ello se asume que existe alguna deficiencia en la ejecución de alguno de los cerramientos que conforman el recinto receptor, que deriva en una merma en el aislamiento acústico que lo conforma. Además, estamos alejados del valor de aislamiento acústico a ruido aéreo que se planteó en la fase de diseño, el cual rondaba los 50dB.

Esto puede deberse a multitud de factores en el proceso de construcción, que intervienen en el resultado final de aislamiento acústico. El hecho de realizar esta comprobación “in situ” nos permite trabajar con valores reales y, por tanto, obtener una validación acústica de la cámara de transmisión desde un punto de vista más conservador.

Tabla 3.9. Datos de aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de flanco al elemento a ensayo.

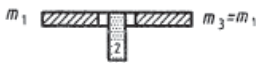
Frecuencia (Hz)	R(dB)	
	Paredes recinto emisor	Paredes recinto receptor
100	34.2	28.5
125	33.5	34.8
160	38.9	36.2
200	35.1	31.0
250	35.3	34.7
315	41.0	40.3
400	47.1	45.8
500	50.2	44.5
630	48.5	44.6
800	46.9	37.7
1000	45.7	37.8
1250	43.0	38.7
1600	44.2	39.0
2000	42.8	38.0
2500	41.2	36.9
3150	42.7	37.0
4000	42.8	37.6
5000	44.6	39.7
R',w	44	38

Índice de reducción vibracional de cada elemento de flanco.

El efecto de la colocación del portamuestras entre recinto emisor y receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido, se evalúa a través de mediciones “in situ” de índice de reducción vibracional, dando como resultado los valores de K_{Ff} “in situ” que se presentaron en el Gráfico 3.8.

Los valores de K_{Ff} , K_{Df} y K_{Fd} , tras instalar un elemento a ensayo en el portamuestras, se obtendrán, para cada caso de ensayo, a partir de estimaciones teóricas.

En el caso que nos ocupa, **para configuraciones simples**, la unión entre elementos a ensayo y elementos de flanco, corresponde a la "unión de paredes con capas intermedias flexibles" definida en la Norma UNE EN ISO 12354-1:2000. Este tipo de unión se rige por las siguientes ecuaciones:



$$K_{13} = 5,7 + 14,1 \cdot M + 5,7 \cdot M^2 + 2\Delta \quad (3.16)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \cdot M^2 + \Delta (= K_{23}) \quad (3.17)$$

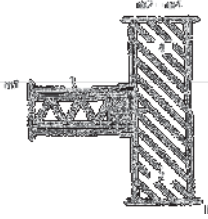
Donde:

$$M = \log \left(\frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Donde:} \\ m'_{\perp i} \text{ es la masa por unidad de superficie (Kg/m}^2\text{) del elemento i en el camino de transmisión ij. En nuestro caso } \approx 50 \text{ Kg/m}^2 \\ m'_i \text{ es la masa por unidad de superficie (Kg/m}^2\text{) de la pared que se instala, perpendicular al elemento i, y que forma el flanco de unión} \end{array} \right.$$

Y Δ es un valor teórico para un caso concreto. Aunque para nuestro caso, ese valor de Δ ha sido medido, puesto que lo único que teníamos interpuesto entre el elemento i y el j durante las mediciones de K_{Ff} “in situ” era el elemento elástico a ambos lados del porta-muestras.

Así pues, 2Δ será el valor de K_{Ff} medido “in situ” en cada unión, que se aplicará a K_{13} (K_{Ff}) en la ecuación (3.16). Y Δ será el valor de $K_{Ff}/2$ medido “in situ” en cada unión, que se aplicará a K_{23} (K_{Df}) y K_{12} (K_{Fd}) en la ecuación (3.17).

En el caso de **configuraciones dobles**, corresponden las expresiones empíricas de la "unión de pared ligera de doble hoja con elementos homogéneos" definida en la Norma UNE EN ISO 12354-1:2000. Este tipo de unión se rige por las siguientes ecuaciones:



$$K_{24} = 3,0 - 14,1M + 5,7 \cdot M^2 \quad dB \quad (3.18)$$

$$K_{12} = 10 + 10|M| + 3,3 \log \frac{f}{f_k} \quad dB \quad (= K_{23}) \quad (3.19)$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

Donde:

$$M = \log \left(\frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \right) \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{Donde:} \\ m'_{\perp i} \text{ es la masa por unidad de superficie (Kg/m}^2\text{) del elemento i en el camino de transmisión ij. En nuestro caso } = 50 \text{ Kg/m}^2 \\ m'_i \text{ es la masa por unidad de superficie (Kg/m}^2\text{) de la pared que se instala, perpendicular al elemento i, y que forma el flanco de unión} \end{array} \right.$$

Ahora bien, a las ecuaciones

(3.18) y (3.19) les haría falta, para nuestro caso concreto, un valor de Δ , que haría referencia a las capas intermedias flexibles que existen entre el portamuestras y los elementos de flanco. Así pues, estas ecuaciones quedarán como:

$$K_{24} = 3,0 - 14,1M + 5,7 \cdot M^2 + 2\Delta \quad dB \quad (3.20)$$

$$K_{12} = 10 + 10|M| + 3,3 \log \frac{f}{f_k} + \Delta \quad dB \quad (= K_{14}) \quad (3.21)$$

Así pues, a partir de las ecuaciones (3.16), (3.17), (3.20) y (3.21) y los valores de K_{FF} obtenidos "in situ", se calcula el índice de reducción vibracional para cada uno de los cuatro flancos y en cada camino de transmisión (Ff, Fd y Df). El resultado obtenido dependerá de la configuración a ensayo debido a la dependencia de las ecuaciones con la masa superficial de la pared a instalar o a evaluar.

A partir de aquí, y haciendo uso de la ecuación (3.15), obtenemos el valor de R_{Dd} para cada configuración de ensayo. Este valor, como se ha comentado anteriormente, corresponde al índice de reducción sonora de la pared a ensayo sin la influencia de las transmisiones laterales.

En los siguientes gráficos se compara el valor de R_{Dd} obtenido mediante la ecuación (3.15), con el valor de aislamiento acústico obtenido “in situ” en la cámara de transmisión de tamaño reducido, para cada configuración ensayada.

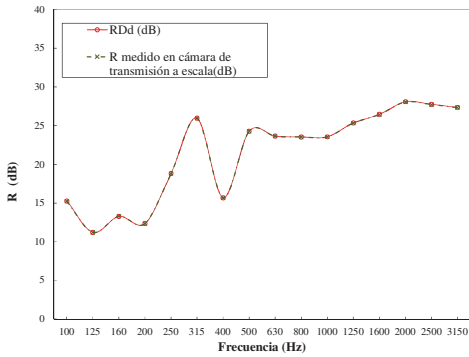


Gráfico 3.10. Config.1 – 1PYL-13mm

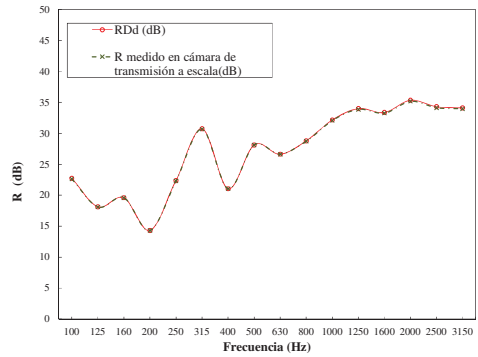


Gráfico 3.11. Config.2 – 2PYL-13mm

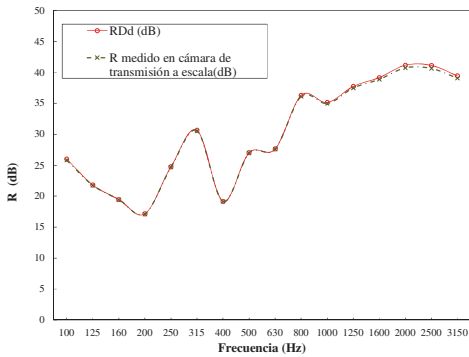


Gráfico 3.12. Config.3 – 3PYL-13mm

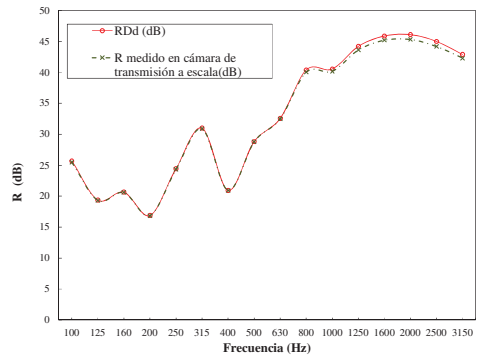


Gráfico 3.13. Config.4 – 4PYL-13mm

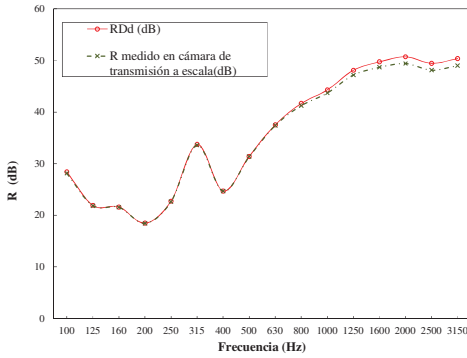


Gráfico 3.14. Config.5 – 5PYL-13mm

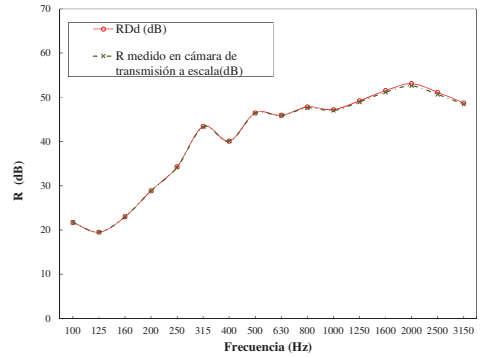


Gráfico 3.15. Config.6 – 1PYL-13mm+Espuma 40/80+2PYL-13mm

A la vista de los resultados representados en los gráficos anteriores, podemos ver cómo no existe influencia alguna de las transmisiones laterales en los ensayos realizados en la cámara de transmisión de tamaño reducido.

3.8. Validación de la cámara de transmisión como laboratorio de tamaño reducido

Para validar todas las actuaciones expuestas en los apartados anteriores, los resultados de aislamiento acústico obtenidos para cada configuración ensayada se comparan con resultados teóricos obtenidos mediante simulación con el software de predicción Aisla 3.01 o con resultados obtenidos en cámara de transmisión normalizada (en caso de disponer de ellos). La afinidad de esta comparativa nos ofrecerá la validación de la cámara de transmisión como laboratorio de ensayos de tamaño reducido.

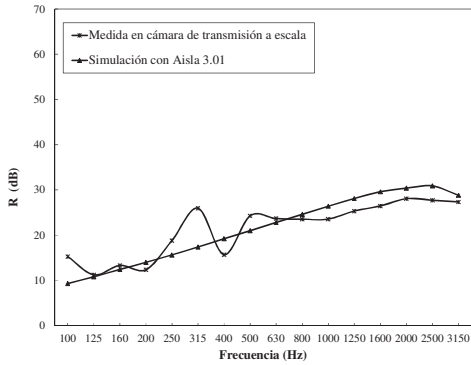


Gráfico 3.16. Config.1 – 1PYL-13mm

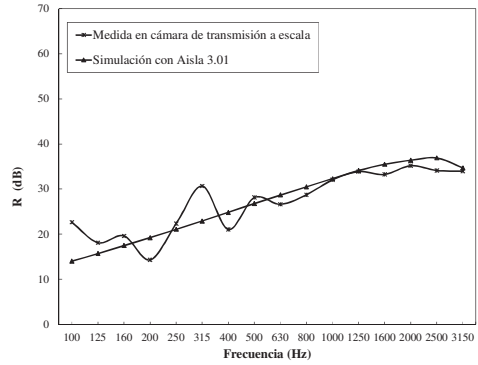


Gráfico 3.17. Config.2 – 2PYL-13mm

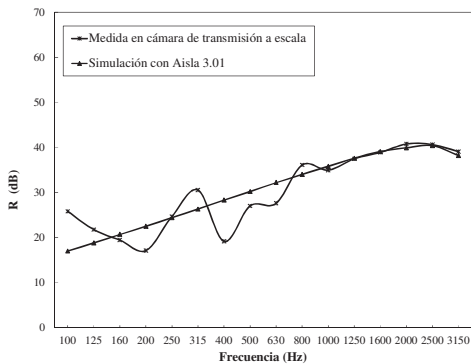


Gráfico 3.18. Config.3 – 3PYL-13mm

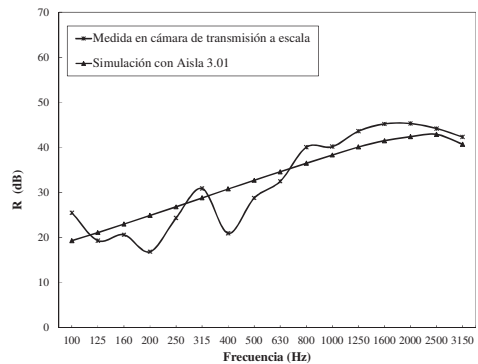


Gráfico 3.19. Config.4 – 4PYL-13mm

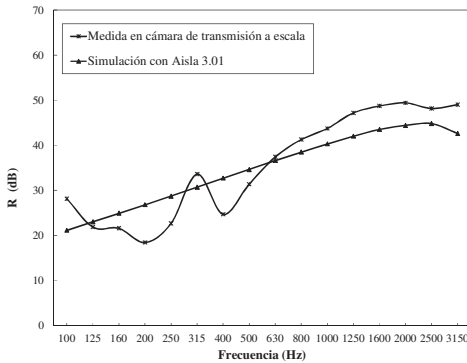


Gráfico 3.20. Config.5 – 5PYL-13mm

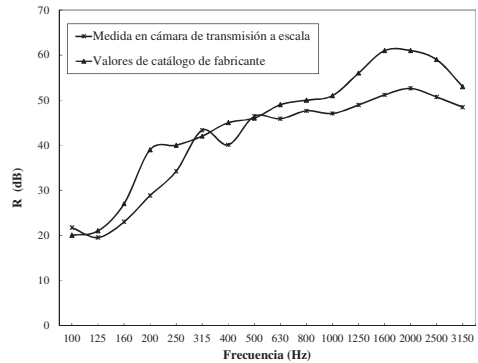


Gráfico 3.21. Config.6 – 1PYL-13mm+Espuma 40/80+2PYL-13mm

En el caso de configuraciones simples, para las que no se dispone de datos de cámara de transmisión normalizada, los resultados obtenidos se comparan con resultados obtenidos mediante simulación, utilizando el software de simulación Aisla 3.01, y se comprueba que, aunque con ligeras desviaciones, mantienen el mismo comportamiento.

En el caso de configuración doble los resultados obtenidos se comparan con datos de cámara de transmisión normalizada. Aunque con algunas desviaciones a frecuencias altas, ambas curvas de aislamiento mantienen la misma tendencia.

En estos resultados se puede ver cómo, a pesar de que habíamos establecido la frecuencia de corte de la cámara en 630Hz, las curvas de aislamiento obtenidas de ensayos “in situ” presentan una notable estabilidad, en la mayoría de los casos, desde 500Hz.

Así pues, por debajo de 500Hz-630Hz, los resultados obtenidos en esta cámara de transmisión para cualquier ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo pueden estar influenciados por la región de modos propios del recinto y deben tratarse con prudencia.

La coincidencia de los resultados obtenidos con simulaciones teóricas o con resultados obtenidos en cámara de transmisión estandarizada, a partir de 500Hz-630Hz, exponen la validación de la cámara de transmisión de tamaño reducido como laboratorio de ensayo de pequeñas dimensiones, para elementos ligeros.

3.9. Utilización de la cámara de transmisión de tamaño reducido en proyectos de investigación.

Tras la validación y puesta en marcha de la cámara de transmisión de tamaño reducido, de acuerdo a lo expuesto en este capítulo 3 del proyecto de Tesis, se ha empezado a utilizar como laboratorio indispensable en determinados proyectos de investigación.

Uno de ellos es el proyecto Nacional BIA2013-41537-R “DESARROLLO DE NUEVOS ECOMATERIALES Y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS SOSTENIBLES PARA EDIFICACION BASADAS EN EL USO DE RESIDUOS Y MATERIAS PRIMAS RENOVABLES" ubicado en el reto (5) de los propuestos por la Unión Europea en el "Horizonte 2020" y recogidos en la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación : “Reto en acción sobre cambio climático y eficiencia en la utilización de recursos y materias primas” . El objetivo global de este proyecto se centra en ofrecer soluciones reales aplicables a la edificación actual, en su nueva construcción y/o reforma, y adaptadas a las normas europeas y españolas.

Durante el desarrollo de este proyecto de investigación no se dispone de grandes cantidad de material para realizar las primeras pruebas, por lo que la cámara de transmisión de tamaño reducido se convierte en una potente herramienta para evaluar el aislamiento acústico de estos nuevos materiales en fase de desarrollo, de forma preliminar, y comparar los resultados obtenidos con materiales actualmente en el mercado.

A continuación se presentan algunos de los primeros resultados obtenidos en Abril de 2015. Entre otros, se comparan configuraciones a base de composites elaborados a partir de fibras de lino (100%) y poliéster como ligante con configuraciones a base de placa de yeso laminado.

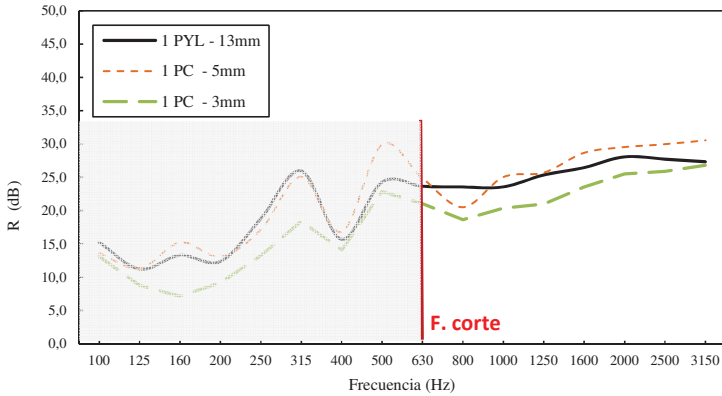


Gráfico 3.22. Comparativa entre configuraciones simples a base de placa de yeso laminado (PYL) de 10Kg/m^2 y placas composite (PC) de 5Kg/m^2 para espesores de 5mm y 3Kg/m^2 para espesores de 3mm

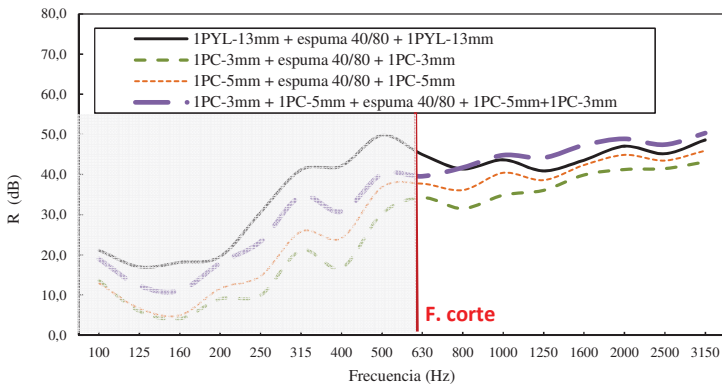


Gráfico 3.23. Comparativa entre configuraciones dobles a base de placa composite y configuraciones a base de placa de yeso laminado.

Tal y como podemos observar en el Gráfico 3.22 y el Gráfico 3.23, los resultados empleados para validar la cámara de transmisión de tamaño reducido (a base de placa de yeso laminado) nos sirven como referencia para evaluar el comportamiento de nuevos materiales en fase de investigación con muestras de apenas 0.47m^2 , frente a los 12m^2 necesarios en una cámara de transmisión estandarizada.

De esta forma se puede obtener, mediante comparación de resultados obtenidos de aislamiento acústico a ruido aéreo, la combinación más propicia, tratando de diseñar una combinación, a base de nuevos materiales sostenibles, que pueda competir o incluso mejorar las prestaciones de aquellos actualmente establecidos en el mercado.

En este caso concreto, un estudio pre-liminar arroja resultados muy prometedores en referencia a la utilización de placas de composite elaboradas a partir de fibras textiles. Estas placas, con la mitad de densidad y menos de la mitad de espesor que una placa de yeso laminado convencional alcanzan resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo similares. Incluso si se combinan varias placas de manera adecuada (PC5mm + PC3mm + absorbente + PC3mm + PC5mm) pueden incluso mejorar los resultados obtenidos.

Este ejemplo de aplicación demuestra el potencial de este pequeño laboratorio a nivel de investigación, pudiendo evaluar nuevos materiales con una reducción importante en costes y tiempo.

3.10. Análisis de resultados.

A continuación se presenta el análisis de resultados obtenidos en este capítulo de tesis, dejando las conclusiones generales reflejadas en el apartado de “Conclusiones”.

- Se mejoran aspectos físicos de la cámara de transmisión de tamaño reducido tales como la independencia del porta-muestras de los recintos emisor y receptor o la automatización de movimiento de micrófono en el interior de dichos recintos. Estos cambios optimizan el proceso de medición, minimizan errores y reducen tiempo de ensayo.
- Se evalúa acústicamente la cámara de transmisión de tamaño reducido atendiendo a tres factores fundamentales: El tiempo de reverberación, la difusividad del campo sonoro y el efecto de las transmisiones laterales.
 - El tiempo de reverberación obtenido, tanto en recinto emisor como en recinto receptor, queda fuera de los límites establecidos para frecuencias inferiores a 800Hz (Gráfico 3.1 Gráfico 3.2). Aunque no supone una variación importante en los resultados finales, se debe plantear en un futuro la implantación de alguna mejora que corrija esta deficiencia y que coloque al tiempo de reverberación dentro de los márgenes establecidos, al menos, a partir de la frecuencia de corte de la cámara.
 - Se realiza un primer estudio de la difusividad del campo sonoro en el interior de la cámara. Los resultados obtenidos sirven como punto de partida para una mejora de dicho parámetro, mejora que se consigue introduciendo paneles difusores tanto en recinto emisor como en recinto receptor (Gráfico 3.3).
 - Tras un minucioso estudio de las transmisiones laterales, se comprueba que, para el tipo de configuraciones estudiadas, estas no tiene influencia sobre los resultados obtenidos (Gráfico 3.10 a Gráfico 3.15). No obstante, ante cualquier ensayo nuevo, siempre se deberá comprobar su influencia según el método desarrollado en el apartado 3.7. del presente estudio.
- Se define la frecuencia de corte de la cámara entorno a 630Hz. Los resultados obtenidos por debajo de esta frecuencia quedan influenciados por la región de modos propios del recinto y, por tanto, deberán utilizarse con prudencia.

- Se ensayan un total de 6 configuraciones, a base de placa de yeso laminado de 13mm de espesor, en configuración simple y doble y el resultado se compara con datos teóricos en el caso de configuraciones simples y con datos obtenidos en cámara de transmisión normalizada en el caso de configuraciones dobles (Gráfico 3.16 a Gráfico 3.21).
- Los resultados obtenidos de estas 6 configuraciones, reflejan que, aunque con ligeras desviaciones, la curva de aislamiento mantienen la misma tendencia que su correspondiente teórica en el caso de configuraciones simples y que su correspondiente obtenida en cámara de transmisión normalizada en el caso de configuraciones dobles. Además, aunque se había establecido la frecuencia de corte de la cámara entorno a 630Hz, las curvas de aislamiento obtenidas de ensayos “in situ” presentan una notable estabilidad, en la mayoría de los casos, desde 500Hz.

La coincidencia de los resultados obtenidos con simulaciones teóricas o con resultados obtenidos en cámara de transmisión estandarizada, a partir de 500Hz-630Hz, exponen la validación de la cámara de transmisión de tamaño reducido como laboratorio de ensayo de pequeñas dimensiones, para elementos ligeros.

Capítulo 4

Cámara reverberante de tamaño reducido.

4.1. Introducción.

En acústica se entiende por *cámara reverberante* a un recinto aislado del ruido exterior, con superficies internas muy reflectantes de tal manera que se consiga un tiempo de reverberación elevado en un amplio margen de frecuencias y está especialmente diseñado para conseguir en su interior un campo acústico suficientemente difuso. Las cámaras reverberantes son uno de los laboratorios más comunes para la medida de los coeficientes de absorción de materiales y objetos, entre otros tipos de ensayos.

Este tipo de laboratorio debe cumplir una serie de condiciones de volumen, forma, difusión de campo sonoro y área de absorción sonora de acuerdo con la Norma UNE EN ISO 354:2004(UNE-EN ISO 354:2004). Esta norma internacional especifica un método de medición del coeficiente de absorción sonora de materiales acústicos empleados como tratamiento de paredes o de techos, o el área de absorción sonora equivalente de objetos en una cámara reverberante. Los resultados obtenidos pueden emplearse con fines comparativos y de diseño en relación al comportamiento de salas y al control del ruido.

El método de medición especificado (UNE-EN ISO 354:2004) requiere, en el caso de absorbentes planos, que es el caso que nos ocupa en este trabajo de Tesis, que la muestra a ensayo tenga un área entre 10m^2 y 12m^2 , sin embargo, si el volumen de la cámara es mayor de 200m^3 , el límite superior para el área de la muestra de ensayo debe incrementarse en el factor $(V/200)^{2/3}$. No obstante, a nivel de investigación, y como se comenta previamente en este trabajo, los primeros prototipos de un material en desarrollo

son de tamaño reducido con el fin de abaratar costes antes de llegar al prototipo final. En la mayoría de los casos las probetas a ensayo no superan el metro cuadrado de superficie, por lo que no cumplen con los requisitos anteriormente citados para poder ser evaluadas en una cámara reverberante estandarizada.

Así pues, con la finalidad de poder evaluar acústicamente nuevos materiales en fase de desarrollo se plantea, en 2010, el diseño y construcción de una cámara reverberante de pequeñas dimensiones, tomando como referencia la cámara reverberante estandarizada de la Escuela Politécnica Superior de Gandia y aplicando a sus dimensiones un factor de escala de 1:6 (Arrebola, F. et al., 2011).

Uno de los objetivos particulares de este trabajo de Tesis, es evaluar, mejorar y poner en marcha la cámara reverberante de tamaño reducido, construida en 2011, para la obtención de resultados del coeficiente de absorción sonora de materiales, a frecuencias medias y altas, comparables con los obtenidos en una cámara reverberante estandarizada. De esta forma se pretende evaluar muestras de tamaño reducido (alrededor de 0.3m^2), en fase de desarrollo, permitiendo abaratar costes de fabricación antes de alcanzar una solución final.

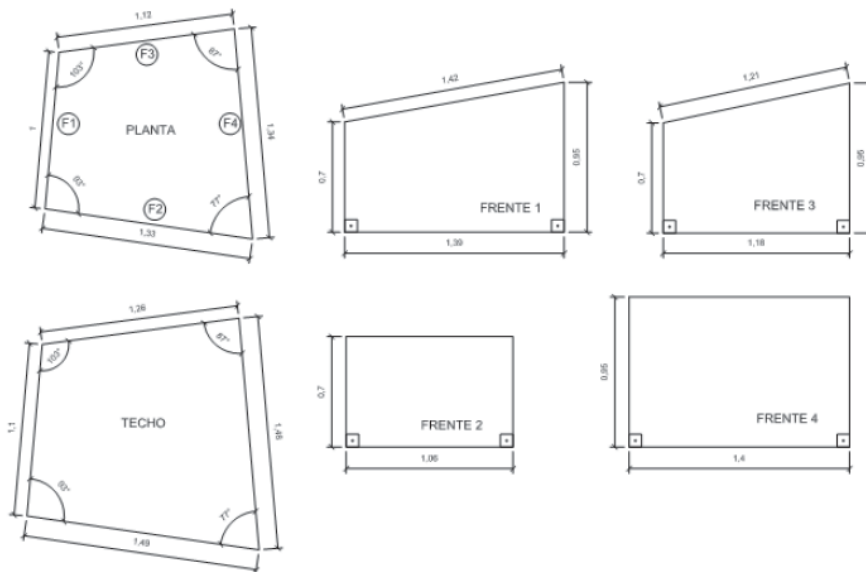
Al igual que la cámara de transmisión de tamaño reducido, la puesta en marcha y ajuste de este pequeño laboratorio supone la disponibilidad de una potente herramienta para evaluar la absorción acústica en incidencia difusa de nuevos materiales y ecomateriales en fase de desarrollo, abaratando costes, tanto en el proceso de fabricación como en el transporte y ensayo de los mismos.

4.2. Diseño, construcción y primeros resultados.

El diseño y construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido se lleva a cabo en el año 2011 y forma parte del proyecto europeo LIFE (LIFE09 ENV/ES/461) NOISEFRETEX (LIFE09 ENV/ES/000461, 2011). Esta cámara se diseña siguiendo, en la medida de lo posible, las especificaciones de la Norma UNE EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004). El diseño y construcción de este laboratorio de tamaño reducido se detalla en trabajos anteriores (Arrebola, F. et al., 2011; Alba J. et al, 2012b), no obstante, a continuación se enumeran y explican aspectos importantes de este proceso.

Diseño de la geometría.

El diseño y dimensionado de la cámara reverberante de tamaño reducido parte del diseño de una cámara reverberante estandarizada, la cámara reverberante de la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG), que ya cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004). En la Figura 4.1 se muestran las dimensiones interiores decididas en diseño.

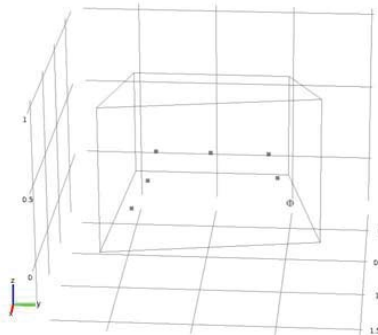


FUENTE: (Arrebola, F. et al., 2011; Alba J. et al, 2012b)

Figura 4.1. Dimensiones interiores de la cámara reverberante de tamaño reducido. Fase de diseño

Para valorar el comportamiento de la relación geométrica propuesta, se utilizó el método de los elementos finitos. Se evaluó, mediante simulación, el nivel de presión sonora registrado en seis posiciones de micrófono para dos puntos de excitación o, lo que es lo mismo, dos posiciones de fuente.

Figura 4.2 se puede ver un detalle de las posiciones de micrófono y una de las dos posiciones de fuente establecidas para la simulación. En (Arrebola, F. et al., 2011) se amplía información al respecto.



FUENTE: (Arrebola, F. et al., 2011)

Figura 4.2. Detalles de posiciones de micrófono y fuente.

Diseño del aislamiento y acondicionamiento acústico.

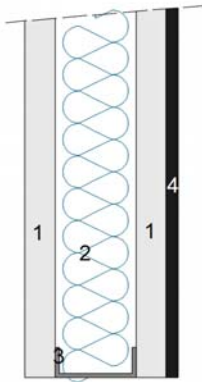
Al igual que se mencionó anteriormente en la cámara de transmisión de tamaño reducido, el aislamiento acústico de las paredes que conforman el recinto a estudio es fundamental en el diseño del mismo. Un aislamiento acústico adecuado supondrá un bajo nivel de ruido de fondo en el interior de la cámara y no influirán, sobre las medidas realizadas, los ruidos procedentes del exterior.

Respecto al acondicionamiento acústico, debe tenerse en cuenta que el interior de la cámara a estudio debe estar compuesta por superficies lo más reflectantes posible para conseguir tiempos de reverberación elevados.

Tras la realización de un estudio detallado de posibles materiales a emplear para la construcción de la cámara, (Arrebola, F. et al., 2011 Alba, J. et al., 2012b) se opta por utilizar un sistema compuesto por placas de yeso laminado y material absorbente, como solución de aislamiento acústico y un recubrimiento a base de composite de aluminio (Alucobond ®) de 6mm de espesor como solución de acondicionamiento acústico.

La Figura 4.4 muestra algunos detalles del proceso de construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido y la Figura 4.3 muestra un detalle de la solución constructiva empleada para paredes, suelo y techo.

Por otro lado, ante la necesidad de que la cámara reverberante fuera móvil, se colocaron unas ruedas anti-vibraciones con el fin de evitar la transmisión de cualquier tipo de ruido al interior por medio de la estructura de la cámara. Para la colocación de estas ruedas, se utilizaron tableros de madera de DM de 200x200mm con un espesor de 20mm, atornillados a la estructura. El acceso al interior de la cámara se realiza mediante una compuerta que se ubicó en el techo de la misma.



1. Placa de yeso laminado de 15mm de espesor.
2. Núcleo absorbente de 40mm de fibras termofusionadas. Poliéster reciclado (PET).
3. Perfilería metálica.
4. Composite de aluminio con núcleo de alta densidad (Alucobond®).

Figura 4.3. Solución constructiva de paredes, suelo y techo de la cámara reverberante de tamaño reducido.





FUENTE: (Arrebola, F. et al., 2011; Alba J. et al, 2012b)

Figura 4.4. Detalles de construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido.

Primeros resultados.

Una vez construida la cámara reverberante de tamaño reducido se procedió a realizar los primeros ensayos de coeficiente de absorción de determinados materiales y composiciones de barreras acústicas. (Arrebola, F. et al., 2011; Alba, J. et al 2012b). Concretamente, se estudiaron 5 configuraciones de barreras acústicas con núcleo absorbente y perforación de distinto diámetro y 3 configuraciones de material absorbente de 40mm de espesor y distintas densidades.

El procedimiento de ensayo siguió las especificaciones establecidas en la Norma UNE-EN ISO 354:2004. No obstante, no se comprobó previamente la uniformidad del campo sonoro y el grado de difusión en el interior de la cámara, no se evaluó la distribución óptima de las posiciones de micrófono⁵ para realizar los ensayos y no se definió la frecuencia de corte de la cámara. Además, no se disponen paneles difusores en el interior de la cámara, factor imprescindible, tal y como veremos más adelante, para mejorar la difusión en el interior de un recinto.

Las curvas de absorción sonora obtenidas para cada configuración o material estudiado presentaron excesivas irregularidades, sobre todo en el caso de barreras acústicas donde no se percibe con claridad el comportamiento de absorción sonora de cada una de ellas.

En el Gráfico 4.1. se puede ver, a modo de ejemplo, las curvas de absorción obtenidas para dos de las ocho configuraciones estudiadas. El resto de resultados se pueden consultar en (Arrebola, F. et al., 2011).

⁵ Las mejores posiciones de micrófono para realizar los ensayos serán aquellas en las que se minimice la desviación, entre puntos de medida, del nivel de presión sonora registrado en cada una de ellas.

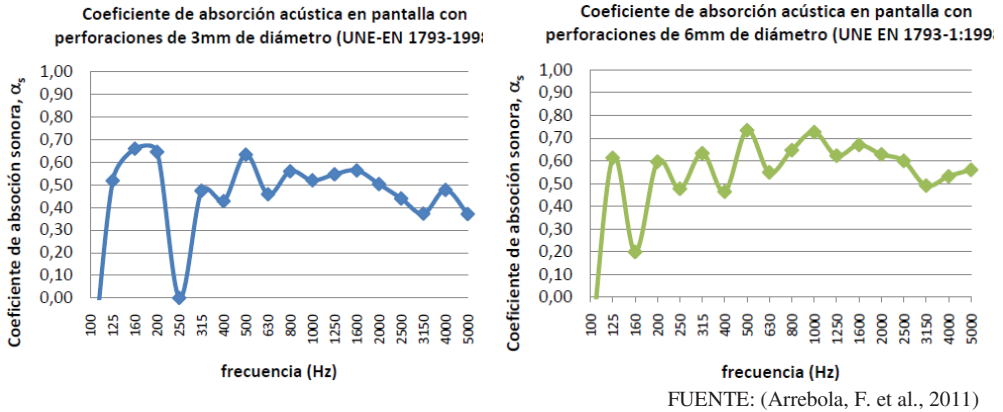


Gráfico 4.1. Coeficiente de absorción sonora para configuraciones evaluadas durante los primeros ensayos realizados en la cámara reverberante de tamaño reducido.

Tras este estudio previo, se plantea, y es objetivo de este trabajo de Tesis, una evaluación acústica detallada de la cámara reverberante de tamaño reducido construida en 2011.

Para ello se tendrán en cuenta aspectos tales como la uniformidad del campo sonoro en el interior de la cámara, el tiempo de reverberación y el área de absorción sonora equivalente, la implementación de mejoras que optimizarán las condiciones de trabajo y minimizarán errores que se puedan producir durante los ensayos, la inclusión de paneles difusores, el estudio y definición de la frecuencia de corte del recinto y otros aspectos que se verán en apartados posteriores del presente capítulo de Tesis.

Todos estos aspectos darán como resultado una validación robusta de la cámara reverberante de tamaño reducido para poder ser utilizada como pequeño laboratorio en el que ensayar con fiabilidad, a medias y altas frecuencias, el coeficiente de absorción de diferentes materiales, ecomateriales y prototipos de barreras acústicas.

4.3. Evaluación del estado inicial de la cámara reverberante de tamaño reducido.

En este apartado se evalúan aspectos geométricos de la cámara, se realiza un estudio de la distribución de niveles de presión sonora que definirá la ubicación de las posiciones de micrófono para realizar los ensayos, se evalúa el tiempo de reverberación y área de absorción en el interior de la cámara. También se atiende a términos que evalúan la frecuencia de corte de la cámara en estado inicial.

4.3.1. Geometría y propiedades físicas.

El primer paso para llevar a cabo la validación de la cámara reverberante de tamaño reducido, se centra en la geometría de la misma, comprobando que las dimensiones construidas coinciden con las que se plantearon en diseño.

Tabla 4.1. Comparación de dimensiones planteadas en diseño y dimensiones reales tras la construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido.

	En diseño	En construcción
Volumen (m^3)	1.32	1.12
Superficie total (m^2)	7.87	6.74

Excepto pequeñas diferencias, se ajusta el dimensionado en construcción al dimensionado de diseño, quedando la geometría tal y como se muestra en la Figura 4.5

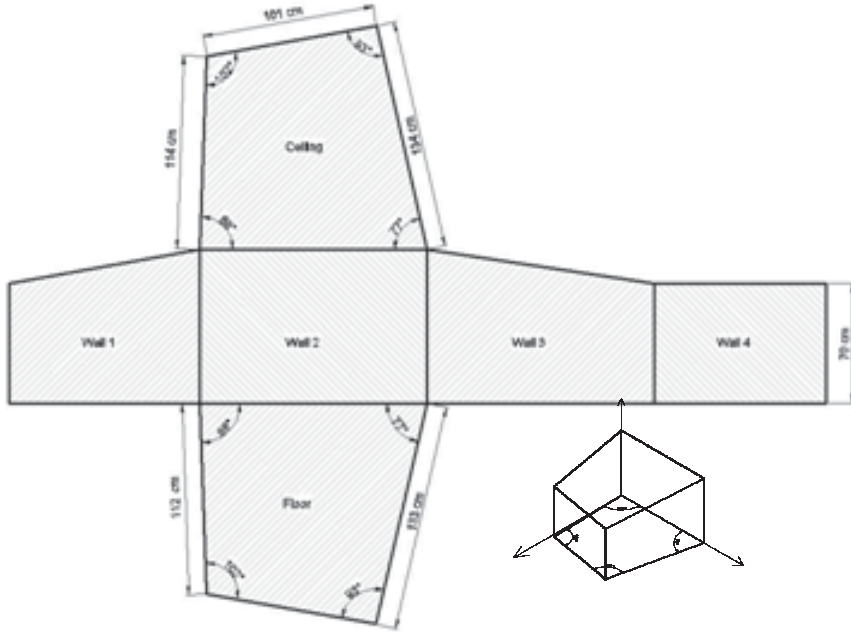


Figura 4.5. Geometría y dimensiones interiores de la cámara reverberante de tamaño reducido una vez construida.

Las paredes que conforman la cámara están ejecutadas a base de placa de yeso laminado. Las conexiones a la instrumentación utilizada para realizar los ensayos se realizan a través de un pasa-cables y el acceso al interior de la cámara es mediante la compuerta situada en el techo de la misma.

4.3.2. Posiciones de micrófono, fuente y muestra.

Las mediciones de absorción sonora que se llevarán a cabo en este laboratorio de tamaño reducido, se realizarán, bajo ciertas limitaciones, en base a las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004). Esta norma detalla en su apartado 7.1.2. las distancias de separación mínima entre posiciones de micrófono y respecto a cualquier fuente sonora o superficie de la cámara y en su apartado 7.1.4. especifica el número de posiciones de micrófono y altavoz que se deben emplear para realizar los ensayos.

Tal y como se comenta en el apartado 4.1, para la construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido se aplica un factor de escalado de 1:6 respecto al tamaño de la cámara reverberante estandarizada de la EPSG, por tanto, aplicaremos el mismo

factor de escalado a las distancias mínimas exigidas por la norma. Estas distancias son las que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Distancia de separación mínima entre posiciones fijas de micrófono

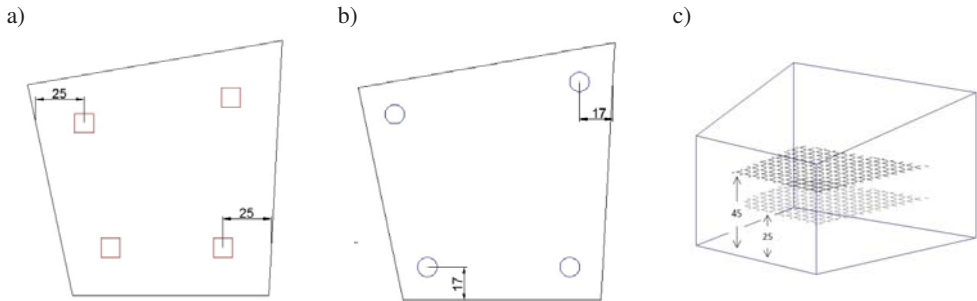
Separación entre	Distancia (m) de acuerdo con Norma UNE-EN ISO 354:2004.	Distancia (m) escaladas a tamaño de cámara reverberante de tamaño reducido.
Micrófono - micrófono	1.0	0.17
Micrófono – límites del recinto	1.0	0.17
Micrófono – panel difusor	1.0	0.17
Micrófono – elemento a ensayo	1.0	0.17
Micrófono – fuente sonora	2.0	0.33
Fuente sonora – fuente sonora	3.0	0.50
Elemento a ensayos - límites del recinto	0.75 (1.0)	0.13 (0.17)

Por otra parte, la superficie de la muestra a ensayo en cámara reverberante de tamaño reducido, debe estar comprendida entre 0.28m^2 y 0.33m^2 . La idea es trabajar con muestras de tamaño reducido, aplicando el mismo factor que se ha aplicado en el diseño de la cámara. Esto no significa “escalar” la muestra, ya que sus propiedades físicas o su volumen no son escalables, sino trabajar con muestras de tamaño reducido. Las muestras a ensayo en este trabajo se fijan en 0.3m^2 ($0.6\text{m} \times 0.5\text{m}$).

Distribución de los puntos de medida o posiciones de micrófono.

En una primera evaluación del estado inicial de la cámara reverberante de tamaño reducido, se realiza un ensayo de niveles de presión sonora en diferentes puntos y a diferentes alturas (a 0.25m y a 0.45m respecto al suelo), con la finalidad de evaluar el campo sonoro y seleccionar las posiciones de micrófono fijas más adecuadas para la realización de los ensayos, es decir, aquellas en que la desviación en el nivel de presión sonora registrado entre posiciones de micrófono se minimice. Se definen cuatro posiciones de fuente y tres posiciones de micrófono por cada posición de fuente, dando un total de 12 posiciones de micrófono. Las posiciones de fuente se ubican en las esquinas de la cámara, ya que es la mejor situación para excitar todos los modos de un sala (Villarroya González, C.H. et al., 1985).

La Figura 4.6 muestra un detalle de las posiciones de micrófono y fuente para la toma de registros de nivel de presión sonora en el interior de la pequeña cámara reverberante.



FUENTE: (Teira-Arnoso, A. et al., 2013)

Figura 4.6. Ubicación de posiciones de fuente (a), micrófono (b) y diferentes alturas respecto al suelo en las que se sitúan las posiciones de micrófono

Niveles de presión sonora en estado inicial.

Una vez distribuidas las posiciones de fuente y micrófono en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido, se pasa al registro, en cada una de estas posiciones, del nivel de presión sonora en bandas de tercio de octava desde 100Hz hasta 10KHz cuando se excita el recinto con un ruido rosa.

En el Gráfico 4.2 y el Gráfico 4.4 se puede ver los resultados obtenidos para ambas alturas, a 0.25m y a 0.45m respecto del suelo y en el Gráfico 4.3 y Gráfico 4.5 se puede ver la desviación entre puntos de medida para cada caso y en cada banda de tercio de octava desde 100Hz hasta 10KHz.

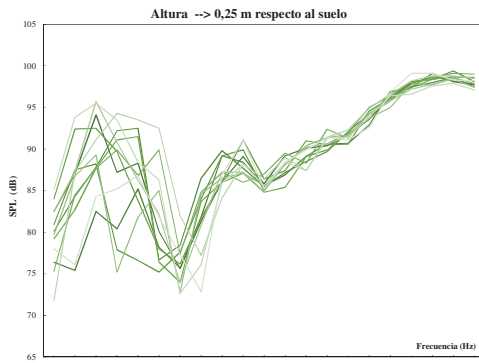


Gráfico 4.2. SPL en 12 posiciones de

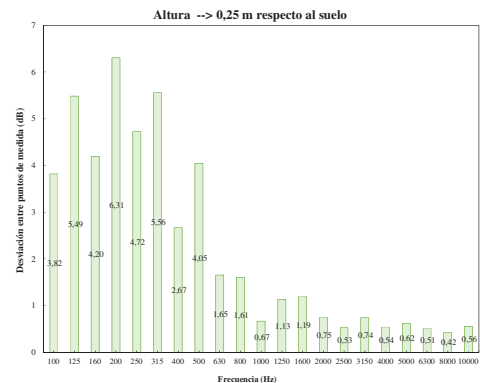


Gráfico 4.3. Desviación entre puntos de

micrófono situadas a 0.25m del suelo.

medida para posiciones de micrófono a 0.25m del suelo.

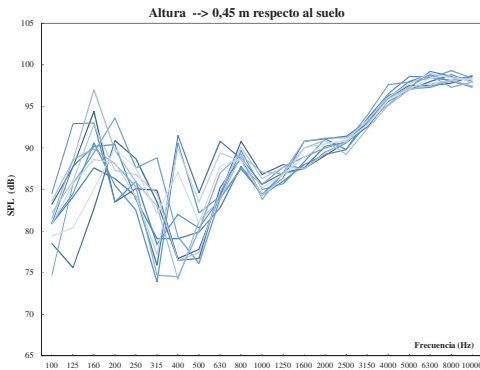


Gráfico 4.4. SPL en 12 posiciones de micrófono situadas a 0.25m del suelo.

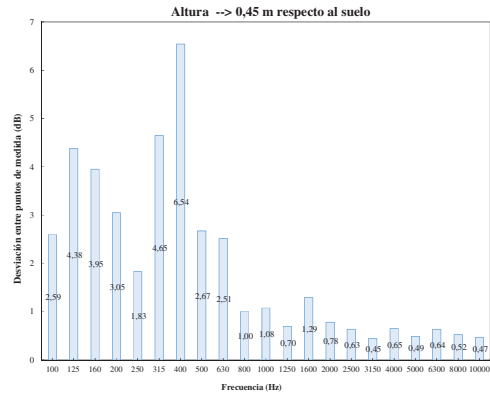


Gráfico 4.5. Desviación entre puntos de medida para posiciones de micrófono a 0.45m del suelo.

Podemos observar que a ambas alturas, sobre todo por debajo de 800Hz, los niveles de presión sonora muestran una elevada desviación típica entre puntos de medida. En el rango de media frecuencia entre 800Hz y 1600Hz las diferencias se reducen y es a partir de esta banda cuando nos encontramos con niveles medianamente uniformes.

Esta elevada desviación a frecuencias bajas está relacionada con la falta de uniformidad del campo sonoro, es decir, con la falta de difusión en ese rango de frecuencias y todo ello, como veremos más adelante, queda definido por la frecuencia de corte de la cámara.

Se decide, en vistas de la similitud de los resultados obtenidos a ambas alturas, colocar los puntos de recepción a 25 cm.

4.3.3. Tiempo de reverberación y área de absorción equivalente.

Con las posiciones de fuente y micrófono definidas, se pasa a evaluar el tiempo de reverberación en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido.

El tiempo de reverberación es el parámetro a partir del cual se obtendrá posteriormente el coeficiente de absorción sonora del elemento a ensayo. Este parámetro nos permite conocer el área de absorción sonora de la cámara y la frecuencia de corte a partir de la cual dejan de dominar los modos propios del recinto y el campo sonoro se considera difuso.

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de realizar cualquier medición en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido, son las condiciones de temperatura y humedad relativa. Si se perciben cambios significativos durante la realización de una medición, el tiempo de reverberación puede sufrir variaciones importantes, especialmente a frecuencias altas, y esto deriva en resultados dudosos.

En las mediciones de tiempo de reverberación durante la evaluación inicial de la pequeña cámara reverberante, los valores de temperatura y humedad relativa se mantienen constantes y dentro de los indicados en la norma (UNE-EN ISO 354:2004).

En el Gráfico 4.6 se muestra el tiempo de reverberación promedio de las doce posiciones de micrófono seleccionadas.

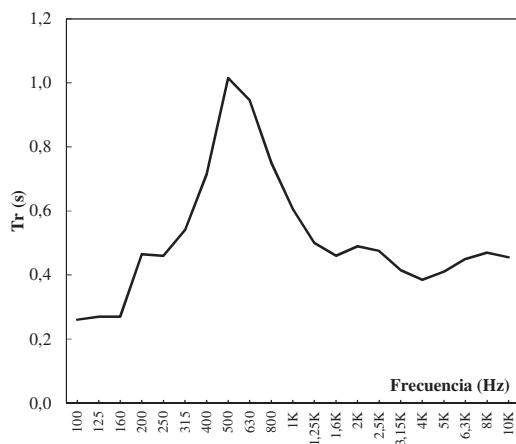


Gráfico 4.6. Tiempo de reverberación en cámara vacía en fase de evaluación inicial de la cámara.

A partir del tiempo de reverberación (T) se puede obtener el área de absorción sonora equivalente (A) (en m²) de la cámara reverberante vacía, ver ecuación 4.1 y Gráfico 4.7. De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004) este

parámetro debe mantenerse dentro de unos límites máximos y la curva debe ser plana, sin presentar baches ni picos que difieran más del 15% de la media de los valores de los tercios de octava contiguos.

$$A = \frac{55.3 \times V}{c \times T} (m^2) \tag{4.1}$$

donde:

- V es el volumen de la cámara reverberante de tamaño reducido, m³
- c es la velocidad de propagación del sonido en el aire, m/s
- T es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara vacía

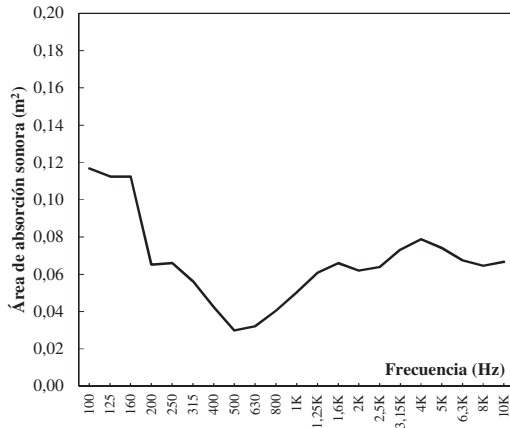


Gráfico 4.7. Área de absorción sonora de la cámara reverberante vacía.

En la Tabla 4.3 se puede ver el área de absorción sonora equivalente que propone la norma como valor máximo (UNE-EN ISO 354:2004), este mismo valor ajustado al tamaño de la cámara reverberante a estudio y la desviación de la media de los valores de los dos tercios de octava contiguos.

Tabla 4.3. Área de absorción sonora equivalente según Norma, escalado a un volumen de 1.12m³ y uniformidad de la curva por medio del valor “diferencia”

f(Hz)	Área Absorción Sonora máxima (m ²) para V=200 m ³	Área Absorción Sonora máxima (m ²) corregido a V=1.12 m ³	Área Absorción Sonora Equivalente (m ²).“in situ”	Diferencia
100	6.5	0.18	0.11	-
125	6.5	0.20	0.12	1.9%
160	6.5	0.20	0.11	21.0%
200	6.5	0.20	0.11	21.3%
250	6.5	0.20	0.07	7.9%
315	6.5	0.20	0.07	3.0%
400	6.5	0.20	0.06	1.1%
500	6.5	0.20	0.04	17.4%
630	6.5	0.20	0.03	7.6%
800	6.5	0.20	0.03	1.3%
1000	7.0	0.22	0.04	0.7%
1250	7.5	0.24	0.05	4.0%
1600	8.0	0.25	0.06	7.1%
2000	9.5	0.30	0.07	4.5%
2500	10.5	0.33	0.06	5.0%
3150	12.0	0.38	0.06	2.2%
4000	13.0	0.41	0.07	6.7%
5000	14.0	0.44	0.08	-

Desviaciones superiores al 15%

Se observa en la Tabla 4.3 que para ninguna frecuencia de 100Hz a 5KHz se supera el valor del área de absorción equivalente definida para un volumen de 1.12m³. No obstante, existen desviaciones superiores al 15% en las bandas de 160Hz, 200Hz y 500Hz respecto a la media de los valores de las bandas de tercio de octava contiguas en cada caso. Esto supone que aparezcan vientre o picos en la curva del área de absorción sonora de la cámara.

4.3.4. Frecuencia de corte.

Tal y como se definió al evaluar la difusividad de campo sonoro en la cámara de transmisión de tamaño reducido, apartado 3.5.1, cualquier recinto cuenta con una frecuencia de corte a partir de la cual los modos propios no suponen una variación de la respuesta frecuencial de la sala.

Así pues, de la misma forma que en la cámara de transmisión (apartado 3.5.1.1. del presente trabajo de Tesis), se obtiene la frecuencia de corte de la cámara reverberante de tamaño reducido.

En la Tabla 4. 4 y Gráfico 4.6 se muestra el tiempo de reverberación medido (T₆₀) en el interior de la cámara reverberante a estudio, en fase inicial. Recordemos que el volumen de la misma es de 1.12m³.

Tabla 4. 4. Tiempo de reverberación en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido. Evaluación en Estado Inicial

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
RT (s)	0.26	0.27	0.26	0.45	0.46	0.54	0.73	1.01	0.94	0.74
Frecuencia (Hz)	1000	1250	1600	2000	25000	3150	4000	5000		
RT (s)	0.61	0.50	0.46	0.49	0.47	0.41	0.38	0.41		

Aplicando la ecuación (3.2) a cada banda de tercio de octava, y calculando el valor promedio, la frecuencia de corte de nuestro recinto se establece en 1365.31Hz, no obstante, mediante la revisión de la frecuencia de Schroeder por parte de Skålevik (Skålevik, M. et al., 2011), podemos establecer la frecuencia de corte entorno a 615Hz.

Por debajo de 615Hz, nos encontraremos en una región modal donde dominan los modos propios del recinto.

Es decir, los resultados obtenidos en esta cámara reverberante de tamaño reducido, por debajo de 615Hz deben evaluarse con cuidado.

4.4. Ensayos en estado inicial y comparativa con ensayos realizados en cámara reverberante normalizada.

Una vez evaluado el estado inicial de la cámara reverberante de tamaño reducido, comprobadas sus dimensiones, establecidas las posiciones de fuente y micrófono más apropiadas y definida la frecuencia de corte, se pasa a la evaluación en el estado inicial de determinados materiales, evaluando el coeficiente de absorción sonora de cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos se comparan con resultados en cámara reverberante estandarizada. Las diferencias entre ambos, para cada material, nos darán una idea de la fiabilidad de los resultados obtenidos en la cámara reverberante de tamaño reducido y su pondrán el punto de partida de las mejoras a implementar.

4.4.1. Método de ensayo y materiales a evaluar.

En la Figura 4.7 se puede ver un esquema sencillo del conexionado y equipo empleado durante las mediciones y en la Figura 4.8 una imagen tomada del interior de la cámara durante uno de los ensayos de coeficiente de absorción sonora en el estado inicial de la cámara.

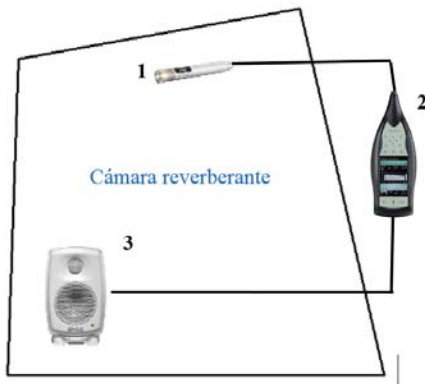


Figura 4.7. 1- micrófono 4189; 2- sonómetro 2250; 3-Altavoz Genelec 8030A



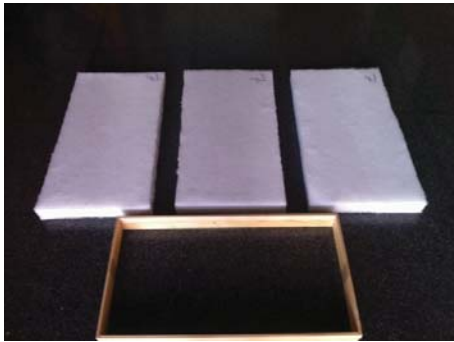
Figura 4.8. Interior de la cámara reverberante de tamaño reducido durante los ensayos

Los materiales a ensayar son básicamente de dos tipos, lana de roca y lana de poliéster reciclada (PET). En la Tabla 4.5 se enumera cada uno de ellos y sus características principales.

Tabla 4.5. Lista y características de materiales a ensayo

Nombre del material	Tipo	Gramaje (g/m ²)	Densidad (Kg/m ³)	Espesor (mm)
I 400/40	PET	400	10	40
I 400/30	PET	400	13	30
I 300/20	PET	300	15	20
I 600/30	PET	600	20	30
I 1400/70	PET	1400	20	70
I 700/25	PET	700	28	25
Lana de Roca/40	Lana de roca	1200	30	40
Lana de Roca/80	Lana de roca	2400	30	80

Se preparan 3 muestras de cada material y se cubre el borde con un perímetro, según indicaciones de la norma (UNE-EN ISO 354:2004). El perímetro se construye en madera debido a su bajo coste y fácil manipulación. El aspecto de las probetas a ensayar, para uno de los materiales a estudio se ilustra en la Figura 4.9.



FUENTE: (Teira-Arnoso, A. et al., 2013)

Figura 4.9. A la izquierda ejemplo de las tres muestras de uno de los materiales a ensayo y su correspondiente perímetro y a la derecha muestra y perímetro preparada para ensayar.

4.4.2. Resultados en estado inicial de caracterización de la cámara.

En el Gráfico 4.8 al Gráfico 4.15 se pueden ver los valores que se obtienen del coeficiente de absorción en cámara reverberante estandarizada (línea continua) y los valores que se obtienen en la cámara reverberante de tamaño reducido (línea discontinua) para cada uno de los materiales ensayados.

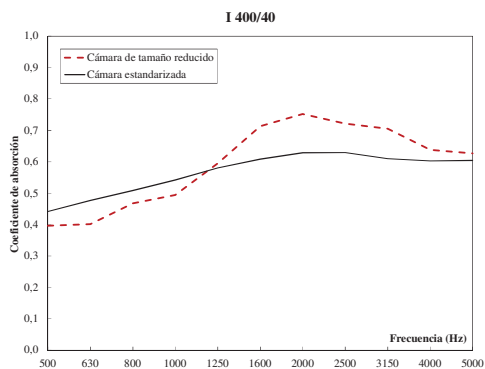


Gráfico 4.8. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 400/40)

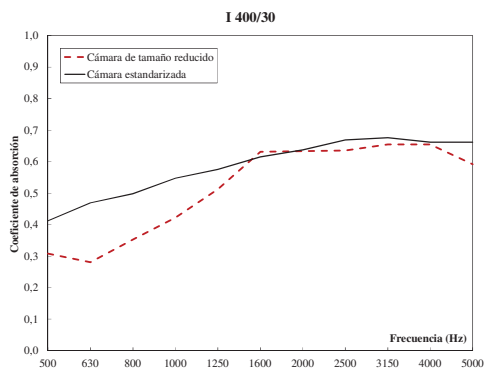


Gráfico 4.9. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 400/30)

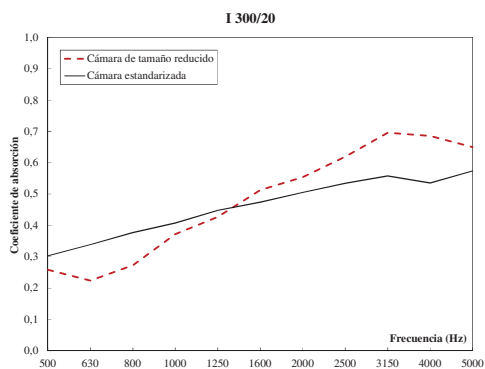


Gráfico 4.10. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 300/20)

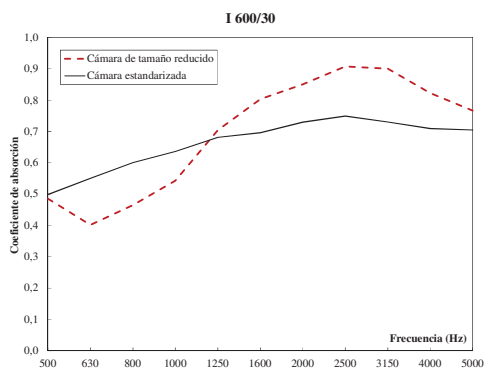


Gráfico 4.11. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 600/30)

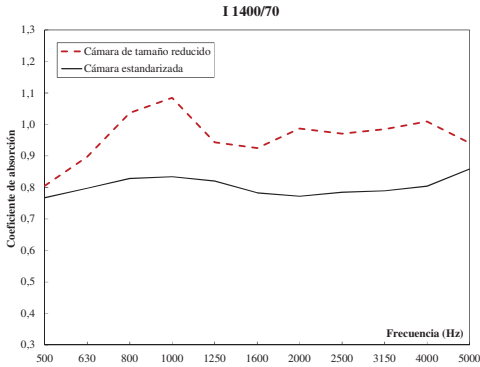


Gráfico 4.12. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 1400/70)

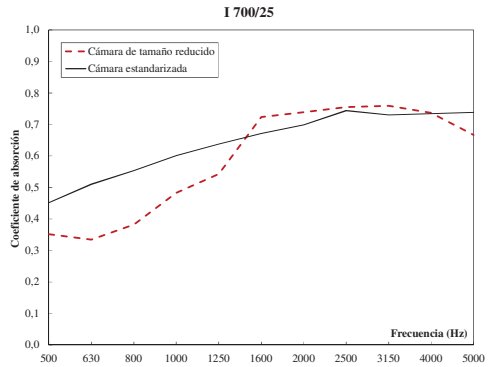


Gráfico 4.13. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 700/25)

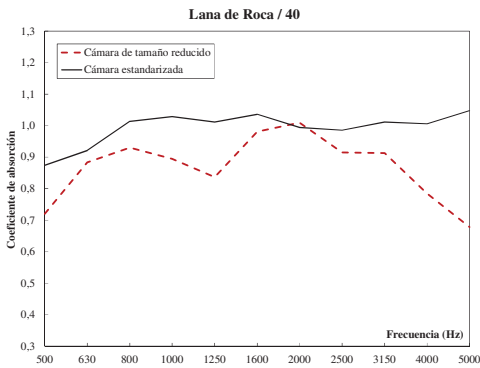


Gráfico 4.14. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (Lana de Roca/40)

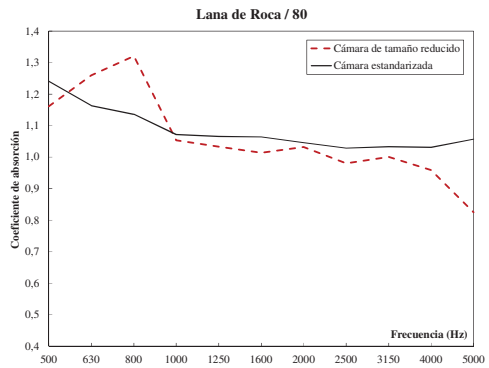


Gráfico 4.15. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (Lana de Roca/80)

Puesto que, como hemos visto anteriormente, la frecuencia de corte de la cámara en estado inicial está entorno a 614Hz, los resultados obtenidos se presentan a partir de, aproximadamente, esta frecuencia. Los resultados obtenidos (Gráfico 4.8 a Gráfico 4.15) presentan desviaciones respecto a los que se obtuvieron en cámara reverberante normalizada. En el caso de los materiales PET, el coeficiente de absorción hasta 1000Hz o 1500Hz está por debajo de lo que debería obtenerse y a partir de esta banda comienza a aumentar superando, en algunos casos, el coeficiente de absorción medido en cámara estandarizada. No obstante, este comportamiento no se repite con el PET I 1400/70, cuya absorción siempre está muy por encima de los valores estandarizados. Con las lanas de roca se observa un comportamiento diferente, mostrando un coeficiente de absorción por debajo de lo esperado para, prácticamente, todo el rango de frecuencias.

A pesar de esto, el patrón definido por los materiales estudiados es similar al patrón obtenido de ensayos estandarizados, aun así, se pone de manifiesto la necesidad de aplicar mejoras en la cámara reverberante de tamaño reducido. La finalidad de estas mejoras es obtener resultados de absorción sonora más afines los estandarizados.

4.5. Propuestas de mejora.

Al igual que hemos visto en la cámara de transmisión de tamaño reducido, en un laboratorio de ensayo es necesario trabajar bajo condiciones controladas, en un espacio cómodo y, en determinados casos, utilizando un sistema automatizado que facilite el trabajo y minimice errores, tiempos de ensayos y esfuerzos.

Tras la evaluación del estado inicial de la cámara reverberante de tamaño reducido y la realización de los primeros ensayos de validación, nos enfrentamos a diversas dificultades a la hora de trabajar en este pequeño laboratorio.

Por una parte, al llevar a cabo los ensayos, nos encontramos con la necesidad de acceder al interior de la cámara cada vez que tenemos que cambiar la posición de micrófono o fuente. Al disponer de la puerta de acceso en la parte superior del recinto, la realización de cada ensayo se hace muy laboriosa y costosa en esfuerzo físico y tiempo. Además, se añade el inconveniente de tener que mover la muestra cada vez que cambiamos la posición de la fuente, pudiendo modificar de esta forma las condiciones del ensayo. Es por esto que se considera fundamental instalar un sistema automatizado que nos permita, desde el exterior de la cámara reverberante, mover el micrófono de una posición a otra, sin necesidad de tener que acceder cada vez al interior de la misma.

Por otra parte, las desviaciones que se observan entre los valores de la absorción medidos y normalizados, así como las desviaciones del nivel de presión sonora entre posiciones de micrófono (Gráfico 4.3 y Gráfico 4.5), suponen la necesidad de aplicar alguna actuación que mejore la difusividad del campo sonoro.

Para ello, se dotará a la cámara reverberante de tamaño reducido de paneles difusores. Estos elementos deberían mejorar la difusividad del campo sonoro y, en consecuencia, modificar la curva de absorción sonora de los materiales ensayados adecuándola a los resultados obtenidos en una cámara reverberante estandarizada. Esta medida de mejora se recoge en el Anexo A de la Norma UNE-EN ISO 354:2004 y ya se llevó a cabo en la cámara reverberante estandarizada de la EPSG, mediante un Trabajo Final de Máster (Hernández García F. et al., 2012), con exitoso resultado, lo que nos sirve como referencia para aplicarla en nuestro trabajo.

4.5.1. Automatización del movimiento de micrófono durante los ensayos.

La automatización de movimiento entre posiciones de micrófono se lleva a cabo mediante la introducción de una webcam Aqprox modelo IP01WV4 controlada por IP, con motor rotatorio incorporado, atornillada al techo de la cámara reverberante de tamaño reducido. A esta webcam se le acopla un tubo de PVC de 10mm de diámetro y 450mm de longitud, portando interiormente en su extremo el micrófono y su preamplificador.

Conectándonos on-line a la IP de nuestra webcam, podemos observar desde cualquier explorador, a tiempo real, el interior de la cámara reverberante y la posición de micrófono en la que nos encontramos, ya que éste se desplaza simultáneamente con el giro de la webcam. En la Figura 4.10 se puede ver un detalle de la webcam empleada en este caso (igual a las empleadas para la cámara de transmisión de tamaño reducido).

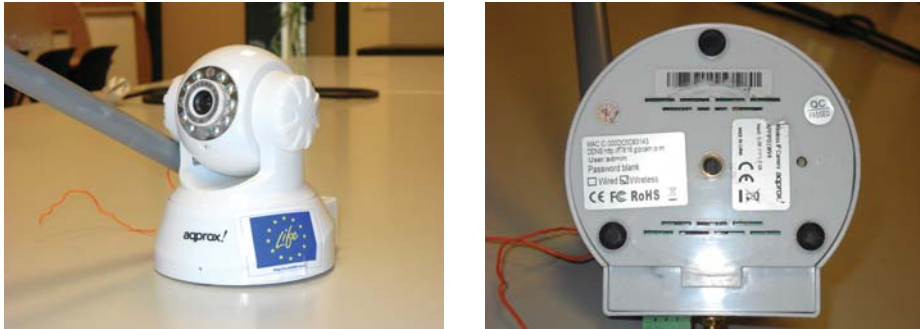


Figura 4.10. Cámara de vigilancia controlada por IP.

Además, se definen dos posiciones de fuente fijas, donde se sitúan dos altavoces Genelec modelo 6010A de unas dimensiones inferiores a las de la fuente emisora utilizada con anterioridad, pero con características casi idénticas en cuanto a respuesta en frecuencia y directividad. De esta forma evitamos el desplazamiento de los emisores que debería realizarse de forma manual, accediendo para ello al interior del recinto. En la Figura 4.11 se puede ver un detalle del interior de la cámara reverberante de tamaño reducido con el sistema automatizado y los emisores fijos instalados y en la Figura 4.12 se puede ver una captura del software que nos permite controlar la webcam desde el exterior de la cámara reverberante.



Figura 4.11. Interior de la cámara reverberante con sistema automatizado y emisores fijos instalados.

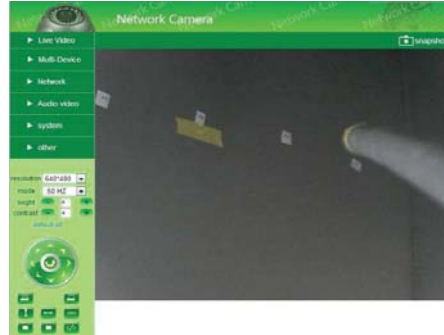


Figura 4.12. Software de la webcam para controlar el posicionamiento de micrófono desde el exterior de la cámara reverberante.

Al introducir el sistema automatizado para la realización de los ensayos, se modifican las posiciones de fuente y micrófono respecto a los estudios realizados en el estado inicial. Manteniendo en todo momento las distancias mínimas especificadas en la Tabla 4.2, se define un total de 39 posiciones de micrófono para cada una de las dos posiciones de altavoz. Se evalúa el nivel de presión sonora en cada una de ellas y se seleccionan aquellas en las que el nivel de presión sonora registrado minimice la desviación típica entre posiciones.

En el Anexo 1, tabla A.1.9. a tabla A1.14., se pueden ver los resultados de nivel de presión sonora obtenidos para cada una de las 39 posiciones de micrófono evaluadas para cada posición de altavoz.

De las 78 posiciones de micrófono estudiadas, se fijan 6 posiciones de micrófono para cada posición de fuente fija tal y como se ilustra en la Figura 4.13.



Figura 4.13. Posiciones de micrófono fijas para la realización de los ensayos tras la incorporación en el interior de la cámara de un sistema automatizado de movimiento de micrófono.

Los valores de desviación típica entre posiciones de micrófono, para cada una de las posiciones de fuente, se recogen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Desviación entre posiciones de micrófono fijas, para cada posición de fuente.

Frecuencia (Hz)	Desviación entre posiciones de micrófono para posición de Fuente 1	Desviación entre posiciones de micrófono para posición de Fuente 2
100	2.0	3.9
125	4.4	5.7
160	5.2	1.9
200	4.5	4.4
250	2.0	2.5
315	4.3	5.2
400	3.9	5.9
500	1.9	2.1
630	0.9	1.0
800	1.4	1.5
1000	1.4	1.3
1250	1.1	1.2
1600	0.5	1.1
2000	0.8	0.8
2500	0.9	0.7
3150	0.8	0.4
4000	0.8	0.4
5000	0.4	0.4
6300	0.2	0.5
8000	0.6	0.3
10000	0.5	0.3

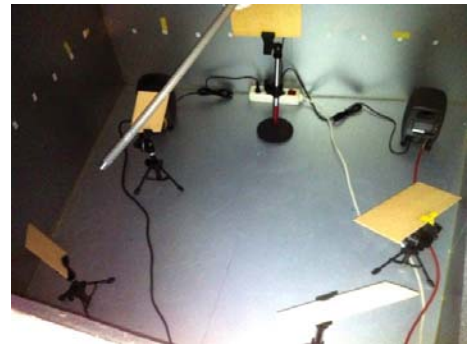
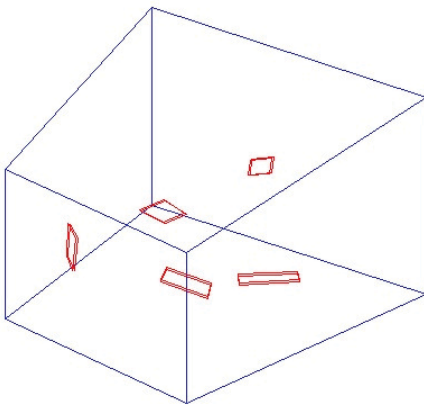
Podemos ver que las mayores desviaciones se dan por debajo de los 630Hz. Estos datos coinciden con la frecuencia de corte de la cámara, que habíamos fijado en 614Hz. Por debajo de esta frecuencia la densidad de modos propios del recinto disminuye y, por tanto, la falta de uniformidad del campo sonoro aumenta.

Como hemos comentado anteriormente, la solución a esta falta de uniformidad del campo sonoro, o falta de difusividad en el recinto, pasa por la introducción de paneles difusores colocados aleatoriamente de forma uniforme en todo el volumen del recinto a estudio (UNE-EN ISO 354:2004; Hernández García F. et al., 2012).

4.5.2. Diseño y colocación de paneles difusores.

El Anexo A de la norma UNE EN ISO 354:2004 (UNE-EN ISO 354:2004) indica que para mejorar la difusividad del campo sonoro en una cámara reverberante se debe introducir entre un 15% y un 20% del área total de la cámara, de superficie de difusión. En la cámara reverberante de tamaño reducido esta proporción en área se traduce en márgenes entre 2.5% y 4.2%. Finalmente se introduce un 3.3% de la superficie total de la cámara, repartido en 5 paneles difusores cuyas superficies oscilan entre 0.028m^2 y 0.060m^2 .

En la Figura 4.14 se puede ver un croquis de la distribución de los paneles difusores y un detalle del interior de la cámara reverberante de tamaño reducido con los cinco paneles difusores instalados.



FUENTE (Teira-Arnoso, A. et al, 2013)

Figura 4.14. Distribución de los paneles difusores en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido.

4.6. Evaluación del efecto de la implementación de mejoras.

Aplicadas las medidas correctoras propuestas se realiza una evaluación del efecto que tienen sobre la difusividad del campo sonoro, el tiempo de reverberación y área de absorción equivalente y, en consecuencia, sobre la frecuencia de corte la cámara.

4.6.1. Sobre la difusividad del campo sonoro.

Una vez instalados los paneles difusores, se repite la medición del nivel de presión sonora en los puntos de medida seleccionados (Figura 4.13) y se calcula la desviación de los niveles de presión sonora entre posiciones de medida.

Con estas nuevas mediciones se procede a evaluar y comparar los resultados con los que se obtuvieron en el estado inicial. También se analiza si ha existido una mejora en la difusividad de la cámara a partir del estudio del parámetro denominado *Grado de difusión (Gd)*.

El Gráfico 4.16 representa las desviaciones en el nivel de presión sonora entre puntos de medida, antes (estado inicial) y después (estado final) de implantar las mejoras propuestas.

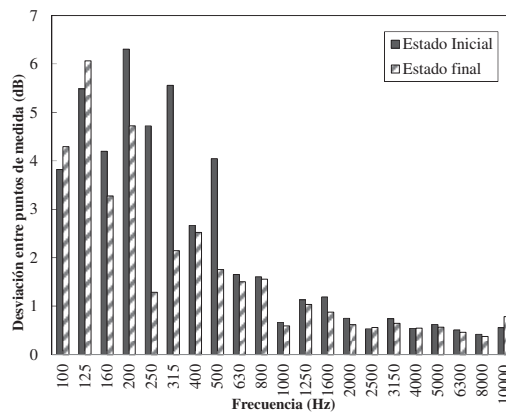


Gráfico 4.16. Desviaciones en el nivel de presión sonora entre puntos de medida, antes y después de la implantación de las mejoras propuestas.

Podemos apreciar una mejora significativa en la distribución de los niveles de presión sonora en el interior de la cámara, sobre todo a frecuencias bajas entre 160Hz y 630Hz. Esto demuestra que, al introducir los paneles difusores, mejora la homogeneidad del campo sonoro.

Ahora bien, para cuantificar la difusividad del campo sonoro utilizamos el parámetro denominado grado de difusión (Cremer, L. et al., 1982b), definido por la ecuación (4. 2). Cuanto más cerca de uno (Gd=1) más difuso es el campo sonoro, y cuanto más cerca de cero (Gd=0) más nos alejamos de dicha difusividad.

$$Gd = \left| 1 - \frac{|EDT - T_{20}|}{(EDT + T_{20}) / 2} \right| \quad (4. 2)$$

Este término relaciona los tiempos de caída más tempranos (EDT) con los de mayor duración (T20). Se ha calculado el grado de difusión en las condiciones iniciales y tras la implementación de las mejoras. Los resultados, que podemos ver representados en el Gráfico 4.17 y Tabla 4.7, nos muestran como, tras la implementación de mejoras, hemos incrementado la difusión en frecuencias medias y altas respecto a las condiciones iniciales, especialmente a 500Hz y a 1kHz, dos de las bandas más conflictivas. Por el contrario, hay frecuencias en las que existe una peor difusión respecto al estado inicial, pero de todos modos, el Gd se mantiene por encima de 0.89 en todas las bandas de frecuencia, lo que indica una buena difusión en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido para el rango de frecuencias especificado.

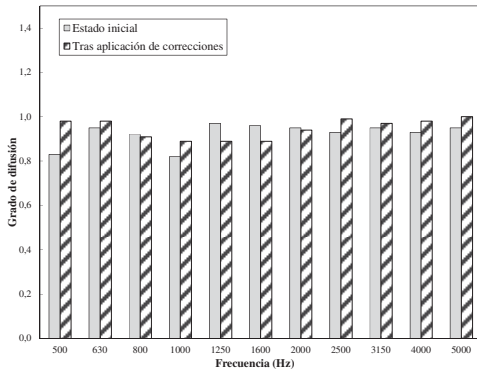


Gráfico 4.17. Grado de difusión antes y después de implementación de mejoras

Frecuencia (Hz)	Gd estado inicial	Gd tras aplicación de mejoras
500	0.83	0.98
630	0.95	0.98
800	0.92	0.91
1000	0.82	0.89
1250	0.97	0.89
1600	0.96	0.89
2000	0.95	0.94
2500	0.93	0.99
3150	0.95	0.97
4000	0.93	0.98
5000	0.95	1.00

Tabla 4.7. Valores numéricos referentes al Gráfico 4.17

4.6.2. Sobre el tiempo de reverberación y área de absorción sonora.

La introducción del sistema automatizado en el interior de la cámara y de los paneles difusores, también modificará el tiempo de reverberación y el área de absorción sonora en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido.

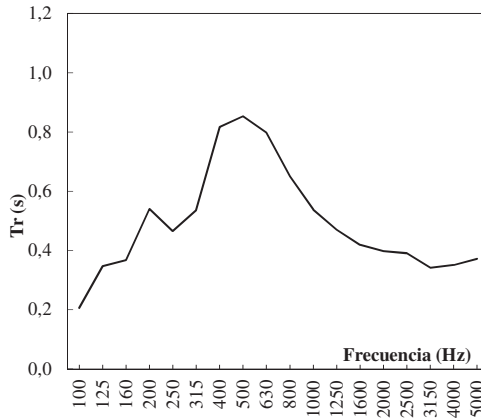


Gráfico 4.18. Tiempo de reverberación en cámara vacía tras la implantación de la cámara.

Al igual que se ha explicado en el apartado 4.3.3, a partir del tiempo de reverberación y haciendo uso de la ecuación (4. 1), obtenemos el área de absorción sonora equivalente (en m^2), tras la instalación de mejoras, de la cámara reverberante vacía, ver Gráfico 4.19.

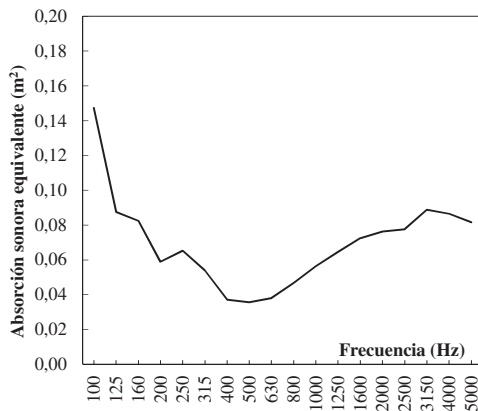


Gráfico 4.19. Área de absorción sonora equivalente de la cámara reverberante vacía, tras la implementación de mejoras.

En la Tabla 4.8 se puede ver el área de absorción sonora equivalente que propone la norma como valor máximo (UNE-EN ISO 354:2004), este mismo valor ajustado al tamaño de la cámara reverberante a estudio y la desviación de la media de los valores de los dos tercios de octava contiguos.

Tabla 4.8. Área de absorción sonora equivalente según Norma, escalado a un volumen de 1.12m³ y uniformidad de la curva por medio del valor “diferencia”

f(Hz)	Área Absorción Sonora máxima (m ²) para V=200 m ³	Área Absorción Sonora máxima (m ²) corregido a V=1.12 m ³	Área Absorción Sonora Equivalente (m ²), “in situ”	Diferencia
100	6.5	0.18	0.15	-
125	6.5	0.20	0.09	18.6%*
160	6.5	0.20	0.08	10.6%
200	6.5	0.20	0.06	18.1%*
250	6.5	0.20	0.07	13.5%
315	6.5	0.20	0.05	4.2%
400	6.5	0.20	0.04	14.1%
500	6.5	0.20	0.04	5.3%
630	6.5	0.20	0.04	6.6%
800	6.5	0.20	0.05	0.9%
1000	7.0	0.22	0.06	1.2%
1250	7.5	0.24	0.06	0.2%
1600	8.0	0.25	0.07	2.6%
2000	9.5	0.30	0.08	1.6%
2500	10.5	0.33	0.08	5.5%
3150	12.0	0.38	0.09	7.5%
4000	13.0	0.41	0.09	1.5%
5000	14.0	0.44	0.08	-

* **Desviaciones superiores al 15%**

De la misma forma que en la evaluación del estado inicial, una vez escalado el valor del área de absorción sonora equivalente a un volumen de 1.12m³, los resultados obtenidos están por debajo de dicho límite máximo. No obstante, en este caso, las desviaciones superiores al 15% se dan en las bandas de 125Hz y 200Hz respecto a la media de los valores de las bandas de tercio de octava contiguas en cada caso. Esto supone que los picos en la curva de absorción se desplazan a frecuencias más bajas, respecto al estado inicial, quedando una curva más plana a partir de 250Hz.

Consecuencias sobre la frecuencia de corte de la cámara.

El cambio en el tiempo de reverberación de la cámara tras la aplicación de mejoras, supone un cambio directo en la frecuencia de corte de la misma (ecuación 3.2)

En la Tabla 4.9 se muestra el tiempo de reverberación medido en el interior de la cámara reverberante a estudio, tras la implantación de mejoras. Recordemos que el volumen de la cámara es de 1.12m^3 .

Tabla 4.9. Tiempo de reverberación en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido. Evaluación tras la implantación de mejoras.

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
RT (s)	0.22	0.35	0.37	0.54	0.47	0.53	0.84	0.86	0.79	0.64
Frecuencia (Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000		
RT (s)	0.55	0.47	0.42	0.40	0.39	0.34	0.35	0.37		

Siguiendo el mismo procedimiento del apartado 4.3.4., establecemos la frecuencia de corte de nuestro recinto, tras la implementación de mejoras, entorno a 598Hz. Por debajo de esta frecuencia los resultados deben tratarse con cautela.

4.7. Ensayos en estado final y comparativa con ensayos realizados en cámara reverberante estandarizada.

Hasta este punto, y partiendo del estudio del estado inicial de la cámara reverberante de tamaño reducido, se han introducido una serie de correcciones que han derivado en una mejora de la difusividad del campo sonoro, una mayor uniformidad en los niveles de presión sonora registrados en los puntos de medición, una curva del área de absorción sonora equivalente más plana y una disminución de la frecuencia de corte del recinto. Además, se optimiza el tiempo y esfuerzo en la realización de cada ensayo, lo que supone resultados más precisos y un ahorro económico.

Para evaluar cómo afectan los cambios implantados en el resultado final del coeficiente de absorción sonora de un material, se deberán repetir las mediciones que se realizaron en el estado inicial de la cámara, para todos los materiales seleccionados inicialmente (Tabla 4.5.) y validar de esta forma el estado y las condiciones finales de la cámara reverberante de tamaño reducido.

En la Figura 4.15 se puede ver un detalle del interior de la cámara durante el ensayo de uno de los materiales seleccionados. Se aprecia cómo se encuentran instaladas todas las mejoras propuestas (paneles difusores, sistema automatizado de movimiento de micrófono y nuevos altavoces en posiciones fijas).



Figura 4.15. Interior de la cámara reverberante de tamaño reducido durante un ensayo, tras la aplicación de mejoras propuestas.

4.7.1. Resultados en estado Final.

En el Gráfico 4.20 al Gráfico 4.27 se representan los coeficientes de absorción sonora para cada uno de los materiales estudiados y se comparan con los obtenidos inicialmente y con los obtenidos en cámara reverberante estandarizada.

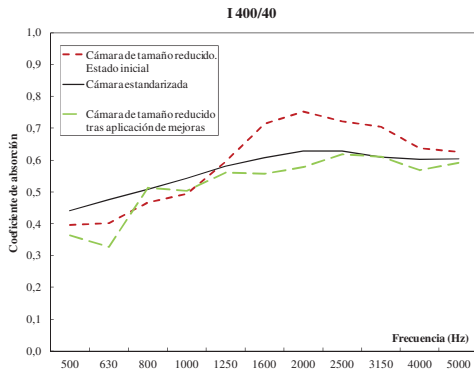


Gráfico 4.20. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 400/40)

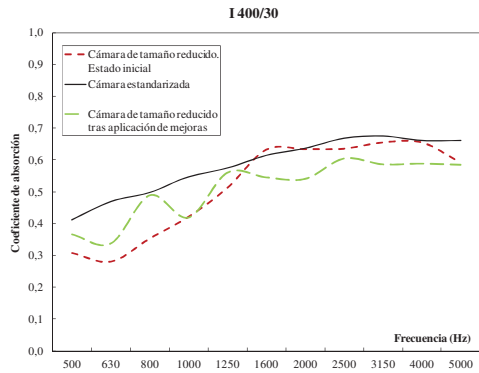


Gráfico 4.21. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 400/30)

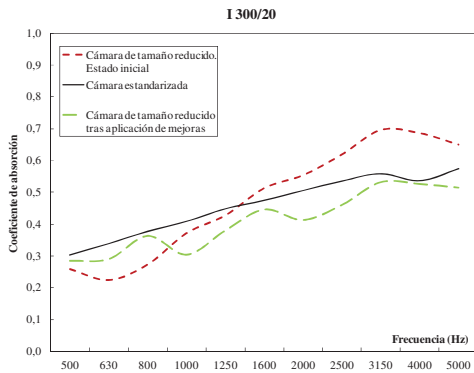


Gráfico 4.22. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 300/20)

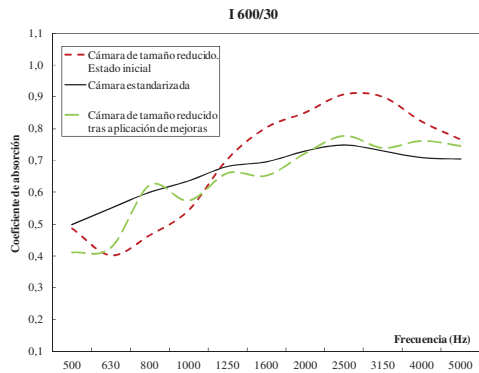


Gráfico 4.23. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 600/30)

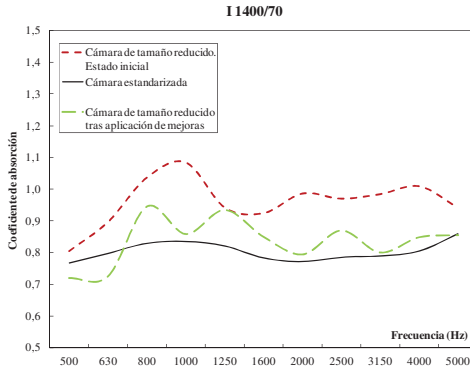


Gráfico 4.24. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 1400/70)

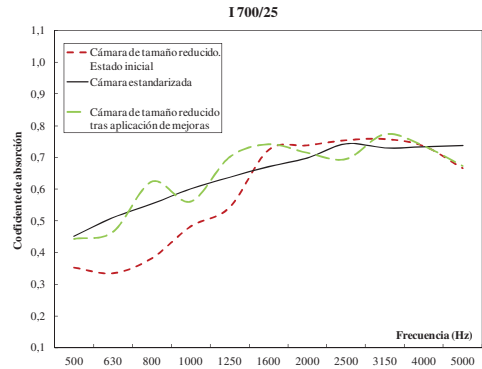


Gráfico 4.25. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 700/25)

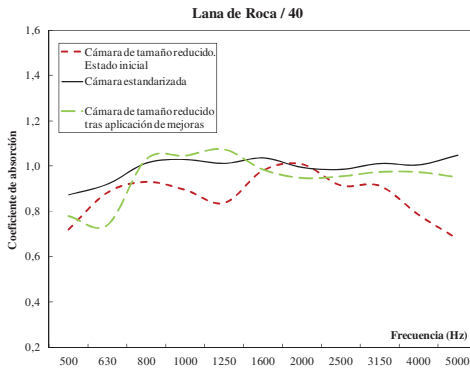


Gráfico 4.26. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (Lana de Roca/40)

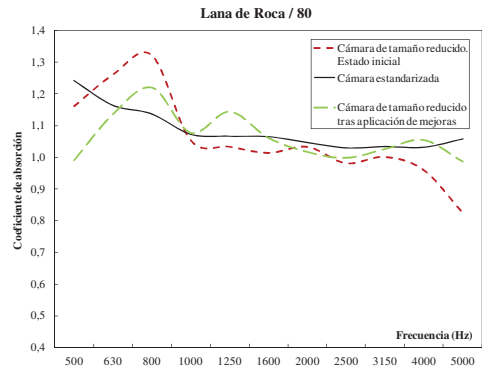


Gráfico 4.27. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (Lana de Roca/80)

Como podemos ver, tras la implantación de mejoras, las curvas de absorción de los materiales evaluados difieren respecto a las obtenidas en estado inicial y se acercan a las curvas de absorción obtenidas en cámara reverberante estandarizada. En el caso de los materiales PET, a excepción del material I400/30, todos ellos varían su curva de absorción acercándose a la obtenida en cámara estandarizada y en el caso de las lanas de roca, no se observa una caída abrupta a frecuencias altas como ocurría inicialmente sino que mantiene una forma más plana en todo el espectro, definiendo una curva muy próxima a la deseada tanto para 40mm de espesor (*Lana de Roca / 40*) como para 80mm de espesor (*Lana de Roca / 80*).

Para dar un valor único del coeficiente de absorción sonora de un material, puede incluirse un índice de número único calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 11654:1997 (UNE-EN ISO 11654:1998). En esta norma se establece el coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w , como un valor único independiente de la frecuencia, igual al valor de la curva de referencia a 500Hz después de desplazarla, tal y como se especifica en dicha Norma Internacional. En nuestro caso, no podemos dar un valor de α_w tal y como define la Norma (UNE-EN ISO 11654:1998), pues éste se obtiene a partir de frecuencias de 200Hz (referenciando a cámara reverberante normalizada) y en nuestro caso los ensayos se han realizado en cámara reverberante de tamaño reducido, donde la frecuencia de corte está entorno a 500Hz, por lo que los datos por debajo de esta frecuencia no serán fiables. Así pues, si se desea dar un único valor de absorción utilizando el mismo método de ponderación de la UNE-EN ISO 11654:1998, se debe especificar que han sido considerados valores de absorción a frecuencias fuera del rango de validación de la cámara reverberante de tamaño reducido. En todo caso, el valor único de α_w que podemos especificar será un valor conservador, marcando así un límite inferior de absorción.

En la Tabla 4.10 se pueden ver los valores del coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w , para cada material evaluado, tanto en cámara reverberante estandarizada como en cámara reverberante de tamaño reducido, el valor dado es una estimación, aunque podemos asegurar que la absorción será la que aparece en la Tabla 4.10 (primera columna) o mayor.

Tabla 4.10. Coeficiente de absorción sonora ponderado para cada material evaluado, tanto en cámara estandarizada como en cámara de tamaño reducido

Material	Coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w	
	Cámara reverberante de tamaño reducido	Cámara estandarizada
I 400/40	0.40	0.50
I 400/30	0.40	0.45
I 300/20	0.30	0.40
I 600/30	0.45	0.55
I 1400/70	0.70	0.80
I 700/25	0.45	0.50
Lana 40/30 mm	0.35	0.65
Lana 80/30 mm	0.75	1.00

Podemos ver que los coeficientes de absorción sonora ponderados obtenidos de ensayos en cámara reverberante de tamaño reducido difieren bastante de los que derivan de

ensayos en cámara reverberante estandarizada. Estos resultados pueden dar lugar a confusión, ya que los últimos gráficos (Gráfico 4.20 al Gráfico 4.27) representan curvas de absorción sonora similares para, prácticamente, todos los casos estudiados.

Esta diferencia radica en que el coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w , se obtiene a partir de frecuencias de 200Hz (por debajo de la frecuencia de corte de la pequeña cámara reverberante) y las representaciones gráficas se realizan a partir del tercio de octava de 500Hz (representado únicamente los resultados obtenidos fuera de la región dominada por los modos propios, es decir, por encima de la frecuencia de corte definida).

Así pues, al igual que en una curva de absorción obtenida en cámara reverberante de tamaño reducido se debe tratar con cuidado los resultados obtenidos por debajo de 598Hz (frecuencia de corte del recinto), los valores del coeficiente de absorción sonora ponderado nos ofrecen una idea del valor global de absorción de un material, pero se debe tener en cuenta que se han obtenido haciendo uso de valores a frecuencias que se encuentran en la región dominada por los modos propios del recinto, por lo que su resultado no será estable y su comparación con resultados obtenidos en una cámara reverberante estandarizada deberá tratarse con prudencia.

Los siguientes gráficos ilustran un ejemplo de ello. En ambos, se compara el coeficiente de absorción sonora, a partir de 200Hz, obtenido de ensayos en cámara reverberante de tamaño reducido y en cámara reverberante estandarizada

El Gráfico 4.28 representa los resultados correspondientes al material *I700/25* y el Gráfico 4.29 al material *Lana de Roca / 40*.

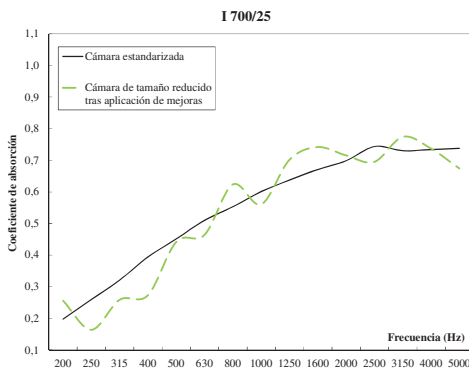


Gráfico 4.28. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (*I700/25*)

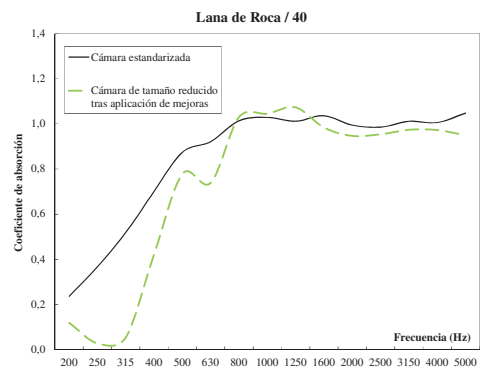


Gráfico 4.29. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (*Lana de Roca / 40*)

Podemos ver que en el caso de I700/25, desde 200Hz, los resultados se ajustan bastante a los obtenidos en cámara reverberante estandarizada por lo que el valor del coeficiente de absorción sonora ponderado será muy similar en ambos casos.

Sin embargo, para el caso de Lana de Roca 40mm y 30Kg/m³, los resultados obtenidos por debajo de 630Hz difieren bastante de lo obtenido en cámara reverberante estandarizada y como consecuencia el valor de absorción sonora ponderado será bastante diferente en ambos casos.

Estos dos ejemplos demuestran la cautela con la que se tiene que tratar los valores de coeficiente de absorción sonora ponderado de un material evaluado en la cámara de transmisión de tamaño reducido a la hora de compararlo con un valor obtenido en cámara reverberante estandarizada.

4.7.2. Propuesta de corrección del coeficiente de absorción y resultados.

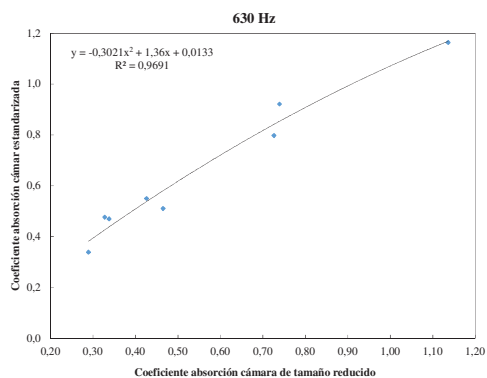
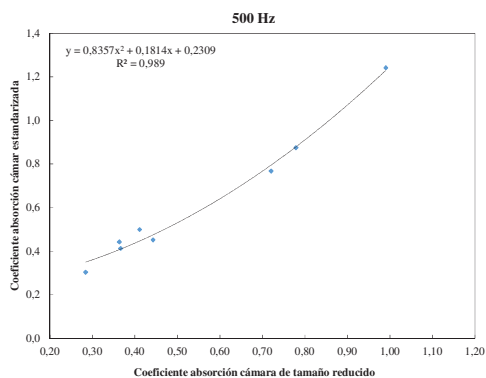
A pesar de la optimización de los resultados obtenidos tras la implementación de las mejoras propuestas, las curvas de absorción sonora siguen presentando ciertas fluctuaciones en comparación con las curvas obtenidas de ensayos en cámara reverberante estandarizada, que describen un trazado más plano y “limpio”. Es por esto que, basándonos en estudios anteriores (Mateus, D. et al., 2012), se decide realizar una propuesta de corrección del coeficiente de absorción sonora obtenido en cámara reverberante de tamaño reducido, a partir de los resultados obtenidos en la cámara reverberante estandarizada, para conseguir una respuesta más plana en la curva de absorción.

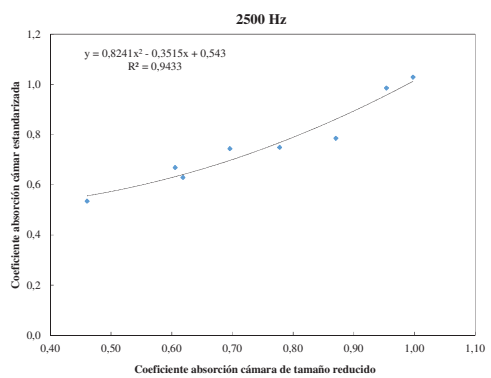
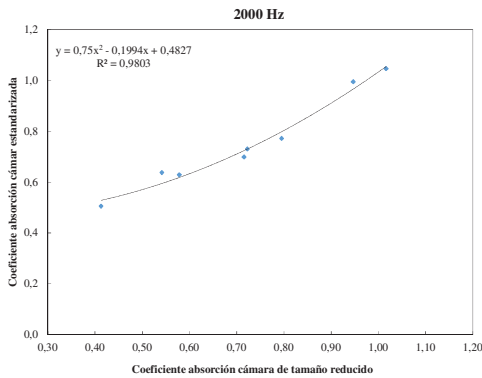
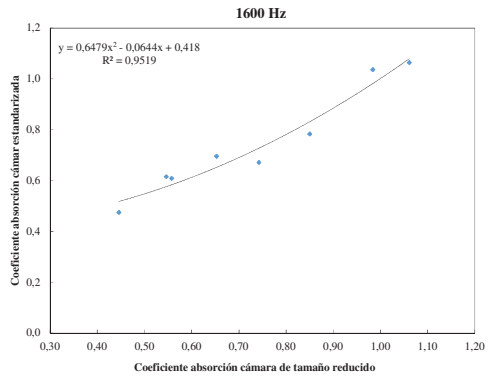
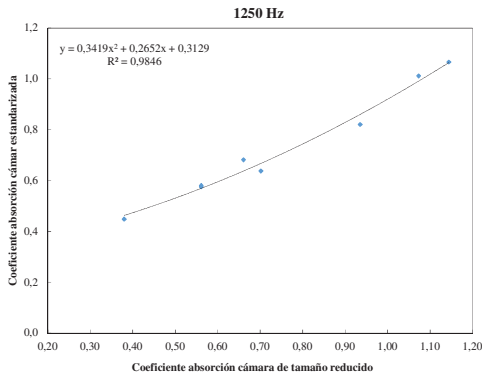
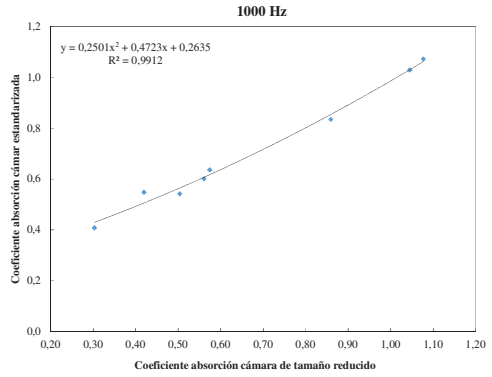
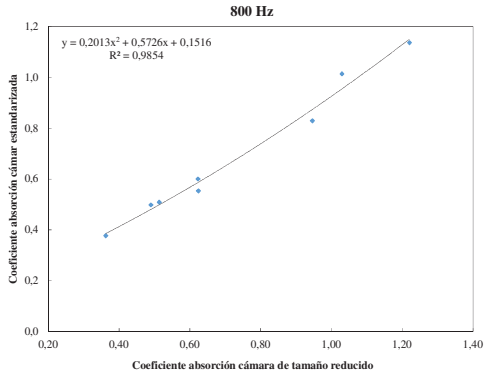
Para ello, se enfrentan gráficamente los valores en cámara estandarizada con los obtenidos en el recinto de menores dimensiones en cada tercio de octava y, aplicando una regresión polinómica de 2º grado, obtenemos una serie de expresiones que dan como resultado un ábaco de corrección y aproximan los valores de coeficiente de absorción medidos en cámara pequeña a los medidos en cámara estandarizada. En la Tabla 4.11 se presentan las ecuaciones que darían lugar al ábaco de corrección, siendo x el valor de absorción a corregir e y el valor de absorción corregido.

Tabla 4.11. Ecuaciones de ajuste que dan lugar al ábaco de corrección, desde 500Hz hasta 5KHz.

Frecuencia (Hz)	Ecuación de ajuste
500	$y = 0,8357x^2 + 0,1814x + 0,2309$
630	$y = -0,3021x^2 + 1,36x + 0,0133$
800	$y = 0,2013x^2 + 0,5726x + 0,1516$
1000	$y = 0,2501x^2 + 0,4723x + 0,2635$
1250	$y = 0,3419x^2 + 0,2652x + 0,3129$
1600	$y = 0,6479x^2 - 0,0644x + 0,418$
2000	$y = 0,75x^2 - 0,1994x + 0,4827$
2500	$y = 0,8241x^2 - 0,3515x + 0,543$
3150	$y = 0,8849x^2 - 0,4326x + 0,5646$
4000	$y = 0,5731x^2 + 0,0078x + 0,4074$
5000	$y = 1,3879x^2 - 1,0653x + 0,7732$

A continuación se muestran los gráficos de ajuste para cada banda de tercio de octava desde 500Hz hasta 5KHz, teniendo en cuenta los 8 materiales estudiados en este trabajo. Cada punto de cada gráfico representa el valor de cada material estudiado.





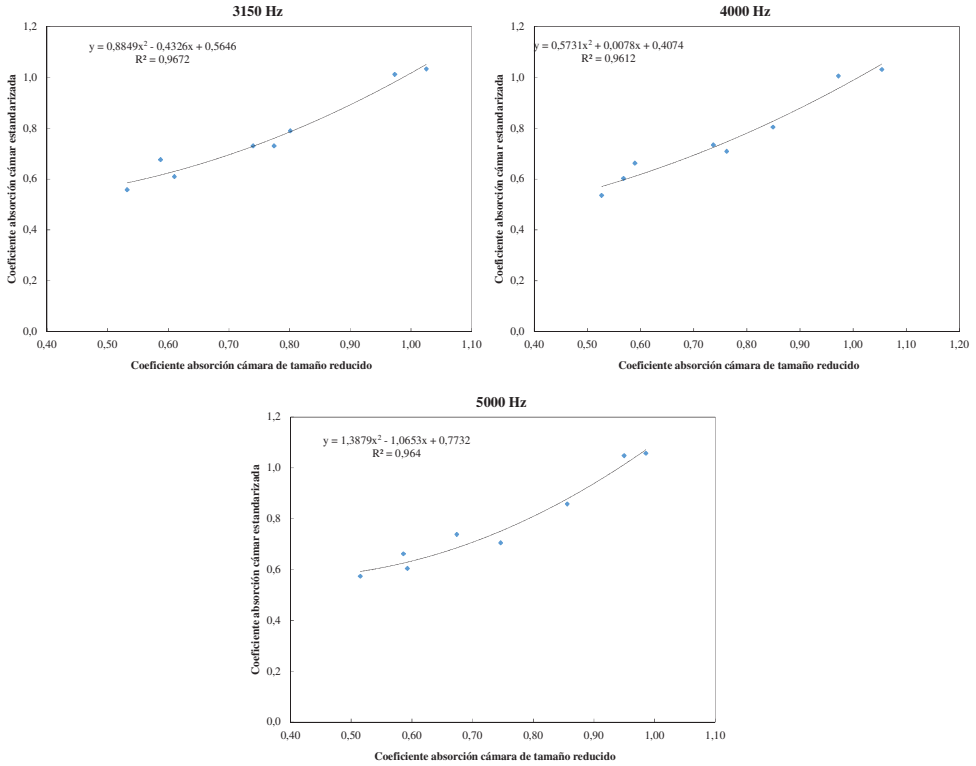


Gráfico 4. 30. Gráficos de ajuste para cada tercio de octava desde 500Hz hasta 5KHz teniendo en cuenta los materiales empleados en el estudio.

En todos ellos se obtiene un coeficiente de correlación elevado y la ecuación de segundo grado obtenida es la que nos sirve para realizar el ajuste de la curva de absorción obtenida.

Aplicamos los ajustes obtenidos a cada frecuencia a cada uno de los materiales evaluados. El resultado se representa en el Gráfico 4.31 al Gráfico 4.38.

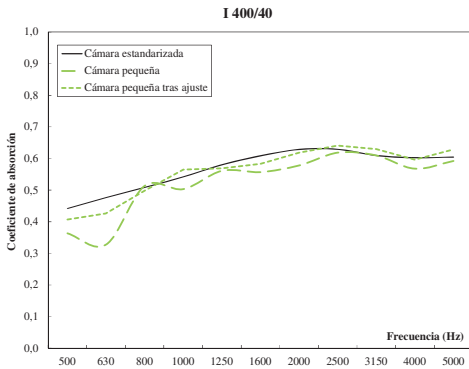


Gráfico 4.31. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 400/40

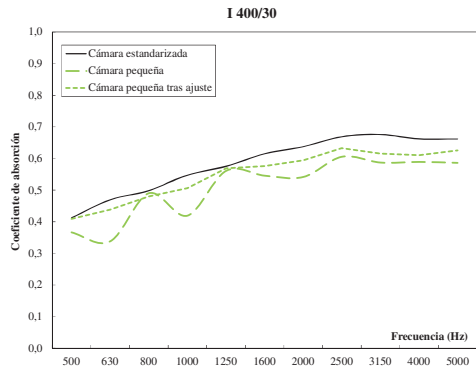


Gráfico 4.32. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 400/30

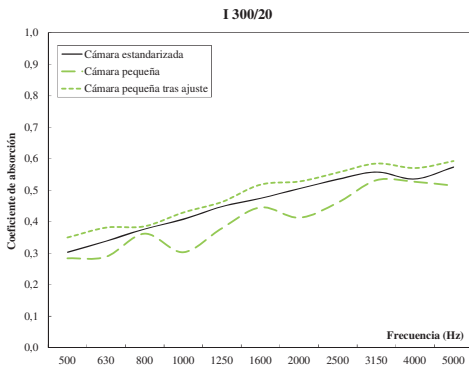


Gráfico 4.33. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 300/20

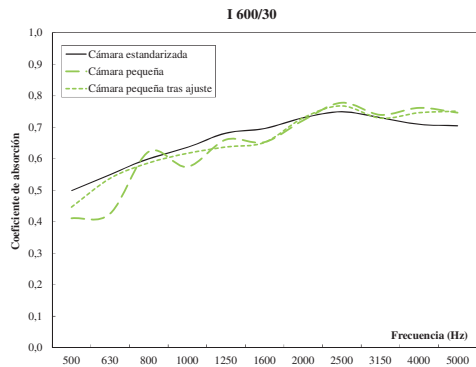


Gráfico 4.34. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 600/30

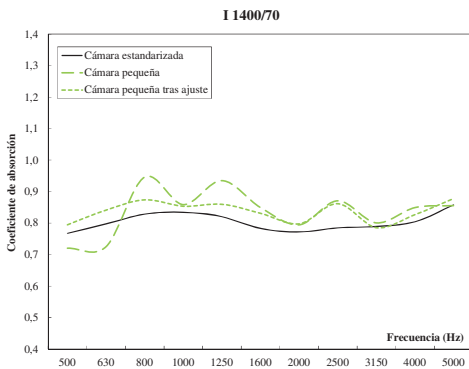


Gráfico 4.35. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 1400/70

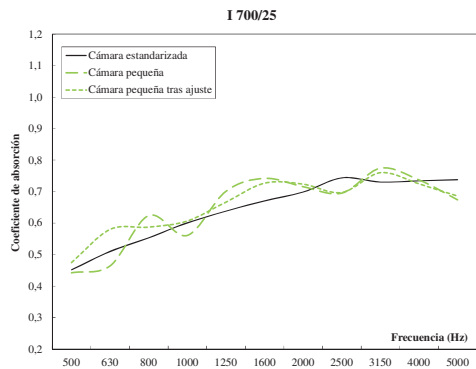


Gráfico 4.36. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 700/25

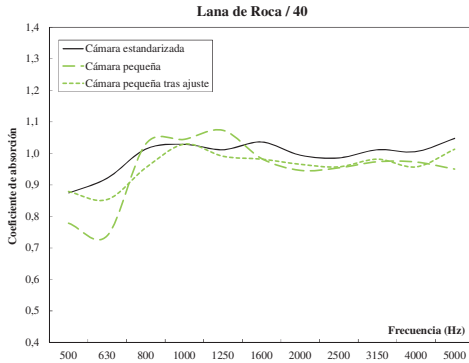


Gráfico 4.37. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de Lana de Roca/40

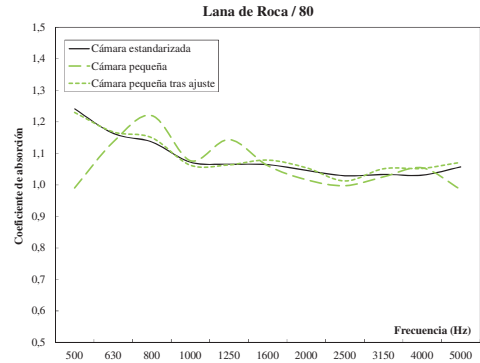


Gráfico 4.38. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de Lana de Roca/80

Podemos observar en los gráficos anteriores cómo el coeficiente de absorción obtenido tras el ajuste se aproxima de forma sustancial a los valores obtenidos en cámara reverberante estandarizada, en comparación con las curvas a las que no se aplica dicha corrección, mejorando de nuevo el ajuste obtenido.

La coincidencia de los resultados de coeficiente de absorción sonora obtenidos para determinados materiales en cámara reverberante de tamaño reducido con los obtenidos en cámara reverberante estandarizada, a partir de 598Hz, exponen la validación de la cámara reverberante de tamaño reducido como laboratorio de ensayo de pequeñas dimensiones, para absorbentes planos.

4.8. Utilización de la cámara reverberante de tamaño reducido en proyectos de investigación.

Los resultados obtenidos en la evaluación del estado final de la cámara reverberante de tamaño reducido y su posterior ajuste, validan dicha cámara como laboratorio de ensayo de pequeñas dimensiones.

Como tal, se empieza a utilizar para evaluar el comportamiento acústico de nuevos materiales en fase de desarrollo, materiales sostenibles, reciclados y/o reciclables, susceptibles de convertirse en sustitutos de otros materiales no sostenibles asentados actualmente en el mercado.

Como ejemplo, a continuación se presentan resultados relacionados con el proyecto de investigación *GV/2012/066*, “*Soluciones al ruido de tráfico rodado a partir de ecomateriales de bajo coste*”. En este proyecto se estudia la posibilidad de utilizar Composites Textiles, que provienen del reciclado de la industria textil para la elaboración de barreras acústicas (Del Rey, R. et al., 2013a). Los composites a estudiar son composites textiles, con una matriz de lino y resina epoxi como ligante (con un porcentaje muy alto de resina NO contaminante). Algunas de las configuraciones a ensayo en la cámara reverberante de tamaño reducido fueron:

- Configuración 1. Material absorbente PET de 40mm de espesor.
- Configuración 2. Placa de composite textil perforada con plenum de aire de 40mm de espesor.
- Configuración 3. Placa de composite textil perforada con plenum de aire de 40mm de espesor relleno de material absorbente PET de 40mm de espesor.

El porcentaje de perforación supera el 9% y las perforaciones cuentan con 6mm de diámetro.



Figura 4. 16. Detalle de composite textil perforado con plenum de aire de 40mm, listo para el test de coeficiente de absorción sonora.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de coeficiente de absorción sonora de cada una de las configuraciones anteriormente citadas.

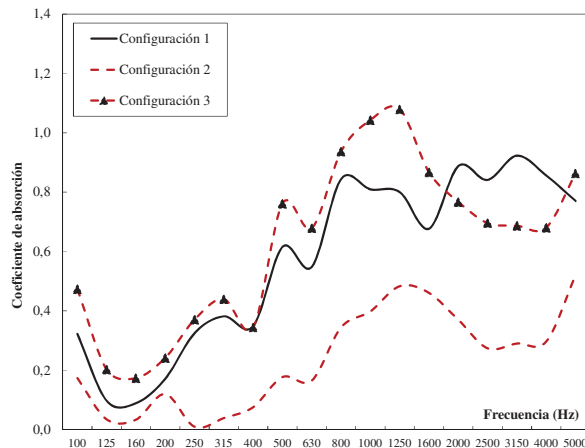


Gráfico 4. 39. Coeficiente de absorción sonora, para cada configuración a estudio, evaluado en la cámara reverberante de tamaño reducido

Además, en la Norma UNE- EN 1793-1:2014 (UNE-EN ISO 1793-1:2014) se describe una clasificación acústica de barreras, así como un índice de reducción sonora ΔL_a (dB). Así pues, se evalúa de acuerdo a esta norma la configuración a base de composite textil perforado más material absorbente (configuración 3) y se compara su clasificación con barreras acústicas comerciales elaboradas con materiales no sostenibles, estas se componen de chapa de acero galvanizado perforado (con perforación igual que el composite textil) y cámara con 50 mm de lana mineral. En la Tabla 4.12 se puede ver dicha comparativa.

Tabla 4.12. Categoría Acústica de la barrera diseñada con el Green Composite y Material absorbente reciclado con soluciones acústicas actualmente comercializadas.

UNE EN 1793-1:1998.	Composite Textil + PET (4cm)	Perforado Metálico + Lana Mineral (5cm)
Categoría	A2	A2

Los resultados obtenidos evidencian que las placas de Green Composite se pueden utilizar en la elaboración de barreras acústicas como cara incidente a la fuente de ruido, imitando la función de las placas de acero galvanizado utilizadas comúnmente en las tradicionales barreras acústicas.

Este ejemplo de aplicación demuestra el potencial de este pequeño laboratorio a nivel de investigación, pudiendo evaluar nuevos materiales con una reducción importante en costes y tiempo.

4.9. Análisis de resultados.

A continuación se presenta el análisis de resultados obtenidos en este capítulo de tesis, dejando las conclusiones generales reflejadas en el apartado de “Conclusiones”.

- Se repasa el diseño y construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido y se evalúan los primeros resultados obtenidos de ensayos llevados a cabo en la misma. Estos primeros ensayos se realizan en trabajos anteriores, previo desarrollo de este trabajo de Tesis y presentan resultados deficientes, alejados de lo esperado (Arrebola, F. et al., 2011). Se comprueba que se realizaron sin ningún control de la difusividad del campo sonoro, sin un estudio previo de las posiciones óptimas de micrófono, fuente y muestra y sin definir la frecuencia de corte de la cámara.

- Se realiza una primera evaluación de la cámara que recoge los siguientes aspectos:
 - Revisión de la geometría y propiedades físicas de la cámara y comprobación de su similitud con las planteadas en diseño: Se comprueba que, salvo pequeñas diferencias, ambas coinciden (Tabla 4.1).
 - Definición de las posiciones óptimas de micrófono, fuente y muestra. Tras un detallado estudio, se establecen aquellas que minimizan la desviación entre posiciones de micrófono (Figura 4.13).
 - Estudio del tiempo de reverberación y área de absorción equivalente en el interior de la cámara, como parámetros esenciales para su correcto funcionamiento, y definición de la frecuencia de corte entorno a 598Hz.

- Los resultados de absorción sonora obtenidos para diferentes materiales, tras la evaluación inicial, difieren de los obtenidos en una cámara reverberante normalizada (Gráfico 4.8 al Gráfico 4.15). Se requiere la aplicación de mejoras que ajusten los resultados obtenidos.

- Las mejoras planteadas consisten en la instalación de un sistema automatizado del proceso de medición y en la instalación de paneles difusores.
 - La primera permite controlar el movimiento entre posiciones de micrófono desde el exterior de la cámara por lo que supone un ahorro de tiempo durante el proceso de ensayo, minimiza errores y disminuye esfuerzos. Esto se traduce en ensayos rápidos, eficientes y más estables.
 - La segunda mejora está relacionada con la difusividad del campo sonoro en el interior de la cámara. La introducción de paneles difusores de manera adecuada, mejora su uniformidad y disminuye la desviación en los resultados obtenidos entre posiciones de micrófono, esto se traduce en resultados finales de absorción sonora más estables (Gráfico 4.20 al Gráfico 4.27).

Ambas mejoras suponen cambios, de manera favorable, en los valores de tiempo de reverberación y área de absorción sonora equivalente, incluso, consiguen desplazar la frecuencia de corte de la cámara a frecuencias más bajas.

- Como último paso y tomando como base métodos desarrollados por otros autores (Mateus, D. et al, 2012), se realiza un ajuste sobre los últimos resultados. Este ajuste incrementa la aproximación de las curvas de absorción sonora a aquellas obtenidas en una cámara reverberante normalizada. Además se aprecia una corrección en las irregularidades de dichas curvas y se consigue obtener curvas más estables y “limpias” (Gráfico 4.31 al Gráfico 4.38).

La afinidad entre las curvas de absorción obtenidas en la cámara reverberante de tamaño reducido, tras la aplicación de mejoras y el ajuste de los resultados, con las curvas de absorción obtenidas de ensayos en cámara reverberante normalizada, manifiesta la validación de la cámara reverberante como laboratorio de ensayos de tamaño reducido a partir de 500Hz.

Capítulo 5.

Conclusiones

La primera parte de esta Tesis se centra en la definición del objetivo general, el repaso de los antecedentes más significativos y el estudio de la legislación y normativas relacionadas con el trabajo a desarrollar.

La segunda parte supone el cuerpo del trabajo. Tras un proceso de evaluación, calibración y puesta en marcha, se valida la cámara de transmisión y la cámara reverberante como laboratorios de tamaño reducido. Estos laboratorios permiten obtener parámetros acústicos esenciales en la caracterización de materiales de una forma más rápida, cómoda y sobre todo económica, que en laboratorios normalizadas. Suponen una alternativa a éstos y se convierten en herramientas importantes en investigación, ya que permiten realizar un estudio de viabilidad acústica de nuevos materiales en fase de desarrollo, previa certificación final de los mismos.

En cámara de transmisión de tamaño reducido:

- Se aplican una serie de actuaciones que optimizan el proceso de medición, minimizan errores y reducen tiempo de ensayo.
- Se evalúa la cámara atendiendo a tres factores:
 - o Tiempo de reverberación. Los resultados obtenidos, para frecuencias por debajo de 800Hz, quedan fuera de los límites establecidos, por lo que implican una actuación de mejora como, por ejemplo, la introducción de atrapabajos en las esquinas de los recintos.

- Difusión del campo acústico: La introducción de paneles difusores mejora la uniformidad del campo acústico y, por tanto, la repetitividad y fiabilidad de los resultados obtenidos en ensayos de aislamiento acústico.
- Influencia de las transmisiones laterales: Se comprueba que las transmisiones laterales son despreciables para las configuraciones ensayadas.
- Se define la frecuencia de corte de la cámara. Los resultados obtenidos por debajo de esta frecuencia quedan influenciados por la región de modos propios del recinto y, por tanto, deberán utilizarse con prudencia.
- Los resultados obtenidos de ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo para diferentes configuraciones ligeras se comparan con resultados teóricos, en el caso de configuraciones simples, y con resultados obtenidos en cámara de transmisión normalizada, en configuraciones dobles. La afinidad en dicha comparativa ofrece la validación de la cámara como laboratorio de ensayos de tamaño reducido a partir de su frecuencia de corte.

En cámara reverberante de tamaño reducido:

- Se realiza una primera evaluación, o evaluación inicial, que recoge los siguientes aspectos:
 - Revisión de la geometría y propiedades físicas de la cámara y comprobación de su similitud con las planteadas en diseño.
 - Definición de las posiciones óptimas de micrófono, fuente y muestra.
 - Estudio del tiempo de reverberación y área de absorción equivalente en el interior de la cámara, como parámetros esenciales para su correcto funcionamiento, y definición de la frecuencia de corte.
- Los resultados de absorción sonora obtenidos para diferentes materiales, tras la evaluación inicial, difieren de los obtenidos en una cámara reverberante normalizada. Se requiere la aplicación de mejoras que ajusten los resultados obtenidos.
- Se plantean una serie de mejoras consistentes en:
 - Automatización del proceso de medición: Supone un ahorro en cuanto a tiempo y esfuerzo durante el proceso de medición.
 - Introducción de paneles difusores: Deriva en una mayor uniformidad del campo sonoro en el interior de la cámara.

- Ambas suponen cambios, de manera favorable, en los valores de tiempo de reverberación y área de absorción sonora equivalente, incluso, consiguen desplazar la frecuencia de corte de la cámara a frecuencias más bajas.
- Los resultados de absorción sonora obtenidos para diferentes materiales, tras la implantación de mejoras, se corrigen. Las curvas de absorción se acercan a las obtenidas en cámara reverberante normalizada.
 - Tomando como base métodos desarrollados por otros autores (Mateus, D. et al, 2012), se realiza un ajuste sobre los últimos resultados. Este ajuste incrementa la aproximación de las curvas de absorción sonora a aquellas obtenidas en una cámara reverberante normalizada.
 - La afinidad entre las curvas de absorción obtenidas en la cámara reverberante de tamaño reducido, tras la aplicación de mejoras y el ajuste de los resultados, con las curvas de absorción obtenidas de ensayos en cámara reverberante normalizada, manifiesta la validación de la cámara a estudio como laboratorio de ensayos de tamaño reducido a partir de su frecuencia de corte.

Los resultados finales obtenidos, tanto en cámara de transmisión como en cámara reverberante, demuestran que, bajo ciertas limitaciones, estas cámaras quedan validadas como laboratorios de tamaño reducido.

Con esto se llega a la consecución del objetivo principal planteado. Disponer de laboratorios de tamaño reducido en los que obtener, de manera fiable, propiedades acústicas de materiales ecoinnovadores en fase de investigación de manera sencilla, rápida y, sobretudo, económica. Esto es visible en la memoria de Tesis, ya que ya aparecen resultados con nuevos materiales que cumplen las condiciones del Horizonte 2020, y en concreto el reto 5. Ya se han medido materiales reciclados y/o de fibras naturales, tanto absorbentes acústicos como ecocomposites sustitutos de otras placas convencionales como las de yeso laminado. De esta manera la memoria de Tesis se ajusta también al objetivo de caracterización de nuevos materiales dentro del proyecto nacional BI-A2013-41537-R.

Como tercera parte de este trabajo de Tesis, y cumpliendo con el objetivo secundario planteado, destaca la incorporación práctica al ámbito de la acústica en la edificación y la acústica medioambiental, de ecomateriales, green composites y soluciones constructivas sostenibles, evaluados en estos nuevos laboratorios de tamaño reducido, como paso previo a su certificación final.

Los resultados de este trabajo aparecen en los siguientes proyectos de investigación:

- *LIFE09 ENV/ES/000461: Demonstrative solutions to reduce noise pollution in industrial áreas, using finishing technologies in textile materials*'.
- Proyecto Nacional *BIA2013-41537-R 'Desarrollo de nuevos ecomateriales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basadas en el uso de residuos y materias primas renovables'* ubicado en el reto (5) de los propuestos por la Unión Europea en el 'Horizonte 2020' y recogidos en la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación: '*Reto en acción sobre cambio climático y eficiencia en la utilización de recursos y materias primas*'.
- Proyecto de investigación *GV/2012/066, "Soluciones al ruido de tráfico rodado a partir de ecomateriales de bajo coste"*.

Por último, cabe destacar la importancia que supone contar con laboratorios de tamaño reducido en procesos de investigación. Como tal, se considera imprescindible unificar criterios en cuanto a construcción y utilización de este tipo de laboratorios y tratar de establecer una estandarización adecuada para este tipo de recintos, teniendo en cuenta sus particularidades y sus limitaciones respecto a la estandarización de sus homólogos normalizados. Los criterios adoptados en este trabajo de Tesis deberían servir de ayuda a dicha estandarización.

Capítulo 6.

Futuras líneas de trabajo

Las futuras líneas de trabajo van dirigidas, por una parte, hacia mejoras en los laboratorios de tamaño reducido estudiados en este trabajo de Tesis; por otra parte, dentro de la caracterización y desarrollo de nuevos materiales ecoinnovadores se plantean nuevas líneas de trabajo, algunas de ellas en marcha actualmente, incluso con resultados publicados.

Respecto a la cámara de transmisión de tamaño reducido se plantea:

- Continuar trabajando en la mejora de la difusión en el interior de los recintos. Esto supondrá una mayor estabilidad y fiabilidad de los resultados de aislamiento acústico obtenidos. Para ello se propone el cambio de difusores de madera por difusores de metacrilato que se puedan curvar, tal como indica el Anexo A de la Norma UNE-EN ISO 354:2004. Esta variación en la forma de los difusores podría favorecer la reflexión difusa de los rayos sonoros que inciden sobre ellos. Se plantea, incluso, la posibilidad de utilizar difusores rotatorios o evaluar el comportamiento de emplear un barrido de micrófono a la hora de realizar las mediciones en lugar de posiciones fijas de micrófono.
- Mejorar el aislamiento acústico de los elementos que conforman el recinto receptor de la cámara, pues este recinto cuenta con un aislamiento de 38dB frente

a los 44dB del recinto emisor. Para ello, se propone la aplicación de un sistema trasdosado a la cara exterior que mejore esta característica.

- Construir y probar un nuevo portamuestras, que nos permita evaluar configuraciones de mayor espesor, pues hasta el momento quedamos limitados a configuraciones de, aproximadamente, 9cm.
- Buscar la posibilidad de realizar ensayos de aislamiento acústico para determinadas configuraciones en una cámara de transmisión normalizada y comparar los resultados con los obtenidos de ensayos en cámara de transmisión de tamaño reducido.

De las cuatro propuestas anteriormente descritas, se ha empezado a ejecutar la referente a construir y probar un nuevo portamuestras, que se está probado en el proyecto Nacional BIA2013-41537-R.

En la siguiente figura se puede ver un detalle del nuevo portamuestras construido y sus dimensiones. Este portamuestras nos permitirá evaluar nuevas soluciones constructivas o barreras acústicas de hasta 19cm de espesor.

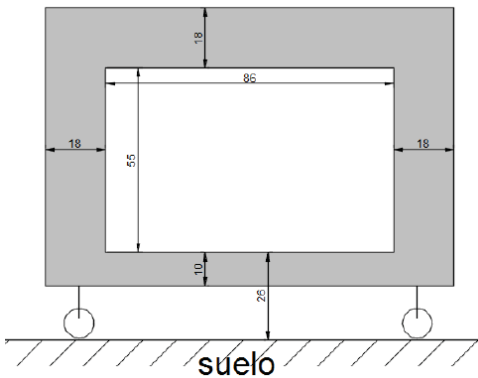


Figura 6.1. Nuevo portamuestras para la cámara de transmisión de tamaño reducido

Respecto a la cámara reverberante de tamaño reducido se plantea:

- Al igual que en la cámara de transmisión de tamaño reducido, continuar trabajando en la mejora de la difusión del campo sonoro. Esto supondrá una mayor estabilidad y fiabilidad de los resultados de absorción sonora obtenidos. Para ello se propone el cambio de difusores de madera por difusores de metacrilato que se puedan curvar, tal como indica el Anexo A de la Norma UNE-EN ISO 354:2004. Esta variación en la forma de los difusores podría favorecer la reflexión difusa de los rayos sonoros que inciden sobre ellos.

- Mejorar el ábaco de corrección y adaptarlo a las características del material evaluado

En este trabajo se obtiene un ábaco de corrección de las curvas de absorción a partir de 7 materiales de la misma naturaleza pero distinto espesor y densidad. Una mejora importante sería ampliar el número de materiales con la finalidad de obtener un ábaco de corrección con mayor precisión.

Además, cada tipo de material evaluado debería utilizar su propio ábaco de corrección, es decir, la corrección de una curva de absorción correspondiente a un material absorbente fibroso no debería utilizar el mismo ábaco de corrección que la corrección de la curva de absorción correspondiente a un material poroso o a una barrera acústica perforada.

Así, se plantea obtener curvas de corrección de diferentes tipos de materiales o configuraciones que se puedan ensayar en la cámara reverberante de tamaño reducido. Esta propuesta supone una mejora en continua evolución.

- Adaptar la cámara reverberante de tamaño reducido a la norma de medida de potencia para poder evaluar el nivel de potencia acústica generado por pequeños dispositivos y así poder ampliar el rango de utilidad de este pequeño laboratorio.

Además de las mejoras a ejecutar en los prototipos evaluados, se abren otras líneas de trabajo.

Durante el trabajo de Tesis se habla de coeficiente de absorción y aislamiento acústico como parámetros a evaluar en un material, barrera acústica o solución constructiva. No obstante, es conocido que no son los únicos parámetros que se deben conocer para caracterizar un material como absorbente o aislante acústico. Existen otros parámetros esenciales para caracterizar un material absorbente, entre ellos la “resistencia al flujo”, que se define como la resistencia al flujo de aire por unidad de longitud, σ , que mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor de éste. Este parámetro se puede obtener en laboratorio de forma normalizada según la norma ‘ISO (1991), 9053:1991. Acoustics. Materials for acoustical applications. Determination of airflow resistance’ (ISO 9053:1991) o bien utilizando distintos procedimientos alternativos descritos por distintos autores. Sin embargo, en función de las características del material, el ensayo normalizado puede presentar problemas. Además, requiere de una infraestructura elaborada en comparación con técnicas indirectas como las presentadas en los trabajos de Ingard&Dear y Dragonetti (Ingard K.U. et al, 1985; Dragonetti R. et al, 2010).

En el caso concreto de Dragonetti (Dragonetti R. et al, 2010), la medida se realiza utilizando dos volúmenes acústicos acoplados similares a un sistema de filtro paso –banda, donde es necesario realizar una calibración exhaustiva. Así pues, dentro del desarrollo de nuevas técnicas de caracterización de materiales ecoinnovadores, se plantea como futura línea de trabajo realizar un análisis del dispositivo de Dragonetti (Dragonetti R. et al, 2010), desde un punto de vista electroacústico, estudiando con detalle la calibración electroacústica del sistema paso-banda que lo conforma. Actualmente ya se ha empezado a trabajar en esta línea de investigación y se han publicado algunos resultados en congresos Nacionales e Internacionales (Alba J. et al, 2014b; Del Rey R. et al 2013b). En dichas publicaciones se puede obtener más información acerca del trabajo realizado hasta el momento referente a este tema.

En la Figura 6.2 se pueden ver detalles de los prototipos construidos para este propósito.



Figura 6.2. Prototipos para la medida de resistencia al flujo de materiales por técnicas alternativas.

Otra línea en la que se ha empezado a trabajar se centra en la obtención de las pérdidas por transmisión de materiales en incidencia normal. Las pérdidas por transmisión del sonido (Sound Transmission Loss) es un parámetro esencial para diseñar y solucionar problemas de ruido tanto en acústica de la edificación como en acústica medioambiental. Para ello se ha diseñado, construido y puesto en marcha un tubo de transmisión (Figura 6.3) basado en tubos de impedancia y se han publicado resultados al respecto en distintos congresos (Del Rey, R. et al, 2012c). Actualmente, se sigue trabajando en esta línea, pues existen normativas para determinar el coeficiente de absorción acústica de un material absorbente a partir de tubos de impedancia, pero no existe ningún procedimiento estandarizado que permita conocer las pérdidas por transmisión de un material a partir de tubos de impedancia.

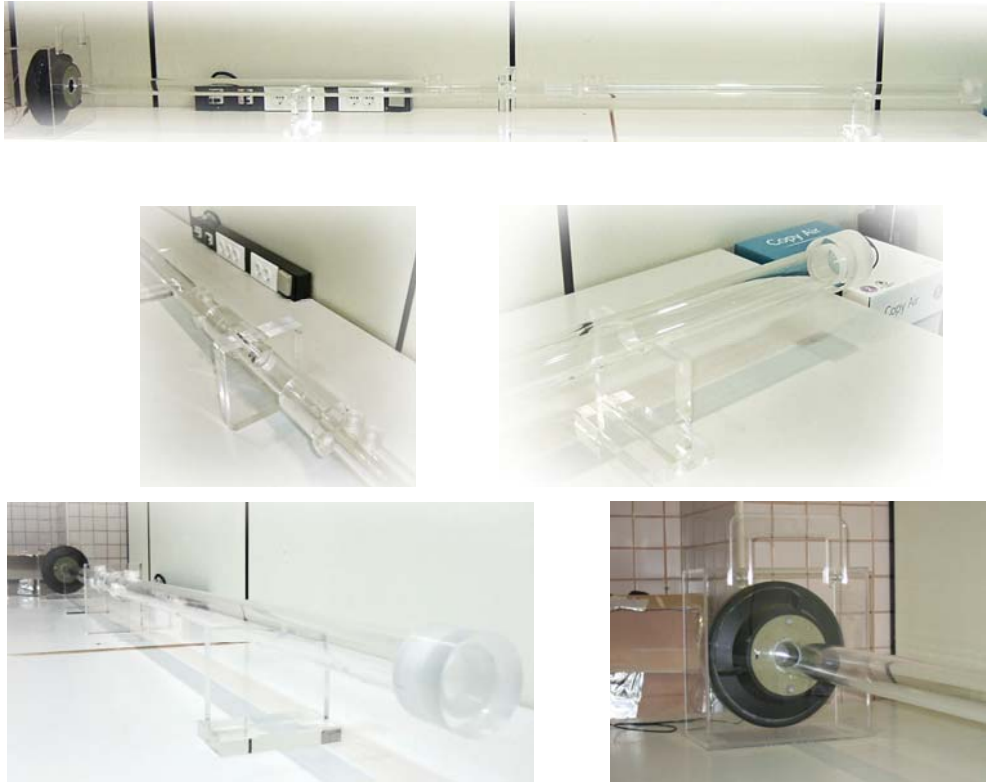


Figura 6.3. Detalles del tubo de transmisión basado en tubos de impedancias diseñado y construido.

Otro parámetro importante para la caracterización de nuevos materiales, es la porosidad. Así pues, el diseño, construcción y evaluación de un porosímetro se uniría a las futuras líneas de trabajo relacionadas con la caracterización de nuevos materiales acústicos ecoinnovadores.

Referencias

- Alba J., Del Rey R., Torres J.V., Bertó L., Hervás C. (2012a). Cámara de transmisión acústica a escala para el estudio de pantallas acústicas. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.
- Alba J., Del Rey R., Arrebola F., Bertó L., Hervás C. (2012b). Cámara reverberante a escala para el estudio de pantallas acústicas. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.
- Alba J., Bertó L., Del Rey R. (2014a). Validación de una cámara de transmisión a escala para medidas de elementos ligeros. 45º Congreso Español de acústica y 8º Congreso Ibérico de acústica – Murcia – Spain.
- Alba J., Bertó L., Arenas J.P. y Del Rey R. (2014b). ‘Medida de la resistividad al flujo con un método alternativo electroacústico’. IX Congreso Iberoamericano de Acústica FIA-2014. Valdivia – Chile.
- Allard, J.F., Champoux, Y. (1992). New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am.* 91(6):3346–53.
- Arrebola-Ballesteros, F. (2011). Construcción de una cámara reverberante a escala para el estudio de pantallas acústicas. Tesina Final de Máster. Directores: Alba Fernández J., Del Rey Tormos R.
- Ballagh, K.O. (1996). Acoustical Properties of Wool. *Applied Acoustics*, Vol. 48, No. 2, pp. 101-120.
- Baruch, K., Rubacha, J., Gorazd, L., Kamisiński, T. (2014). Reverberation chamber with reduced geometrical dimensions as a tool to measure scaled acoustic structures. *Forum Acusticum.* 7-12 setember – Kraków.
- Benkreira, H., Khan, A., Horoshenkov, K.V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chemical Engineering Science*, 66, 4157–4171.
- Bertó L., Del Rey R., alba J., Teira A. (2013). Characterization and validation of a reverberation chamber built to scale in order to test small prototypes of acoustic barriers. 42º International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. *Internoise 2013 – Innsbruck – Austria*
- Bertomeu, D., García-Sanoguera, D., Fenollar, O., Boronat, T., Balart, R. (2012). Use of Eco-Friendly Epoxy Resins From Renewable Resources as Potential Substitutes of Petrochemical Epoxy Resins for Ambient Cured Composites With Flax Reinforcements, *Polymer Composites*, 33, 5, 683-692.

- Bozen, S. (2010). Noise at Workplaces in the Call Center. *Arch. Acoust.*, 35, 2, 253–264.
- Bradley, J.S. (2003). The Acoustical design of conventional open plan offices. *Canadian Acoustics*, v. 31, no. 2, pp. 23-31.
- CEC (2010). Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. Redacción: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con colaboración de CEPCO y AICIA.
- CHING-WEN, L., JIA-HORN, L., KUAN-HUA, S. (2005). Recycling Polyester and Polypropylene Nonwoven Selvages to Produce Functional Sound Absorption Composites. *Textile Research Journal* - 75:390.
- Chung, Y., Tsulc, C., Voorhe, W., Jackson, C.S., Yan, C. (1976). The design of small reverberation chambers for transmission loss measurement. Department of Mechanical Engineering. University of Maryland. College Park, Maryland 20742 (USA)
- COM (2002), Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the Assessment and Management of Environmental Noise (END), The European Parliament and the Council of the European Union, Brussels.
- Cops, J., Vanhaecht, K. (1995). Sound absorption in a reverberation room: Causes of discrepancies on measurement results. *Applied Acoustics* 46, pp. 215-232
- Cremer, L., Müller, A. (1982a). Principles and applications of room acoustics. Applied Science Publishers, Ltd. Barking, Essex, England. Vol. 2. Chapter 5. Measurement of sound absorption in the reverberant room.
- Cremer, L., Müller, H.A. (1982b). Principles and applications of room acoustics. Applied Science Publishers, Ltd. Barking, Essex, England. Vol. 2. Chapter 5. Measurement of sound absorption in the reverberant room.
- DB-HR CTE (2010). Documento Básico HR. Protección Frente al Ruido. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas. Dirección general de Arquitectura y Política de Vivienda.
- Delany, M.E., Bazley, E.N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl Acoust* 1970;3:105–16.
- Del Rey, R., Alba, J., Sanchis, V. J. (2010). Estudio de la rigidez dinámica de espumas recicladas del textil. 46º congreso nacional de acústica, 6º congreso ibérico de acústica, Tecniacústica, 2010 – León – Spain.

- Del Rey Tormos, R., Alba Fernández, J., Bertó Carbó, L., Sanchis Rico V. (2011a). Absorbent acoustic materiales based in natural fibers. Forum Acusticum. Aalborg – Denmark.
- Del Rey, R., Ramis, J., Sanchis, V. (2011b), New absorbent acoustic materials from plastic bottle remnants. *Materiales de Construcción*. 61, 547-558.
- Del Rey, R., Bertó, L., Alba, J., Sanchís, J. V. (2012a). Obtención de soluciones acústicas a partir de reciclado de polvo textil mediante tecnología Wet-Laid. Cuadernos de investigación en ingeniería, vol. III.
- Del Rey, R., Alba, J., Arenas, J.P., Sanchis, V.J. (2012b). An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Applied Acoustics*, 73, 604–609.
- Del Rey R., Alba J., Bertó L., Hervás C., Sanchis V. (2012c). Construcción de un tubo de impedancia para la medida de las pérdidas por transmisión. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.
- Del Rey, R., Alba, J., Bertó, B., Balart, R., Quirós, R., Sanchis, V.J. (2013a). Diseño de prototipos de pantallas acústicas a partir de composites textiles. 44º congreso español de acústica, Tecniacústica 2013 – Valladolid – Spain.
- Del Rey R., Alba J., Bertó L., Teira A. (2013b), ‘Cosntrucción de un dispositivo de medida para la resistencia al flujo de materiales de bajo coste’. XXXIV Reunión Bienal de la Sociedad Española de Física. Valencia – Spain.
- Del Rey R., Bertó L., Alba J., Arenas. (2015). ‘Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barriers’. *Noise Control Engineering Journal*. PENDIENTE DE ACEPTACIÓN.
- Dragonetti R., Ianniello C., Romano A.R. (2010). Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method. *Journal of the Acoustical Society of America*. 129,2,753-764.
- Ekici, B., Kentli, A., Küçük, H. (2012). Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers. *ARCHIVES OF ACOUSTICS* Vol. 37, No. 4, pp. 515–520.
- Everest, F. Alton., Pohlmann, Ken. C. (2009). *Master handbook of Acoustics*. Fifth edition. Mc. Graw Hill. ISBN: 978-0-07-160333-1.
- Fatima, S., Mohanty, A.R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72, 108–114.
- Garai, M., Pompoli, F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*, 66, 1383–1398.

- García-Valles, M., Avila, G., Martínez, S., Terradas, R., Nogués, J.M. (2008). Acoustic barriers obtained from industrial wastes. *Chemosphere*, 72, 1098–1102.
- Garrido-Jiménez, P. (2014). Aislamiento acústico a ruido aéreo de soluciones multicapa en cámara a escala de sistemas base de pantallas acústicas. Tesina Final de Máster. Directores: Alba J., Bertó L.
- Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72, 249–259.
- Hernández García F. (2012). Mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante del Campus de Gandia de la UPV. Tesina Final de Máster. Directores: Alba J., Bertó L.
- Ingard K. U., Dear T. A. (1985). Measurement of acoustic flow resistance. *Journal Sound and Vibration*.103, 4, 567-572.
- ISO 9053:1991. Acoustics. Materials for acoustical applications. Determination of airflow resistance'
- Kling, C. (2008) Investigations into damping in building acoustics by use of downscaled models. ISBN 978-3-8325-1985-8
- Komatsu, T. (2008). Improvement of the Delany–Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. *Acoust Sci Technol.* 29(2):121–9. <http://dx.doi.org/10.1250/ast.29.121>.
- LIFE09 ENV/ES/000461 (2011). Demonstrative solutions to reduce noise pollution in industrial areas, using finishing technologies in textile materials. <http://noisefreetex.aitex.net>
- Leiva, C., Solís-Guzmán, J., Marrero, M., García C. (2013). Recycled blocks with improved sound and fire insulation containing. *Waste Management*, 33, 663–671.
- Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del ruido. BOE nº 276, martes 18 de Noviembre de 2003.
- López, J.P., El Mansouri, N.E., Alba J., Del Rey R., Mutje P., Vilaseca F. (2012). Acoustic properties of polypropylene composites reinforced with stone groundwood. *BioResources* 7 (4), 4586-4599.
- Maderuelo-Sanz, R., Nadal-Gisbert, A.V., Crespo-Amorós, J.E., Parres-García F. (2012). A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Applied Acoustics*, 73, 402–408.
- Mateus, D., Marinho, A., Pereira, A. (2012). “Aplicabilidade da fórmula de Sabine a espaços com elevada absorção sonora: Proposta de prévia correção de coefi-

- cientes de absorção”. VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, Évora – Portugal.
- Mechel, F.P. (1988). Design charts for sound absorber layers. *J Acoust Soc Am* 1988;83(3):1002–13.
- Mechel, F.P., Ver, I.L. (1992). Sound-absorbing materials and sound absorbers. In: Beranek LL, Vér IL, (editors), *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. Wiley-interscience.
- Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany–Bazley models. *J Acoust Soc Jpn (E)* 1990;11(1):19–24.
- Nilsson, E., Hellstrom, B. (2010). Room acoustic design in Open-Plan Offices. 10ème Congrès Français d’Acoustique. Lyon – France.
- Papadopoulos, C.I. (2002). Development of an Optimized, Standard-Compliant Procedure to Calculated Sound Transmission Loss: Design of Transmission Rooms, *Applied Acoustic*.
- Patel, J.A., Broughton, K. (2002). Assessment of the Noise Exposure of Call Centre Operators. *Amm occup. Hyg.*, Vol. 46, No. 8, pp. 653-661.
- Quiessst. (2009), Quietening the Environment for a Sustainable Surface Transport <http://www.quiessst.eu/>, European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007 2013)
- Qunli, W. (1988). Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam. *Appl Acoust* - 25:141–8.
- Ramis J., Alba J., Del Rey R., Escuder E., Sanchís V. J. (2010). New absorbent material acoustic based on kenaf’s fibre. *Materiales de Construcción* Vol. 60, 299, 133-143.
- Ricciardi, E.D. (2013). Design of a Scaled Down Acoustic Experiment with Anechoic and Reverberation Chambers. PhD work at Ohio State University.
- Rushforth, I.M., Horoshenkov, K.V., Miraftab, M., Swift, M.J. (2005). Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics*, 66, 731–749
- Sabine W.C. (1664) "Collected papers on Acoustics". Dover Pub, New York
- Schroeder, M.R. (1954). Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen. *Acustica*, 4, 594-600.
- Schroeder, M.R. and Kuttruff, K.H. (1962). On frequency response curves in rooms. Comparison of Experimental, Theoretical and Monte Carlos Results for the Average Frequency Spacing between Maxima. *J. Acoust, Soc. Am.* 34, 76-80.

- Serrano, A., Espinach, F.X., Tresserras, J., del Rey, R., Pellicer, N., Mutje, P. (2014). Macro and Micromechanics analysis of short fiber composites stiffness: The case of old newspaper fibers- polypropylene composites. *Materials and Design*, 55, 319-324.
- Skålevik, M. (2011). Schroeder Frequency revisited. International Congress Forum Acustikum – Aalborg, Denmark.
- Teira-Arnoso, A. (2013). Adecuación y validación de una cámara reverberante a escala para ensayos de pantallas acústicas. Tesina Final de Máster. Directores: Alba J., Del Rey R.
- Torres J.V. (2011). Diseño y construcción de una cámara de transmisión acústica a escala. Trabajo Final de Máster. Universidad Politécnica de Gandia, Universitat Politècnica de València. Directores: Alba J., Del Rey R.
- UNE-EN ISO 140-1:1198. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Requisitos de las instalaciones del laboratorio sin transmisiones indirectas.(ISO 140-1:1997). NORMA DERROGADA.
- UNE-EN ISO 11654:1998. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997)
- UNE-EN ISO 12354-1:2000. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1. Aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.
- UNE-EN ISO 12354-2:2001. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2. Aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos.
- UNE-EN ISO 354:2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003)
- UNE-EN ISO 10848-1:2007. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes. Parte 1. Documento Marco. (ISO 10848-1:2006)
- UNE-EN ISO 3382:2008. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2. Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. (ISO 3382-2:2008)
- UNE-EN ISO 10140-2:2011. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2. Medición del aislamiento acústico a ruido aéreo (ISO-10140-2:2010).

- UNE-EN ISO 10140-4:2011. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 4. Procedimientos y requisitos de medición. (ISO-10140-4:2010).
- UNE-EN ISO 10140-5:2011. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5. Requisitos para instalaciones y equipos de ensayos. (ISO 10140-5:2010).
- UNE-EN ISO 3741:2011. Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes. (ISO 3741:2010)
- UNE-EN ISO 3382-3:2012. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 3: Oficinas diáfanos (ISO 3382-3:2012)
- UNE-EN ISO 717-1:2013. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1. Aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1:2013)
- UNE-EN ISO 16283-1:2014. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1. Aislamiento a ruido aéreo (ISO 16283-1:2014).
- UNE-EN ISO 1793-1:2014. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora. (EN 1793-1:2012)
- Villarroel González, C.H., Martins Soares, A.J. (1985). Mediciones en una cámara reverberante, modelo escala 1:10.
- Voronina, N. (1998). An Empirical Model for Elastic Porous Materials, Applied Acoustics. Vol. 55, (1), 67-83.
- World Health Organization (WHO) (2000), Guide- lines for Community Noise, Berglund B., Lindvall T., Schwela D.H. and Goh K.T. [Eds.], WHO, Geneva.
- www.eshorizonte2020.es. Última consulta 22 de Abril de 2015.
- Younoun, L., Changwha, L. (2003). Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. Autex Research Journal, Vol. 3, No2, June 2003 © Autex.
- Zhu X., Kim B.J., Wang Q., Wu Q. (2014). Recent Advances in the Sound Insulation Properties of Bio-based Materials. BioResources 9(1).

Listado de tablas

Tabla 2.1. Estructura y contenidos del conjunto de Normas ISO 10140	-----	16
Tabla 2.2. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Generalidades	-----	20
Tabla 2.3. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Recintos de Ensayo	-----	21
Tabla 2.4. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Abertura de Ensayo	-----	22
Tabla 2. 5. Adaptaciones y limitaciones normativas para cámara de transmisión de tamaño reducido. Procedimiento de medición y requisitos.	-----	23
Tabla 2. 6. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Volumen	-----	24
Tabla 2. 7. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Forma.	-----	24
Tabla 2.8. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Difusión del campo sonoro..	-----	25
Tabla 2.9. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Área de absorción sonora..	-----	25
Tabla 2. 10. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Muestras a ensayo.	-----	26
Tabla 2.11. Adaptaciones y limitaciones normativas en cámara reverberante de tamaño reducido. Procedimiento de medición y requisitos.	-----	27
Tabla 3.1. Datos de partida del diseño de la cámara	-----	31

Tabla 3.2. Comparación entre el modelo real o estándar y el modelo de tamaño reducido	-----	32
Tabla 3.3. Materiales empleados para la construcción de la cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	33
Tabla 3. 4. Comparación de dimensiones planteadas en diseño y dimensiones reales tras la construcción de la cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	35
Tabla 3.5. Distancia de separación mínima entre posiciones de micrófono	-----	40
Tabla 3.6. Tiempo de reverberación en el recinto emisor de la cámara de transmisión de tamaño reducido tras la colocación de paneles difusores.	-----	52
Tabla 3.7. Kij global para el camino de transmisión Flanco – flanco (Flanco 1 a Flanco 4)	-----	62
Tabla 3.8. Índice de reducción sonora, ponderado, global para cada configuración a ensayo.	-----	67
Tabla 3.9. Datos de aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de flanco al elemento a ensayo.	-----	73
Tabla 4.1. Comparación de dimensiones planteadas en diseño y dimensiones reales tras la construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido.	-----	92
Tabla 4.2. Distancia de separación mínima entre posiciones fijas de micrófono	-----	94
Tabla 4.3. Área de absorción sonora equivalente según Norma, escalado a un volumen de 1.12m ³ y uniformidad de la curva por medio del valor “diferencia”	-----	99
Tabla 4. 4. Tiempo de reverberación en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido. Evaluación en Estado Inicial	-----	100
Tabla 4.5. Lista y características de materiales a ensayo	-----	102
Tabla 4.6. Desviación entre posiciones de micrófono fijas, para cada posición de fuente.	-----	110

Tabla 4.7. Valores numéricos referentes al Gráfico 4.17	-----	113
Tabla 4.8. Área de absorción sonora equivalente según Norma, escalado a un volumen de 1.12m ³ y uniformidad de la curva por medio del valor “diferencia”	-----	115
Tabla 4.9. Tiempo de reverberación en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido. Evaluación tras la implantación de mejoras.	-----	116
Tabla 4.10. Coeficiente de absorción sonora ponderado para cada material evaluado, tanto en cámara estandarizada como en cámara de tamaño reducido	-----	120
Tabla 4.12. Categoría Acústica de la barrera diseñada con el Green Composite y Material absorbente reciclado con soluciones acústicas actualmente comercializadas.	-----	130
Tabla 4.12. Categoría Acústica de la barrera diseñada con el Green Composite y Material absorbente reciclado con soluciones acústicas actualmente comercializadas.	-----	130

Listado de figuras y gráficos

FIGURAS

Figura 2.1. Cuadro resumen de adaptaciones y limitaciones de especificaciones normativas a tener en cuenta cuando se trabaja con prototipos de tamaño reducido	-----	28
Figura 3.1. Cámara de transmisión de tamaño reducido construida. Estado inicial.	-----	34
Figura 3.2. Dimensiones reales (tras su construcción) de los recintos emisor y receptor que conforman la cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	36
Figura 3.3. Cámara de transmisión de tamaño reducido	-----	37
Figura 3.4. Preparación del sistema de ruedas que soportará el portamuestras y porta-muestras independizado del recinto receptor	-----	38
Figura 3.5. Cámaras controladas por IP e instalación de una de ellas en el interior de la cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	39
Figura 3.6. Planos de giro propuestos (+8° y -8°) frente al plano de giro horizontal	-----	39
Figura 3.7. Posiciones de micrófono y fuente en recinto emisor.	-----	42
Figura 3.8. Posiciones de micrófono y fuente en recinto receptor.	-----	43
Figura 3.9. Posiciones de micrófono fijas en recinto emisor y receptor para ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	44
Figura 3.10. Paneles difusores de contrachapado de madera colocados en el interior del recinto emisor (derecha) y receptor (izquierda) de la cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	48
Figura 3.11. Elemento de separación a base de placa de yeso laminado de 12.5mm de espesor	-----	48

Figura 3.12. Definición de la región de cruce entre la región modal y la región de Schroeder.	-----	52
Figura 3.13. Posibles caminos de transmisión de potencia vibratoria a través de un elemento de separación vertical.	-----	54
Figura 3.14. Croquis de metodología de medición para la obtención de las diferencia de nivel de velocidad promediada direccionalmente sobre una unión	-----	57
Figura 3.15. Registro de niveles de aceleración durante las mediciones “in situ”, excitando sobre el flanco 1 lateral izquierdo (izquierda) y sobre el flanco 3, techo (derecha)	-----	58
Figura 3.16. Medida del tiempo de reverberación estructural de los elementos del recinto receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido	-----	60
Figura 3.17. 1-Sonómetro 2250; 2-micrófono 4189; 3-cámara ACQPX; 4-Altavoces Genelec; 5-tomas de red; 6-portátil para control mediante IP de cámaras ACQPX.	-----	64
Figura 3.18. Captura de imagen durante la puesta en marcha de un ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	64
Figura 3.19. Montajes de Configuraciones simples	-----	65
Figura 3.20. Montajes de Configuraciones dobles.	-----	66
Figura 3.21. Croquis de ubicación de la cámara de transmisión de tamaño reducido en el interior de la cámara reverberante para evaluar el aislamiento acústico de los cerramientos que la conforman.	-----	72
Figura 3.22. Imágenes tomadas durante las mediciones de aislamiento acústico de los cerramientos que conforman emisor y receptor de la cámara de transmisión de tamaño reducido.	-----	72
Figura 4.1. Dimensiones interiores de la cámara reverberante de tamaño reducido. Fase de diseño	-----	87
Figura 4.2. Detalles de posiciones de micrófono y fuente.	-----	88
Figura 4.3. Solución constructiva de paredes, suelo y techo de la cámara reverberante de tamaño reducido.	-----	89

Figura 4.4. Detalles de construcción de la cámara reverberante de tamaño reducido.	-----	90
Figura 4.5. Geometría y dimensiones interiores de la cámara reverberante de tamaño reducido una vez construida.	-----	93
Figura 4.6. Ubicación de posiciones de fuente (a), micrófono (b) y diferentes alturas respecto al suelo en las que se sitúan las posiciones de micrófono	-----	95
Figura 4.7. 1- micrófono 4189; 2-sonómetro 2250; 3-Altavoz Genelec 8030A	-----	101
Figura 4.8. Interior de la cámara reverberante de tamaño reducido durante los ensayos	-----	101
Figura 4.9. A la izquierda ejemplo de las tres muestras de uno de los materiales a ensayo y su correspondiente perímetro y a la derecha muestra y perímetro preparada para ensayar.	-----	102
Figura 4.10. Cámara de vigilancia controlada por IP.	-----	107
Figura 4.11. Interior de la cámara reverberante con sistema automatizado y emisores fijos instalados.	-----	108
Figura 4.12. Software de la webcam para controlar el posicionamiento de micrófono desde el exterior de la cámara reverberante.	-----	108
Figura 4.13. Posiciones de micrófono fijas para la realización de los ensayos tras la incorporación en el interior de la cámara de un sistema automatizado de movimiento de micrófono.	-----	109
Figura 4.14. Distribución de los paneles difusores en el interior de la cámara reverberante de tamaño reducido.	-----	111
Figura 4.15. Interior de la cámara reverberante de tamaño reducido durante un ensayo, tras la aplicación de mejoras propuestas.	-----	117
Figura 4. 16. Detalle de composite textil perforado con plenum de aire de 40mm, listo para el test de coeficiente de absorción sonora.	-----	129
Figura 6.1. Nuevo portamuestras para la cámara de transmisión de tamaño reducido	-----	138
Figura 6.2. Prototipos para la medida de resistencia al flujo de materiales por técnicas alternativas.	-----	141

Figura 6.3. Detalles del tubo de transmisión basado en tubos de impedancias diseñado y construido.	-----	142
--	-------	-----

GRÁFICOS

Gráfico 3.1. Tiempo de reverberación en el recinto emisor.	-----	46
Gráfico 3.2. Tiempo de reverberación en el recinto receptor.	-----	46
Gráfico 3.3. Desviación en los niveles de presión sonora antes y después de la colocación de paneles difusores, tanto en el recinto emisor (a) como en el recinto receptor	-----	49
Gráfico 3.4. Diferencias entre bandas de tercio de octava adyacentes para cada posición de micrófono fija seleccionada. PREVIA COLOCACIÓN DE DIFUSORES	-----	50
Gráfico 3.5. Diferencias entre bandas de tercio de octava adyacentes para cada posición de micrófono fija seleccionada. TRAS LA COLOCACIÓN DE DIFUSORES	-----	50
Gráfico 3.6. Diferencias de Velocidad (dB) promediadas direccionalmente sobre la unión para cada elemento de flanco en unión con el elemento a ensayo	-----	58
Gráfico 3.7. Tiempos de reverberación estructural para cada elemento de flanco, tanto en recinto emisor (elementos i) como en recinto receptor (elementos j).	-----	61
Gráfico 3.8. Índice de reducción vibracional, K_{ij} , de cada unión, en el camino de transmisión Flanco-flanco (K _{Ff}).	-----	63
Gráfico 3.9. Índice de reducción sonora, R, para cada configuración de ensayo, en bandas de tercio de octava desde 100Hz hasta 3150Hz.	-----	66
Gráfico 3.10. Config.1 – 1PYL-13mm	-----	76
Gráfico 3.11. Config.2 – 2PYL-13mm	-----	76
Gráfico 3.12. Config.3 – 3PYL-13mm	-----	76
Gráfico 3.13. Config.4 – 4PYL-13mm	-----	76
Gráfico 3.14. Config.5 – 5PYL-13mm	-----	77
Gráfico 3.15. Config.6 – 1PYL-13mm+Espuma 40/80+2PYL-	-----	77

13mm

Gráfico 3.16. Config.1 – 1PYL-13mm	-----	78
Gráfico 3.17. Config.2 – 2PYL-13mm	-----	78
Gráfico 3.18. Config.3 – 3PYL-13mm	-----	78
Gráfico 3.19. Config.4 – 4PYL-13mm	-----	78
Gráfico 3.20. Config.5 – 5PYL-13mm	-----	79
Gráfico 3.21. Config.6 – 1PYL-13mm+Espuma 40/80+2PYL-13mm	-----	79
Gráfico 3.22. Comparativa entre configuraciones simples a base de placa de yeso laminado (PYL) de 10Kg/m ² y placas composite (PC) de 5Kg/m ² para espesores de 5mm y 3Kg/m ² para espesores de 3mm	-----	81
Gráfico 3.23. Comparativa entre configuraciones dobles a base de placa composite y configuraciones a base de placa de yeso laminado.	-----	81
Gráfico 4.1. Coeficiente de absorción sonora para configuraciones evaluadas durante los primeros ensayos realizados en la cámara reverberante de tamaño reducido.	-----	91
Gráfico 4.2. SPL en 12 posiciones de micrófono	-----	95
Gráfico 4.3. Desviación entre puntos de medida para posiciones de micrófono a 0.25m del suelo.	-----	95
Gráfico 4.4. SPL en 12 posiciones de micrófono	-----	96
Gráfico 4.5. Desviación entre puntos de medida para posiciones de micrófono a 0.45m del suelo.	-----	96
Gráfico 4.6. Tiempo de reverberación en cámara vacía en fase de evaluación inicial de la cámara.	-----	97
Gráfico 4.7. Área de absorción sonora de la cámara reverberante vacía.	-----	98
Gráfico 4.8. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 400/40)	-----	103
Gráfico 4.9. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I	-----	103

400/30)		
Gráfico 4.10. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 300/20)	-----	103
Gráfico 4.11. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 600/30)	-----	103
Gráfico 4.12. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 1400/70)	-----	104
Gráfico 4.13. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (I 700/25)	-----	104
Gráfico 4.14. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (Lana de Roca/40)	-----	104
Gráfico 4.15. Alpha en cámara pequeña vs cámara estandarizada (Lana de Roca/80)	-----	104
Gráfico 4.16. Desviaciones en el nivel de presión sonora entre puntos de medida, antes y después de la implantación de las mejoras propuestas.	-----	112
Gráfico 4.17. Grado de difusión antes y después de implementación de mejoras	-----	113
Gráfico 4.18. Tiempo de reverberación en cámara vacía tras la implantación de la cámara.	-----	114
Gráfico 4.19. Área de absorción sonora equivalente de la cámara reverberante vacía, tras la implementación de mejoras.	-----	114
Gráfico 4.20. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 400/40)	-----	118
Gráfico 4.21. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 400/30)	-----	118
Gráfico 4.22. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 300/20)	-----	118
Gráfico 4.23. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 600/30)	-----	118
Gráfico 4.24. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 1400/70)	-----	119

Gráfico 4.25. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I 700/25)	-----	119
Gráfico 4.26. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (Lana de Roca/40)	-----	119
Gráfico 4.27. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (Lana de Roca/80)	-----	119
Gráfico 4.28. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (I700/25)	-----	121
Gráfico 4.29. Alpha en cámara pequeña antes y después de aplicación de mejoras vs cámara estandarizada (Lana de Roca / 40)	-----	121
Gráfico 4. 30. Gráficos de ajuste para cada tercio de octava desde 500Hz hasta 5KHz teniendo en cuenta los materiales empleados en el estudio.	-----	125
Gráfico 4.31. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 400/40	-----	126
Gráfico 4.32. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 400/30	-----	126
Gráfico 4.33. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 300/20	-----	126
Gráfico 4.34. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 600/30	-----	126
Gráfico 4.35. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 1400/70	-----	126
Gráfico 4.36. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de I 700/25	-----	126
Gráfico 4.37. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de Lana de Roca/40	-----	127
Gráfico 4.38. Efecto de la propuesta de corrección sobre la curva de absorción de Lana de Roca/80	-----	127
Gráfico 4. 39. Coeficiente de absorción sonora, para cada configuración a estudio, evaluado en la cámara reverberante de tamaño reducido	-----	129

Anexos

Anexo 1. Datos adicionales.

Tabla A.1.1. Ensayo 1 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de 8° aproximadamente _ Puntos de Medida. M1a a M6a. Recinto Emisor. Nivel de Prestión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1a-F1	M2a-F1	M3a-F1	M4a-F1	M5a-F1	M6a-F1	M1a-F2	M2a-F2	M4a-F2	M3a-F2	M5a-F2	M6a-F2	Desviación
100	86,5	87,8	93,1	90,6	94,9	96,6	88,7	91,8	94,8	89,7	94,5	96,8	3,5
125	97,3	92,9	92,5	93,3	95,6	101,5	95,3	91,2	93,9	90,8	96,2	101,6	3,6
160	101,9	97,5	89,3	99,5	92,5	102,0	100,4	97,8	89,8	96,0	94,6	102,4	4,6
200	90,4	95,8	98,3	98,8	100,9	96,3	91,1	95,5	96,8	95,5	97,7	94,7	3,0
250	99,9	102,5	102,2	101,5	100,9	98,0	100,0	101,8	100,7	101,6	100,9	98,0	1,5
315	94,4	97,0	99,2	99,9	99,9	90,4	94,7	99,0	101,5	99,4	99,9	91,4	3,6
400	96,4	93,7	95,5	94,8	97,2	100,0	97,8	96,4	98,6	97,8	101,7	101,4	2,5
500	92,8	90,4	87,5	89,4	95,4	99,3	91,4	98,1	100,1	99,1	97,5	99,5	4,5
630	87,6	80,4	82,4	85,1	82,3	99,2	97,8	106,9	102,9	108,1	100,0	103,4	10,3
800	80,2	83,3	81,7	81,2	80,2	93,0	91,3	96,6	93,9	97,5	90,4	93,8	6,7
1000	85,2	84,9	88,1	83,8	85,9	86,6	90,0	85,4	87,7	89,0	89,2	89,0	2,0
1250	88,1	88,8	88,4	88,4	91,3	86,8	86,6	88,9	88,5	89,7	86,8	86,8	1,4
1600	86,2	85,0	85,3	85,2	88,4	86,4	89,6	90,9	93,3	92,7	94,2	93,1	3,6
2000	87,1	89,0	86,0	89,2	96,8	101,5	101,4	98,2	98,1	96,4	94,8	92,1	5,4
2500	84,8	83,8	82,6	86,4	96,8	87,3	88,8	85,6	86,3	87,0	86,6	86,7	3,5
3150	80,2	79,6	80,7	83,2	97,4	91,3	91,2	89,2	89,7	89,0	87,5	86,5	5,4
4000	82,6	82,1	80,4	83,3	88,8	85,7	86,8	90,8	88,2	88,0	88,8	87,9	3,3
5000	83,3	83,1	81,6	85,0	83,8	86,9	88,1	87,9	87,2	86,6	87,9	87,3	2,2
Global (dB)	106,7	106,4	106,7	107,4	108,7	110,0	108,2	110,6	109,7	111,2	109,2	110,3	1,7

Tabla A..1.2. Ensayo 2 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de 8° aproximadamente _ Puntos de Medida.
M1b a M6b. Recinto Emisor. Nivel de Presión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1b-F1	M2b-F1	M3b-F1	M4b-F1	M5b-F1	M6b-F1	M1b-F2	M2b-F2	M4b-F2	M3b-F2	M5b-F2	M6b-F2	Desviación
100	85,2	90,8	93,6	89,3	91,8	96,5	88,3	93,3	85,2	95,1	89,6	96,0	3,9
125	96,1	85,3	93,8	95,1	89,7	100,6	96,0	88,9	96,4	95,3	89,2	100,1	4,7
160	100,8	88,8	91,6	101,1	96,3	100,5	101,7	93,6	100,0	91,8	94,8	100,6	4,5
200	92,4	98,5	99,3	97,7	100,3	99,8	95,3	98,0	93,0	98,1	97,3	98,1	2,5
250	101,4	103,0	102,2	101,2	102,0	98,4	99,3	100,6	99,0	98,5	101,0	98,7	1,6
315	95,0	99,3	98,9	98,9	101,0	92,5	94,3	99,9	95,6	99,2	99,0	92,7	3,0
400	95,8	93,8	95,7	95,5	94,2	95,9	95,8	93,6	95,7	95,2	95,4	96,8	0,9
500	91,3	87,6	88,6	89,7	88,4	93,5	90,0	88,9	88,8	90,3	90,7	93,0	1,8
630	84,1	84,1	81,3	85,6	85,0	81,4	86,0	87,9	88,2	86,0	87,7	84,1	2,3
800	81,1	84,3	80,6	80,4	82,7	82,8	84,6	83,4	85,1	81,3	84,4	85,1	1,8
1000	85,3	87,4	87,7	83,9	83,5	87,0	85,2	86,9	85,9	86,4	87,5	88,0	1,5
1250	87,7	88,7	88,0	88,3	86,5	85,6	87,4	85,3	88,2	86,8	88,8	87,0	1,1
1600	85,9	86,5	85,4	86,3	85,5	85,3	87,1	87,5	87,0	87,8	86,1	84,8	1,0
2000	86,3	86,4	86,5	88,1	87,1	84,4	89,0	87,1	86,8	86,9	87,1	86,8	1,1
2500	85,3	83,1	83,4	85,8	84,4	82,1	83,7	83,7	85,5	83,8	84,4	85,3	1,1
3150	82,2	80,2	79,9	82,6	81,8	81,5	81,5	82,7	81,5	82,2	79,5	79,9	1,1
4000	81,5	81,4	78,7	81,7	80,6	80,8	82,3	82,6	81,7	82,3	83,2	81,5	1,2
5000	82,7	83,8	80,7	84,1	82,6	81,4	82,8	82,7	83,2	82,1	84,7	81,9	1,1
Global (dB)	106,6	106,7	107,0	107,4	107,4	107,7	106,5	106,3	105,9	106,2	106,2	107,5	0,6

Tabla A..1.3. Ensayo 3 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de -8° aproximadamente _ Puntos de Medida. M1a a M6a. Recinto Emisor. Nivel de Prestión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1a-F1	M2a-F1	M3a-F1	M4a-F1	M5a-F1	M6a-F1	M1a-F2	M2a-F2	M4a-F2	M3a-F2	M5a-F2	M6a-F2	Desviación
100	88,8	90,6	94,4	93,9	91,9	94,3	97,1	88,9	92,7	95,9	89,4	93,8	2,8
125	94,1	87,1	96,7	94,2	89,7	94,9	101,8	94,0	88,8	98,3	90,0	94,1	4,2
160	99,8	92,7	96,5	92,2	96,5	91,6	102,1	99,6	94,6	97,4	95,5	92,1	3,4
200	89,9	96,3	99,4	98,7	98,7	100,9	100,3	90,9	96,4	97,6	95,4	98,0	3,4
250	100,9	102,7	101,0	101,6	101,4	101,0	99,2	98,7	99,9	97,0	100,3	100,0	1,5
315	95,7	98,3	97,9	99,0	100,2	100,2	90,2	93,4	98,3	98,3	97,4	98,6	2,9
400	93,0	91,6	96,5	95,9	92,9	96,8	95,7	92,6	91,6	96,9	92,9	97,8	2,3
500	92,9	89,7	89,2	87,6	87,6	95,5	96,6	88,9	89,5	93,6	88,3	91,1	3,1
630	86,5	82,5	76,5	81,2	84,7	83,8	84,6	81,7	87,8	82,8	88,4	85,1	3,2
800	80,9	84,3	78,9	80,1	82,0	79,3	81,1	79,7	84,8	82,2	86,7	80,8	2,4
1000	86,4	85,6	86,3	87,5	83,8	84,7	88,2	86,1	84,9	85,6	87,3	88,0	1,4
1250	87,2	87,9	85,0	87,2	85,4	88,5	88,4	85,4	86,1	84,5	87,4	86,0	1,4
1600	85,1	86,3	84,8	84,8	84,5	86,3	84,2	87,7	87,3	88,8	85,9	86,4	1,4
2000	87,9	86,3	86,8	86,1	88,0	86,8	84,6	85,8	87,5	88,0	87,5	87,3	1,0
2500	84,8	82,6	82,2	83,4	85,5	83,3	84,4	84,0	83,6	83,2	85,0	84,1	1,0
3150	81,1	80,1	79,8	80,5	79,8	82,0	78,9	81,5	81,4	83,2	80,4	80,5	1,1
4000	81,1	81,3	80,1	79,9	80,9	81,1	80,5	82,1	81,0	82,2	81,6	81,9	0,7
5000	83,6	81,7	81,5	81,3	81,9	82,3	81,6	82,0	82,6	81,7	84,3	84,1	1,1
Global (dB)	105,9	106,2	107,1	106,7	106,7	107,6	108,6	104,9	105,5	106,8	105,4	106,4	1,0

Tabla A..I.4. Ensayo 4 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de -8° aproximadamente _ Puntos de Medida.
M1b a M6b. Recinto Emisor. Nivel de Presión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1b-F1	M2b-F1	M3b-F1	M4b-F1	M5b-F1	M6b-F1	M1b-F2	M2b-F2	M4b-F2	M3b-F2	M5b-F2	M6b-F2	Desviación
100	90,6	94,3	95,7	88,2	92,2	96,1	89,1	92,4	94,5	90,9	93,5	96,0	2,7
125	92,4	92,8	97,6	92,8	88,2	100,5	92,2	89,9	96,9	92,2	90,3	99,1	3,9
160	98,7	89,0	95,9	97,9	82,1	101,7	97,7	83,4	96,8	98,4	91,6	98,8	6,4
200	93,8	97,3	97,4	93,1	97,7	98,9	91,2	97,9	98,8	97,0	100,4	100,4	2,9
250	99,2	99,4	97,2	99,6	100,0	99,5	101,3	102,2	100,9	101,3	101,9	99,5	1,4
315	95,0	99,5	98,2	96,2	98,9	93,9	95,7	99,0	97,8	99,1	100,8	96,4	2,1
400	91,7	93,7	96,3	92,6	96,1	96,7	91,6	94,1	96,8	92,8	94,2	97,5	2,1
500	90,3	87,6	92,9	87,6	89,4	92,6	92,3	86,7	88,7	90,0	90,7	97,6	3,0
630	84,9	87,4	83,9	88,3	87,5	82,0	84,4	83,4	75,8	85,1	85,1	80,2	3,5
800	83,6	82,6	81,9	86,9	83,3	82,8	82,5	82,9	78,9	80,7	81,7	82,2	1,9
1000	84,3	87,0	85,7	85,3	88,7	86,8	85,6	87,6	86,0	84,6	84,6	86,1	1,3
1250	86,8	86,7	85,3	88,0	88,1	86,8	85,7	88,0	84,8	86,7	87,0	87,6	1,1
1600	87,2	87,1	88,6	87,4	85,2	83,8	86,4	86,6	84,9	85,6	86,7	87,0	1,3
2000	87,1	87,1	87,7	88,3	89,8	87,3	87,4	84,9	86,5	88,3	86,7	88,0	1,2
2500	84,1	83,5	83,4	85,0	84,0	84,3	85,0	82,4	81,9	85,4	84,0	82,7	1,1
3150	81,7	81,9	82,8	81,2	80,3	78,6	80,6	79,7	79,9	81,3	82,4	81,0	1,2
4000	81,2	81,6	81,5	81,9	82,6	79,5	81,0	80,5	79,7	80,7	80,0	82,0	0,9
5000	83,5	81,7	81,9	83,5	84,8	82,3	82,9	82,4	81,6	82,2	82,9	81,6	1,0
Global (dB)	105,1	105,9	106,5	105,2	105,8	108,0	105,5	106,3	107,0	106,5	107,3	108,0	1,0

Tabla A.1.5. Ensayo 1 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de 8° aproximadamente _ Puntos de Medida. M1a a M6a. Recinto Receptor. Nivel de Presión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1a a M6a. Recinto Receptor. Nivel de Presión Sonora (dB)														Desviación
	M1a-F1	M2a-F1	M3a-F1	M4a-F1	M5a-F1	M6a-F1	M1a-F2	M2a-F2	M4a-F2	M3a-F2	M5a-F2	M6a-F2	M6a-F2	M6a-F2	
100	94,3	92,3	88,3	81,5	83,0	92,2	92,8	89,2	80,7	84,1	90,5	94,4	94,4	5,0	
125	93,1	88,0	91,1	94,9	90,7	89,8	90,1	83,5	93,8	94,0	88,9	93,3	93,3	3,2	
160	94,1	97,7	106,1	107,2	102,8	93,9	92,2	95,6	105,3	107,2	103,8	94,2	94,2	5,9	
200	99,3	99,9	98,2	92,6	98,5	99,5	95,5	95,7	93,1	95,4	98,4	97,2	97,2	2,5	
250	93,8	94,7	95,4	93,7	100,0	96,8	94,8	96,2	95,7	93,2	98,8	91,6	91,6	2,4	
315	102,3	102,7	99,4	93,2	100,0	102,1	100,1	100,7	97,2	91,0	97,9	100,0	100,0	3,6	
400	98,6	99,3	98,7	97,9	98,2	100,7	98,5	98,1	97,9	97,8	97,8	98,8	98,8	0,8	
500	92,2	88,6	96,2	94,5	96,5	90,0	90,7	86,1	94,1	93,5	95,6	89,3	89,3	3,3	
630	84,3	85,0	86,7	87,0	82,7	83,0	85,6	84,9	89,7	87,1	85,7	83,0	83,0	2,0	
800	85,1	83,2	83,3	83,7	84,7	83,7	87,4	86,4	88,1	87,2	88,2	85,5	85,5	1,9	
1000	87,3	87,3	87,4	87,6	89,1	87,4	87,1	86,0	86,3	85,6	90,4	86,7	86,7	1,3	
1250	88,4	89,4	88,3	90,8	91,1	89,5	87,9	87,8	89,8	86,2	87,2	85,9	85,9	1,7	
1600	86,2	87,7	85,5	85,8	89,3	87,4	85,5	85,2	87,4	85,6	87,4	86,5	86,5	1,2	
2000	86,9	86,5	86,9	87,2	87,0	87,3	88,0	86,5	86,0	87,0	87,2	86,7	86,7	0,5	
2500	85,0	83,3	85,1	84,8	83,7	86,0	85,3	85,4	85,1	84,1	83,1	83,8	83,8	0,9	
3150	80,3	80,3	81,1	80,3	81,0	80,8	80,5	81,8	80,6	83,0	82,7	81,3	81,3	0,9	
4000	81,9	81,9	82,1	81,4	81,9	81,1	82,2	82,5	81,3	83,9	81,8	82,5	82,5	0,7	
5000	82,0	82,6	83,6	83,1	83,0	83,6	84,4	83,8	82,6	85,3	83,5	83,5	83,5	0,9	
Global (dB)	107,1	107,4	109,0	108,8	108,1	107,4	105,6	105,7	107,9	108,8	108,0	105,9	105,9	1,2	

Tabla A..I.6. Ensayo 2 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de 8° aproximadamente _ Puntos de Medida. M1b a M6b. Recinto Receptor. Nivel de Presión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1b-F1	M2b-F1	M3b-F1	M4b-F1	M5b-F1	M6b-F1	M11b-F2	M2b-F2	M4b-F2	M3b-F2	M5b-F2	M6b-F2	Desviación
100	94,5	91,1	84,0	81,8	87,8	92,4	94,9	93,5	90,3	84,2	81,1	87,8	4,9
125	93,6	85,5	89,7	95,2	91,7	88,3	94,5	90,0	88,1	93,3	94,3	83,0	3,9
160	99,4	89,5	102,8	107,4	106,4	97,7	99,1	92,0	103,1	106,8	106,1	95,3	6,0
200	95,8	95,8	94,3	92,4	97,9	97,7	99,0	99,8	99,8	94,8	95,3	99,0	2,4
250	94,1	95,4	96,8	90,0	97,8	96,6	94,1	93,9	96,3	90,6	98,6	99,6	2,9
315	97,5	101,1	99,7	93,2	94,7	100,5	100,3	103,2	102,1	95,3	96,9	102,0	3,3
400	97,8	97,9	97,5	98,1	97,7	98,8	98,0	99,9	99,3	98,5	97,1	99,7	0,9
500	93,5	82,5	93,2	93,2	95,3	90,3	94,9	84,1	94,9	95,0	96,0	91,5	4,4
630	85,5	85,4	86,8	86,7	89,2	82,2	82,0	86,1	83,1	87,4	86,7	82,3	2,4
800	89,2	85,8	88,3	83,8	89,5	86,0	85,6	83,1	83,4	81,8	84,9	82,5	2,6
1000	88,5	84,9	88,8	85,8	87,7	89,3	86,3	87,7	86,1	86,9	87,9	87,8	1,3
1250	88,2	88,4	88,6	88,1	87,4	86,6	87,3	89,9	87,7	88,0	87,7	91,3	1,2
1600	86,4	86,8	87,5	86,5	86,8	86,2	86,2	88,2	85,2	83,6	85,7	87,2	1,2
2000	88,0	87,3	87,2	87,9	88,3	87,1	87,0	86,6	85,4	86,8	86,5	86,7	0,8
2500	83,8	82,8	84,2	84,3	83,4	85,1	85,3	84,2	82,2	84,9	84,0	85,6	1,0
3150	81,6	80,7	82,5	82,3	80,8	81,8	80,2	80,0	80,1	80,8	81,2	80,0	0,9
4000	82,4	81,6	83,1	82,1	80,6	81,3	80,7	81,2	81,5	81,1	82,5	81,9	0,8
5000	82,8	83,3	84,3	82,8	84,3	83,8	82,7	82,9	82,9	83,7	84,0	82,2	0,7
Global (dB)	106,2	105,4	107,1	108,8	108,8	106,5	107,1	107,4	108,4	108,6	108,6	107,3	1,1

Tabla A..1.7. Ensayo 3 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de -8° aproximadamente _ Puntos de Medida. M1a a M6a. Recinto Receptor. Nivel de Presión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1a-F1	M2a-F1	M3a-F1	M4a-F1	M5a-F1	M6a-F1	M1a-F2	M2a-F2	M4a-F2	M3a-F2	M5a-F2	M6a-F2	Desviación
100	94,7	92,8	83,4	85,4	92,7	89,7	93,9	89,8	85,0	87,2	91,0	95,0	4,0
125	94,8	88,3	92,1	88,2	91,6	88,2	92,9	83,7	90,2	91,5	87,7	94,1	3,2
160	98,0	96,4	105,4	101,5	96,1	103,2	98,2	95,5	103,2	105,7	102,2	97,2	3,7
200	99,4	99,7	92,1	96,7	99,7	97,8	95,5	95,3	92,7	94,8	98,0	96,0	2,6
250	94,9	94,2	94,3	99,0	96,6	94,2	94,6	95,2	94,9	93,3	97,7	90,8	2,1
315	100,3	103,0	97,5	101,1	101,7	101,5	98,2	100,1	98,8	94,9	98,9	100,1	2,2
400	98,0	99,3	96,7	97,4	100,0	97,4	98,1	97,2	96,1	96,5	97,5	99,0	1,2
500	95,9	85,8	94,7	94,5	94,1	93,6	94,3	84,5	92,0	93,4	93,6	92,4	3,5
630	83,1	85,9	86,1	83,4	83,2	85,4	85,0	86,3	88,5	85,2	86,6	83,4	1,7
800	85,0	82,8	83,6	85,5	83,2	83,2	88,2	86,9	89,0	86,7	89,2	86,0	2,3
1000	86,7	87,4	88,1	88,2	88,8	86,7	87,9	85,9	87,1	85,4	90,4	86,8	1,3
1250	88,3	89,6	89,5	90,9	90,5	89,4	89,1	87,1	87,3	87,9	86,8	85,6	1,6
1600	86,6	87,5	85,5	88,1	86,8	86,2	85,7	86,4	88,0	87,6	87,7	86,5	0,9
2000	87,5	86,9	86,0	87,5	89,7	87,0	89,3	87,5	86,1	85,5	85,6	88,8	1,4
2500	84,7	83,3	83,8	83,4	85,7	83,9	83,2	84,6	83,8	82,9	82,9	84,4	0,9
3150	80,2	79,4	81,6	80,6	80,1	79,4	80,9	81,1	81,5	80,7	81,8	80,7	0,8
4000	81,8	81,5	81,5	83,2	81,2	82,9	81,8	82,7	83,1	84,3	83,5	82,4	1,0
5000	82,1	82,7	83,1	83,8	82,2	82,6	82,2	82,9	83,1	83,4	83,5	82,7	0,5
Global (dB)	107,2	107,4	107,7	107,4	107,5	107,7	106,1	105,2	106,7	107,7	107,3	106,3	0,8

Tabla A..I.8. Ensayo 4 con un ángulo de inclinación de trayectoria del micrófono de -8° aproximadamente _ Puntos de Medida. M1b a M6b. Recinto Receptor. Nivel de Presión Sonora (dB)

Frecuencia (Hz)	M1b-F1	M2b-F1	M3b-F1	M4b-F1	M5b-F1	M6b-F1	M11b-F2	M2b-F2	M4b-F2	M3b-F2	M5b-F2	M6b-F2	Desviación
100	95,0	91,6	86,1	83,8	89,9	92,8	95,8	93,5	90,3	86,9	84,0	89,5	4,0
125	95,3	86,5	88,8	92,4	89,3	88,7	95,9	91,2	87,7	90,8	90,5	82,5	3,7
160	102,4	84,5	102,0	105,8	104,3	95,8	102,1	90,4	102,6	105,2	102,8	93,6	6,7
200	95,4	95,8	93,4	92,1	97,1	97,2	98,9	100,2	97,5	94,1	95,9	98,9	2,4
250	94,5	94,7	95,6	91,2	97,4	96,2	95,3	93,9	94,5	90,9	98,3	98,9	2,5
315	96,0	100,0	99,4	96,4	96,8	100,4	98,5	103,1	102,0	98,1	99,6	102,4	2,4
400	96,7	97,8	96,1	95,7	96,5	98,7	97,0	99,7	97,6	96,3	96,5	99,7	1,4
500	95,0	86,4	91,3	91,6	94,3	88,0	96,6	89,3	93,1	93,7	95,4	89,2	3,2
630	84,9	85,7	88,2	84,8	88,3	83,7	83,1	85,6	85,1	85,4	84,5	83,3	1,7
800	89,3	85,8	89,1	84,8	89,7	85,6	84,8	83,1	83,6	81,3	85,7	82,4	2,7
1000	87,4	85,0	87,8	86,8	88,5	89,3	85,8	87,9	86,8	87,6	87,4	87,7	1,1
1250	87,9	87,7	85,8	88,1	85,9	87,4	86,9	89,7	88,9	87,2	88,2	90,8	1,4
1600	85,6	86,5	87,9	87,6	87,7	85,2	86,3	87,4	85,5	86,3	87,4	87,3	0,9
2000	86,8	88,4	86,4	87,0	85,7	88,0	86,7	86,4	86,4	87,1	86,6	86,6	0,7
2500	82,5	82,3	84,3	83,4	84,8	84,8	85,5	84,0	84,1	83,8	83,3	85,0	1,0
3150	79,7	81,1	82,0	82,3	81,2	81,8	79,6	80,0	80,0	80,5	81,7	79,7	1,0
4000	81,8	83,0	82,4	83,7	83,1	82,1	81,6	81,3	81,6	80,6	82,3	82,2	0,8
5000	81,6	83,3	83,5	84,6	82,5	83,3	81,7	82,6	82,8	82,0	83,6	83,2	0,9
Global (dB)	106,9	105,0	106,3	107,6	107,7	106,2	107,7	107,4	107,6	107,6	107,3	107,2	0,8

Tabla A.1.9. Niveles de presión sonora tras la ubicación de sistema automatizado en reverberante de tamaño reducido. Puntos 1 a 15. Fte.

f(Hz)	pto 15	pto 14	pto 13	pto 12	pto 11	pto 10	pto 9	pto 8	pto 7	pto 6	pto 5	pto 4	pto 3	pto 2	pto 1
100	92,4	92,2	91,7	90,6	89,9	88,6	87,4	86,6	84,7	82,0	79,4	79,3	82,5	84,9	86,4
125	96,1	94,9	93,2	90,9	88,6	86,6	86,7	88,4	90,2	92,5	94,5	96,4	98,1	98,7	99,3
160	102,8	101,4	98,8	95,4	93,6	95,0	97,5	99,4	101,4	103,4	104,6	106,0	107,7	107,9	108,2
200	92,6	94,6	97,6	99,3	100,9	101,0	101,0	101,5	100,9	100,5	98,4	96,6	95,2	95,5	96,3
250	93,9	94,5	95,4	96,2	97,1	97,3	97,8	97,7	96,9	96,7	95,3	94,4	93,7	93,8	93,9
315	97,4	98,5	99,0	97,3	95,3	91,8	89,1	90,8	96,3	99,5	101,5	102,2	101,1	98,6	95,7
400	95,8	96,6	97,4	96,5	95,5	93,6	93,5	93,6	95,0	96,5	97,9	100,7	101,7	103,6	104,6
500	96,0	94,8	94,9	96,3	97,3	98,5	99,5	99,7	100,5	99,8	99,4	99,2	99,0	99,1	98,2
630	90,8	91,1	91,2	91,1	90,6	90,6	90,9	91,2	91,8	92,3	92,6	93,0	93,0	93,0	92,2
800	88,0	87,0	87,5	88,2	88,0	86,9	87,1	87,0	86,9	86,3	85,8	85,8	85,4	84,3	84,8
1000	88,1	87,8	88,8	89,3	88,5	87,8	87,3	86,9	87,3	87,4	87,1	88,5	89,4	88,7	87,2
1250	91,3	91,1	91,2	93,3	91,8	91,1	92,2	91,6	91,1	90,3	89,5	92,4	90,4	90,1	90,8
1600	87,2	90,5	89,3	90,8	90,0	89,6	89,4	89,8	88,8	89,7	90,9	89,9	89,5	90,9	91,8
2000	87,2	87,0	86,3	87,6	86,8	88,5	90,0	89,9	89,0	88,3	87,5	88,0	87,4	88,8	89,4
2500	86,7	86,4	87,3	86,3	86,2	87,5	89,1	89,5	88,0	89,7	88,3	86,8	87,1	89,8	90,5
3150	84,0	83,5	84,3	83,8	84,2	84,0	83,5	83,7	84,4	84,1	84,5	84,4	85,0	85,0	85,8
4000	85,6	86,3	86,1	85,4	84,9	85,0	85,3	85,4	85,7	85,7	86,1	85,6	87,0	86,4	86,8
5000	87,8	86,9	87,7	86,9	86,2	87,3	88,0	88,2	87,8	88,5	87,5	87,6	87,1	87,4	89,1
6300	87,9	87,8	88,0	88,3	88,3	88,1	88,1	88,7	88,3	88,3	88,3	88,6	89,0	89,8	88,8
8000	88,1	88,1	87,2	88,2	88,3	88,6	88,8	88,8	89,2	89,5	89,3	89,0	89,2	89,2	89,1
10000	87,1	87,9	87,1	88,0	87,6	87,5	88,0	87,5	87,8	87,6	88,0	88,0	89,1	89,1	88,8

Tabla A.1.10. Niveles de presión sonora tras la ubicación de sistema automatizado en reverberante de tamaño reduciré. Puntos 16 a 29.
Fuente 1

f(Hz)	pto 29	pto 28	pto 27	pto 26	pto 25	pto 24	pto 23	pto 22	pto 21	pto 20	pto 19	pto 18	pto 17	pto 16
100	90,7	91,0	91,7	92,2	92,3	92,9	93,3	93,2	93,2	93,6	93,8	93,3	93,4	93,1
125	93,1	94,1	95,3	95,8	96,5	97,2	97,5	98,0	98,2	98,5	98,2	98,3	97,7	97,3
160	96,7	97,9	99,7	100,6	102,1	102,7	104,0	104,6	105,4	105,3	105,7	105,2	104,9	103,8
200	89,6	90,0	89,7	92,1	90,8	89,9	90,1	91,5	93,7	94,9	94,4	93,5	93,3	92,2
250	91,5	91,3	91,8	92,6	93,8	95,2	96,4	96,6	95,6	94,6	94,1	93,9	93,7	93,8
315	92,0	92,7	94,1	95,9	97,7	99,3	99,8	98,9	95,3	90,7	86,2	89,9	92,9	95,9
400	102,6	102,8	102,8	101,8	100,8	98,6	94,4	92,1	94,7	96,4	97,2	96,2	95,5	94,7
500	95,4	95,2	96,1	96,5	97,4	98,1	98,8	99,0	98,2	97,3	97,0	96,7	96,5	96,3
630	92,1	92,5	92,5	92,8	91,7	90,6	90,8	91,8	91,1	90,7	89,7	90,0	90,3	90,9
800	85,4	84,6	83,1	82,6	82,6	83,1	84,1	84,6	85,0	85,7	87,4	88,4	88,5	88,7
1000	88,1	89,3	88,8	88,2	87,7	88,5	88,9	88,6	88,0	86,7	86,4	87,6	88,0	88,0
1250	91,4	92,2	92,2	90,8	88,9	90,4	91,9	92,8	91,9	88,9	89,1	90,6	90,4	89,9
1600	89,3	89,6	88,2	87,8	88,6	88,7	88,3	88,7	90,5	88,8	88,4	89,5	90,2	89,6
2000	88,4	88,3	88,1	87,7	88,7	86,9	88,6	88,4	88,2	87,8	88,4	89,0	88,7	88,0
2500	87,8	87,2	87,1	88,4	88,5	88,7	87,7	87,2	89,0	86,7	87,0	88,4	86,7	88,9
3150	83,0	83,6	82,4	83,3	83,6	83,3	83,2	83,3	84,2	83,5	83,8	82,7	83,1	83,6
4000	85,0	86,8	85,5	85,2	86,3	84,8	84,7	85,3	85,5	84,5	85,0	85,7	85,4	85,9
5000	87,2	87,0	87,2	86,6	87,7	87,6	87,4	87,3	86,8	86,8	86,7	86,8	87,3	87,2
6300	88,2	88,1	87,5	88,3	87,9	88,0	88,8	88,5	88,1	88,5	87,7	88,9	88,1	87,8
8000	88,7	88,0	88,8	88,3	88,4	88,1	88,2	88,5	88,5	88,0	87,5	87,5	87,5	88,4
10000	88,0	88,3	88,0	87,7	87,0	87,7	87,2	87,8	88,2	87,3	87,2	87,3	87,3	87,7

Tabla A.1.1.1. Niveles de presión sonora tras la ubicación de sistema automatizado en reverberante de tamaño reducido. Puntos 30 a 39. Fuente: 1

f(Hz)	pto 39	pto 38	pto 37	pto 36	pto 35	pto 34	pto 33	pto 32	pto 31	pto 30
100	86,6	85,8	84,1	80,7	78,3	81,8	85,3	87,7	89,4	90,1
125	99,7	99,2	97,9	96,5	93,3	88,5	82,6	85,6	89,6	92,0
160	108,5	107,7	107,3	105,4	103,2	100,8	96,4	92,2	91,9	94,9
200	96,3	96,5	96,6	95,7	94,2	91,6	89,4	88,5	89,0	89,9
250	92,6	93,0	94,5	96,8	98,5	98,3	97,9	96,1	94,3	92,9
315	91,3	91,5	93,1	95,4	97,5	97,6	97,5	95,8	94,2	92,9
400	104,5	105,6	105,8	105,0	103,9	101,4	101,5	102,0	102,8	103,1
500	96,3	97,6	98,7	99,8	100,6	101,0	100,2	98,8	97,4	96,1
630	91,6	93,1	94,2	93,4	91,7	89,1	90,1	92,1	91,4	91,9
800	84,5	85,6	86,8	87,9	88,1	86,6	85,9	86,3	87,1	86,7
1000	87,5	88,8	89,0	88,5	87,5	89,1	88,8	88,7	87,2	87,0
1250	90,0	89,8	91,0	92,5	91,6	92,2	93,2	93,1	91,5	90,8
1600	89,5	87,9	88,9	89,0	91,2	89,8	89,1	89,1	89,1	89,2
2000	88,3	87,3	87,7	88,1	88,1	87,3	88,9	88,4	87,7	88,3
2500	88,8	87,4	88,5	87,6	87,0	87,6	88,9	88,7	89,0	87,9
3150	83,4	83,9	84,0	83,8	82,6	81,8	83,0	81,5	81,9	82,8
4000	85,2	85,8	86,4	85,4	84,8	85,7	85,5	85,0	84,9	85,0
5000	86,8	87,7	87,2	88,1	87,7	87,5	86,9	87,0	87,4	87,2
6300	89,1	88,4	88,3	88,6	88,5	88,6	88,7	88,7	88,1	88,7
8000	89,1	89,7	88,9	88,1	88,3	88,6	88,2	87,7	88,5	88,7
10000	87,6	88,8	88,6	88,4	87,3	87,0	87,7	86,8	88,2	87,7

Tabla A.1.12. Niveles de presión sonora tras la ubicación de sistema automatizado en reverberante de tamaño reduciré. Puntos 1 a 15. Fte

f(Hz)	pto 1	pto 2	pto 3	pto 4	pto 5	pto 6	pto 7	pto 8	pto 9	pto 10	pto 11	pto 12	pto 13	pto 14	pto 15
100	93,2	94,0	94,5	94,7	95,2	95,7	95,4	95,6	95,2	94,8	94,4	94,0	93,5	92,4	92,4
125	101,4	102,5	103,5	103,4	104,1	103,8	103,8	103,4	103,3	102,3	101,4	99,5	98,6	97,2	97,2
160	100,5	101,7	102,6	102,8	103,7	103,6	104,0	104,3	103,9	104,1	103,6	103,3	102,7	102,3	101,8
200	99,6	97,3	93,6	90,6	90,8	93,1	93,7	94,2	93,7	92,6	90,8	90,3	93,3	94,8	96,3
250	94,5	93,7	93,6	94,3	95,5	96,8	97,1	97,0	96,7	96,6	95,2	94,4	93,4	93,2	92,5
315	95,8	96,9	97,7	96,8	95,7	94,5	94,8	95,9	97,6	99,4	101,1	101,1	99,0	96,3	91,8
400	92,0	94,2	94,9	93,5	91,2	88,9	87,6	86,4	87,6	92,1	96,5	99,6	100,8	101,8	103,2
500	91,8	90,5	90,4	92,6	94,4	94,1	94,7	94,7	94,8	95,0	95,4	95,9	96,1	96,2	95,5
630	87,4	87,5	88,3	88,3	88,2	88,2	88,6	88,7	89,3	89,1	89,2	90,4	91,2	91,2	90,1
800	87,6	86,7	87,3	88,8	87,8	85,8	86,4	88,0	89,0	88,8	86,8	87,0	87,8	86,7	85,6
1000	88,0	88,2	88,4	89,0	90,9	90,1	87,8	88,2	90,1	90,9	90,6	91,8	91,3	89,7	89,5
1250	88,2	89,6	89,4	88,3	89,9	89,8	87,9	87,6	88,8	89,5	89,2	89,0	89,1	88,4	88,3
1600	89,3	89,4	90,0	89,8	89,0	89,4	89,3	92,3	92,4	89,4	89,0	90,3	88,9	89,2	88,9
2000	87,5	87,3	86,9	87,3	87,8	87,2	86,9	86,9	85,9	86,9	87,7	88,4	85,7	87,0	87,6
2500	85,8	86,9	85,8	85,7	86,5	86,6	86,7	86,7	84,8	87,0	87,2	86,9	85,9	86,4	87,7
3150	81,5	82,8	82,8	83,5	83,4	83,3	82,6	83,3	84,6	82,9	83,9	82,9	83,8	84,5	82,7
4000	85,0	85,2	84,7	85,2	85,2	85,7	85,2	85,2	85,2	85,1	85,0	85,3	85,8	85,5	84,7
5000	86,7	86,3	87,3	86,6	86,4	86,8	87,2	86,9	86,9	87,7	87,8	87,7	87,1	87,1	86,8
6300	88,6	87,4	88,2	87,6	88,1	88,0	88,1	88,1	87,9	88,5	87,9	87,6	87,1	87,5	88,2
8000	88,5	87,8	87,6	87,8	87,6	88,3	87,6	88,0	87,8	87,9	87,7	88,1	87,3	87,8	88,2
10000	86,8	87,3	88,1	87,6	87,0	86,9	86,8	86,6	87,1	87,5	87,5	86,9	87,4	87,6	87,0

Tabla A.1.13. Niveles de presión sonora tras la ubicación de sistema automatizado en reverberante de tamaño reduciré. Puntos 16 a 29. Fte 2

f(Hz)	pto 29	pto 28	pto 27	pto 26	pto 25	pto 24	pto 23	pto 22	pto 21	pto 20	pto 19	pto 18	pto 17	pto 16
100	88,5	88,8	88,2	87,9	86,1	83,2	80,0	81,4	85,3	87,7	89,3	90,9	91,9	92,5
125	104,2	103,9	103,9	103,1	102,3	100,5	97,8	94,1	88,7	90,2	94,3	96,9	98,9	100,2
160	105,5	105,6	105,4	105,3	104,9	104,2	103,0	101,6	100,4	99,9	99,6	99,6	100,3	100,5
200	93,9	93,8	94,0	93,8	94,8	96,4	98,9	100,0	101,8	102,0	101,9	102,4	102,7	100,9
250	95,0	94,8	95,0	95,0	95,4	95,9	95,7	95,2	94,1	92,8	93,3	94,2	95,0	94,5
315	91,9	91,9	93,5	95,0	97,1	98,7	99,2	99,0	97,0	94,7	92,5	92,2	93,4	94,4
400	103,8	103,5	102,8	102,4	101,5	99,1	94,0	92,0	95,8	97,1	96,8	94,7	91,9	89,9
500	95,7	95,3	94,9	95,1	95,2	95,2	95,3	94,5	93,4	92,4	92,8	93,1	93,7	93,0
630	91,5	91,5	92,0	92,4	92,2	90,6	89,5	90,5	89,8	89,6	89,0	88,7	88,4	88,0
800	87,3	86,8	86,6	86,9	86,7	86,7	86,6	86,8	87,5	87,8	87,9	87,3	86,9	87,0
1000	89,9	90,1	89,9	89,3	88,4	89,2	90,5	90,7	91,0	91,1	91,2	89,9	88,4	88,5
1250	89,2	88,7	88,2	87,7	87,5	89,2	88,6	89,1	87,5	87,9	89,6	90,6	90,6	89,5
1600	89,0	89,3	90,3	90,8	93,4	91,4	89,1	87,5	86,9	88,8	90,0	90,0	89,9	89,6
2000	89,3	89,7	88,7	88,0	89,4	88,7	87,2	87,3	87,1	87,4	87,9	88,1	87,5	87,2
2500	87,4	88,3	87,0	86,0	87,1	88,8	86,7	87,0	87,8	86,1	87,0	86,3	86,0	85,7
3150	85,3	85,9	85,2	83,5	82,8	83,5	83,1	83,4	83,2	82,6	82,8	83,2	83,4	83,4
4000	86,6	87,4	86,6	86,6	85,2	85,3	85,7	85,4	84,9	85,5	84,0	85,6	84,3	84,6
5000	86,9	88,2	87,4	87,7	86,1	86,6	86,5	87,4	86,8	86,6	86,4	86,4	86,8	86,3
6300	88,0	89,0	89,0	88,0	87,7	88,4	88,2	88,7	87,7	88,3	88,1	88,4	88,8	88,4
8000	88,4	88,3	90,0	88,7	87,6	89,0	88,5	87,4	87,3	87,6	88,3	88,1	88,3	88,1
10000	87,2	87,6	88,6	87,0	87,9	87,7	87,1	87,3	87,1	87,0	87,7	87,4	87,4	86,5

Tabla A.1.14. Niveles de presión sonora tras la ubicación de sistema automatizado en reverberante de tamaño reducido. Puntos 30 a 39. Fie 2

f(Hz)	pto 39	pto 38	pto 37	pto 36	pto 35	pto 34	pto 33	pto 32	pto 31	pto 30
100	91,2	90,5	89,6	87,0	84,0	80,9	82,6	85,7	87,2	88,1
125	95,3	94,7	94,0	95,3	97,8	99,4	101,4	102,9	103,8	103,7
160	101,5	101,2	100,3	100,0	100,3	101,7	103,1	104,2	104,9	105,2
200	97,4	97,7	97,2	95,6	94,1	93,0	92,3	92,9	93,7	93,9
250	90,1	88,6	88,8	92,5	95,8	97,4	97,2	96,3	95,8	95,4
315	85,5	87,4	91,5	94,2	96,2	97,2	96,3	95,0	93,8	92,4
400	103,9	103,1	103,1	103,0	101,8	101,6	101,6	102,3	103,0	103,5
500	94,2	94,1	96,5	98,4	100,2	100,3	99,7	99,3	97,8	96,5
630	88,7	89,7	91,2	91,6	89,9	88,0	88,4	89,8	90,6	91,1
800	85,3	85,8	86,9	87,2	86,7	87,2	86,8	87,6	87,9	87,6
1000	89,8	90,3	89,9	89,8	88,4	88,5	89,5	89,9	89,5	89,3
1250	89,3	88,9	88,6	90,1	89,3	89,4	89,6	89,7	89,5	89,1
1600	89,1	88,8	90,6	90,4	91,1	88,8	89,3	88,5	90,1	90,4
2000	87,2	88,0	88,6	87,9	87,4	88,0	87,1	88,6	89,0	89,0
2500	87,2	88,0	85,7	87,4	87,0	86,4	86,8	87,5	86,8	87,7
3150	82,9	83,0	81,8	82,9	82,6	83,5	83,4	84,2	83,1	84,0
4000	85,7	84,7	84,1	85,4	85,7	85,9	85,2	85,8	85,0	84,7
5000	86,9	86,7	85,8	86,5	86,1	87,2	87,3	87,3	87,0	85,9
6300	87,7	87,8	87,9	88,0	87,6	88,2	87,9	88,6	88,2	88,1
8000	87,4	87,9	87,5	87,5	88,0	88,4	88,9	88,7	87,9	88,0
10000	87,4	87,1	86,9	86,8	87,4	87,1	87,7	88,1	87,9	88,0

Anexo 2. Instrumentación empleada.

En cámara de transmisión de tamaño reducido

Durante el proceso de evaluación acústica y puesta en marcha de la cámara de transmisión de tamaño reducido se utiliza la siguiente instrumentación:

Sonómetro Bruel and Kjaer tipo 2250. SN: 2506776

Micro ½” Bruel & Kjaer tipo 4189. SN: 2534152

Preamplificador Bruel & Kjaer ZC0032. Id No 4359



Sonómetro Bruel & Kjaer tipo 2250. SN: 2506623

Micro ½” Bruel & Kjaer tipo 4189. SN: 2529815

Preamplificador Bruel & Kjaer ZC0032. Id No 4359



Calibrador sonoro Bruel & Kjaer tipo 4231. SN: 2528304



Anemómetro tipo TESTO 410-2. SN: 38518481/006



Altavoz Genelec 6010ª. SN: PM6056558

Altavoz Genelec 6010ª. SN: PM6056560



Cámara IP recinto emisor modelo AP-PIP01WV4/200899 y software asociado

Cámara IP recinto emisor modelo AP-PIP01WV4/200894 y software asociado



Acelerómetro Bruel & Kjaer tipo 4370. SN: 1850803

Acelerómetro Bruel & Kjaer tipo 4370. SN: 1850804



Calibrador de acelerómetros Bruel & Kjaer tipo 4294. SN: 2543690



Excitador mecánico (shaker) TIRA GmbH. SN: 217/04
Sensor de fuerza Endevco 2311-300. SN: 3824.



Martillo de impactos Bruel&Kjaer tipo 8206. SN: 54626



DSP 01dB - Stell Symphonie. N° 00282



Plataforma PULSE de Bruel&Kjaer tipo 3560-c. SN: 2433879



Asociado a la instrumentación empleada se utilizaron cables de conexión necesarios entre instrumentos, soportes de micrófonos y acelerómetros adecuados e incluso material de bricolaje tal como, caladoras, taladros, lijadoras, cuchillas y otros materiales, que nos permite cortar y adecuar las muestras a ensayo a las dimensiones de nuestra cámara de tamaño reducido.

En cámara reverberante de tamaño reducido

Durante el proceso de evaluación acústica y puesta en marcha de la cámara reverberante de tamaño reducido se utiliza la siguiente instrumentación:

Sonómetro Bruel and Kjaer tipo 2250. SN: 2506776

Micro ½” Bruel & Kjaer tipo 4189. SN: 2534152

Preamplificador Bruel & Kjaer ZC0032. Id No 4359



Cámara IP recinto emisor modelo AP-PIP01WV4/200801 y software asociado



Altavoz Genelec 6010^a. SN: PM6056558

Altavoz Genelec 6010^a. SN: PM6056560



Anemómetro tipo TESTO 410-2. SN: 38518481/006



Calibrador sonoro Bruel & Kjaer tipo 4231. SN:
2528304



Asociado a la instrumentación empleada se utilizaron cables de conexión necesarios entre instrumentos, soportes de micrófonos y acelerómetros adecuados e incluso material de bricolaje tal como, caladoras, taladros, lijadoras, cuchillas y otros materiales, que nos permite cortar y adecuar las muestras a ensayo a las dimensiones de nuestra cámara de tamaño reducido.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Nuevos materiales, modelos y técnicas
de caracterización en acústica de la edificación
y acústica medioambiental**

Laura Bertó Carbó

El presente estudio se enmarca en el contexto de la acústica en la edificación y de la acústica medioambiental. Su principal objetivo es la evaluación, validación y puesta en marcha de laboratorios de tamaño reducido, en los cuales se obtendrán parámetros acústicos esenciales para la caracterización de nuevos materiales ecoinnovadores, soluciones constructivas y barreras acústicas. Estos resultados serán comparables a los obtenidos en laboratorios de grandes dimensiones. Así pues, se convierten en potentes herramientas en el campo de la investigación, ya que nos permiten realizar ensayos con el 2.5% o 3% de la cantidad de material necesaria habitualmente. Esta reducción supone un ahorro importante, tanto desde el punto de vista de fabricación de material como desde el punto de vista de transporte y evaluación del mismo.

El resultado del trabajo da una idea de la importancia que supone la utilización de estos laboratorios en procesos de desarrollo e investigación de nuevos productos y, como tal, se considera imprescindible abordar la necesidad de unificar criterios de construcción y fijar criterios de normalización en recintos acústicos de tamaño reducido dentro de la comunidad científica con la finalidad de homogeneizar resultados obtenidos independientemente del laboratorio de tamaño reducido empleado.