

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA



MODELIZACIÓN DEL RUIDO TRANSMITIDO  
POR FLANCOS EN LA EDIFICACIÓN EN  
NUEVAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

**TESIS DOCTORAL**

**AUTORA: ROMINA M<sup>a</sup> DEL REY TORMOS**

**DIRIGIDO POR:  
JESÚS ALBA FERNÁNDEZ  
JAIME RAMIS SORIANO**

**Noviembre 2009**



*Als meus pares, Paco i Pepa*



## RESUMEN

El ruido transmitido por flancos laterales en edificación es uno de los problemas importantes en su aislamiento acústico, por lo que es conveniente incorporar nuevas soluciones constructivas que permitan abrir el abanico de posibilidades. En este trabajo de Tesis se aborda ese problema.

En primer lugar se realiza una revisión importante de técnicas y modelos de medición y predicción del comportamiento acústico de materiales que pudiesen ser susceptibles de usarse en edificación. En esta línea nos hemos centrado sobre todo en dos posibilidades: materiales para usarlos como absorbentes acústicos y materiales para utilizarlos como lámina elástica en un suelo flotante. Se han estudiado varios tipos de materiales, sobre todo materiales reciclados o de fibras naturales, de los que se han obtenido sus características necesarias para valorar si son absorbentes acústicos, e incluso se han obtenido modelos propios de nuevos materiales. También se estudian diferentes reciclados y láminas valorando si son eficientes en un suelo flotante. Se presenta, pues, un estudio de nuevos materiales para edificación que permita aumentar la variedad o que sirva para reutilizar o reciclar otros productos o deshechos. Además, todo esto, estudiando la incertidumbre del ensayo en cada caso.

Otro bloque importante de la tesis lo conforma la puesta en marcha y validación de una técnica de medida "in situ" de las transmisiones laterales. Actualmente no existe ninguna técnica normalizada y sólo existen ensayos normalizados en laboratorio para ciertas soluciones constructivas. Se han medido cientos de configuraciones de uniones diferentes, combinando conexiones rígidas y elásticas de unión, y valorando también el efecto del suelo flotante. Se ha estudiado también la incertidumbre de este tipo de ensayos y en qué condiciones son válidos los resultados del ensayo. Con toda la información obtenida, se han obtenido algunas fórmulas ajustadas y diferentes conclusiones respecto a ciertas uniones.

Por último, se han incluido otras herramientas. Por un lado herramientas numéricas, para validar si a través del método de los elementos finitos se pueden realizar simulaciones del estado de una unión y así obtener la información necesaria para la transmisión lateral. Por otro, existen maquetas a escala donde se estudia el efecto de las transmisiones laterales para poder comparar con el caso real y obtener de forma controlada los parámetros que la modelan. Toda esta información se ha utilizado en el cálculo del aislamiento acústico máximo que se puede obtener en una cámara de transmisión en función del paramento a ensayar.

Por tanto, se ha contribuido en el desarrollo y validación de nuevos materiales absorbentes y nuevas láminas elásticas para edificación y se ha contribuido en el desarrollo de técnicas de medición y predicción de las pérdidas producidas en flancos laterales.



## RESUM

El soroll transmès per flancs laterals en edificació és un dels problemes importants en el seu aïllament acústic, pel que és convenient incorporar noves solucions constructives que permeten obrir el ventall de possibilitats. En aquest treball de Tesi s'aborda aquest problema.

En primer lloc es realitza una revisió important de tècniques i models de mesura i de predicció del comportament acústic de materials que poguessin ser susceptibles de ser utilitzats en edificació. En aquesta línia ens hem centrat sobretot en dues possibilitats: materials per a utilitzar-los com absorbents acústics i materials per a utilitzar-los com a làmina elàstica en un sòl flotant. S'han estudiat diferents tipus de materials, sobretot materials reciclats o de fibres naturals, dels quals s'han obtingut les seves característiques necessàries per a valorar si són absorbents acústics, i fins i tot s'han obtingut models propis de nous materials. També s'estudien diferents reciclats i làmines valorant si són eficients en un sòl flotant. Es presenta, doncs, un estudi de nous materials per a edificació que permeti augmentar la varietat o que serveixi per a reutilitzar o reciclar altres productes o desfets. A més, tot això, estudiant la incertesa associada a l'assaig en cada cas.

Altre bloc important de la tesi ho conforma l'engegada i validació d'una tècnica de mesura 'in situ' de les transmissions laterals. Actualment no existeix cap tècnica normalitzada i només existeixen assajos normalitzats en laboratori per a certes solucions constructives. S'han mesurat centenars de configuracions d'unions diferents, combinant connexions rígides i elàstiques d'unió, i valorant també l'efecte del sòl flotant. S'ha estudiat també la incertesa d'aquest tipus d'assajos i en quines condicions són vàlids els resultats de l'assaig. Amb tota la informació obtinguda, s'han obtingut algunes fórmules ajustades i diferents conclusions respecte a certes unions.

Finalment, s'han inclòs altres eines. D'una banda eines numèriques, per a validar si a través del mètode dels elements finits es poden realitzar simulacions de l'estat d'una unió i així obtenir la informació necessària per a la transmissió lateral. Per un altre, existeixen maquetes a escala on s'estudia l'efecte de les transmissions laterals per a poder comparar amb el cas real i obtenir de forma controlada els paràmetres que la modelen. Tota aquesta informació s'ha utilitzat en el càlcul de l'aïllament acústic màxim que es pot obtenir en una càmera de transmissió en funció del parament a assajar.

Per tant, s'ha contribuït en el desenvolupament i validació de nous materials absorbents i noves làmines elàstiques per a edificació i s'ha contribuït en el desenvolupament de tècniques de mesurament i predicció de les pèrdues produïdes en flancs laterals.



## SUMMARY

Noise transmitted by the sidewalls of buildings represents a major acoustic insulation problem and calls for the adoption of new construction solutions opening up a whole range of possibilities. The current thesis addresses this issue.

First, a major review of the techniques and measuring models was realized, along with a prediction of the acoustic behaviour of materials that are potential candidates for use in constructions. As part of this, we particularly focused on the following two items: Materials to be used as acoustic absorbents, as well as materials to be used as flexible sheets in floating floors. Various types of materials were studied, particularly recycled or natural fibre materials, in order to determine their characteristics, which is needed in order to assess whether they are acoustic absorbents, and in addition, separate models for new materials were obtained. Different recycle materials and sheets were studied for evaluation of their efficiency in floating floors. This, then, is a presentation of a study of new construction materials providing an increased variety or facilitating the reuse and recycling of other products or waste. Moreover, the test uncertainty was studied in each case.

Another important element of the thesis consisted in applying and validating an “in situ” measurement method for lateral transmissions. No standard techniques are currently available, and standard tests exist in laboratories only for some construction solutions. Hundreds of different joint configurations were measured, combining rigid and flexible joints, and assessing the effect of floating floors, as well. The uncertainty of this type of tests was also studied, as were the conditions under which the results of the test are valid. All the acquired information yielded formulas that were adjusted, and various conclusions concerning certain joints could be drawn.

Finally, several other tools were included. Numerical tools are available for validating whether the finite-element method enables simulation of the state of joints, and the information needed for lateral transmission is thus provided. Scale models for studying the effect of lateral transmissions in order to do real-life comparisons and obtain parameters for their modelling in a controlled fashion also exist. All of this information was used to calculate the maximum possible acoustic isolation in a transmission chamber as a function of the sidewall to be tested.

Thus, the thesis provides a contribution to the development and validation of new absorbent materials and new flexible construction sheets, including devising measurement techniques and the prediction of losses occurring in sidewalls.



## **AGRADECIMIENTOS**

En esta memoria de Tesis Doctoral aprovecho para agradecer a todas aquellas personas que me han ido acompañando durante todo este viaje de investigación, ayudándome y apoyándome en todo momento. Espero, de corazón, no dejarme a nadie.

Quiero agradecer en primer lugar a Jesús Alba, mi director de Tesis, el haberme introducido en el mundo de la Acústica, el haberme enseñado tanto durante todo este tiempo, el haber confiado en mí en todo momento y sobre todo, el haberme acompañado y apoyado de forma incondicional.

A Jaime Ramis, también director de Tesis, agradecerle su confianza depositada en mí y sus consejos.

A Eva Escuder, compañera del día a día, por sus sonrisas, sus consejos y su paciencia.

A Fernando Hernández, tal vez quien más haya sufrido mi compañía durante los ensayos en laboratorio. Gracias Fernando por toda la ayuda prestada, de corazón.

A Joan Cruaños, más que compañero amigo, por escucharme siempre que lo he necesitado.

Al Departamento de Física Aplicada, sobre todo al equipo directivo y al personal de Secretaría que siempre está disponible cuando se le necesita y hace fácil cualquier trámite burocrático.

A mis compañeros de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, darles las gracias por haberme hecho sentir desde el primer día, como parte de esa gran familia.



# ÍNDICE

<b>1. OBJETO Y ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estructura de la Tesis	5
<b>2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA</b>	<b>8</b>
2.1. Clasificación de materiales para edificación	8
2.1.1. Materiales absorbentes acústicos	11
2.1.1.1. Modelos predictivos	12
2.1.1.2. Técnicas de caracterización	20
2.1.2. Capas impermeables	32
2.1.3. Láminas flotantes	32
2.1.3.1. Diseño de un suelo flotante	32
2.1.3.2. Técnicas de ensayo de la rigidez dinámica	36
2.2. Aislamiento acústico en la edificación	42
2.2.1. Técnicas de ensayo “in situ”	42
2.2.1.1. Aislamiento acústico a ruido aéreo	42
2.2.1.2. Aislamiento acústico a ruido de impacto	46
2.2.2. Normativas reconocidas para la predicción del aislamiento acústico	48
2.2.2.1. Aislamiento acústico a ruido aéreo	48
2.2.2.2. Aislamiento acústico a ruido de impacto	57
2.2.2.3. Índice de reducción vibracional.	62
2.3. Normativa para la obtención del índice de reducción vibracional en laboratorio	68
2.4 El método de los elementos finitos	69

<b>3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES</b>	<b>72</b>
3.1. Materiales absorbentes acústicos	72
3.1.1. Técnicas de medición	72
3.1.1.1 Validación de un sistema de medida del coeficiente de absorción e impedancia en tubo de Kundt	72
3.1.1.2. Validación de un sistema de medida de resistencia al flujo	80
3.1.1.3. Campaña de ensayos de materiales	83
3.1.2. Modelos para materiales absorbentes acústicos	100
3.1.2.1 Incertidumbre en los modelos aceptados	101
3.1.2.2 Modelo empírico para varios materiales.	108
3.1.2.3 Modelo específico	115
3.2. Láminas flotantes y bandas elásticas	122
3.2.1. Técnicas de medición	122
3.2.1.1 Campaña de medición de materiales	127
<b>4. PREDICCIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO “IN SITU”</b>	<b>135</b>
4.1. Medición del índice de reducción vibracional	136
4.1.1 Medición de diferencia de velocidades	137
4.1.2 Medición del Tiempo de reverberación estructural	140
4.1.3 Comparativas con la normativa actual	141
4.1.4 Incertidumbre en la medida	167
4.2. Modelación numérica de las transmisiones laterales	185
4.2.1. Modelado 2D	186
4.2.1.1. Modelado 2D de uniones rígidas	186
4.2.1.2. Modelado 2D de uniones con bandas elásticas	193
4.2.1.3. Comparativa con normativa actual	196
4.3. Propuestas de formulación	202
4.3.1 Nuevas fórmulas para uniones rígidas	203
4.3.2 Nuevas fórmulas para uniones con elementos elásticos	205
4.4. Obtención del límite de medida en una cámara de transmisión	211

<b>5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS</b>	<b>218</b>
5.1. Conclusiones sobre caracterización de materiales	218
5.2. Conclusiones sobre transmisiones laterales	219
5.3. Líneas futuras	222
<b>REFERENCIAS</b>	<b>225</b>
<b>ANEXO I</b>	



# **CAPÍTULO 1: OBJETO Y ANTECEDENTES**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo general de este trabajo, que se presenta para su evaluación como tesis doctoral, es contribuir a la mejora de las predicciones del aislamiento en la edificación y se desarrolla en el contexto del proyecto de investigación coordinado entre la Universidad Politécnica de Valencia y la de Alicante, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología cuyas referencias son BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02.

Este objetivo general se centra en dos aspectos relacionados. Por un lado la caracterización de los materiales que forman parte de las particiones multicapa y de los suelos flotantes y, por otro, la determinación, con toda la problemática relacionada, de los índices de reducción vibracional que constituyen una cuantificación de la transmisión por flancos.

En efecto, el aislamiento acústico es uno de los grandes problemas que en la actualidad se plantea en la edificación de calidad. Las fuentes de ruido son cada vez más numerosas y emiten niveles más altos. Por ejemplo, el tráfico se ha incrementado notablemente en los últimos años aumentando el nivel de ruido en fachada de las distintas edificaciones. Actualmente esto se puede comprobar en los diferentes mapas de ruido planificados que se han realizado a nivel europeo, estatal y autonómico.

Además el nivel de ruido emitido por instalaciones dentro de las viviendas es mayor. El número de fuentes de ruido se ha incrementado: los electrodomésticos son más numerosos, ha aumentado la potencia acústica de los equipos de reproducción sonora, de la televisión, los sistemas de aire acondicionado, etc.

Al mismo tiempo se han ido incrementando las exigencias de confort del ciudadano, lo que se puede comprobar por el desarrollo legislativo que se ha llevado a cabo en los últimos años, publicándose el Reglamento de la Ley del Ruido y el Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación. Toda esta normativa busca disminuir el nivel máximo de

inmisión en diferentes hábitats, como los de vivienda y trabajo, para reducir el efecto del ruido en la salud de las personas.

En este desarrollo legislativo se han plasmado varias cuestiones. Por una parte la necesidad de tener datos concretos y conocimiento del comportamiento acústico de todos los materiales empleados en edificación cuyo fin último sea la reducción del ruido. Si se pretende utilizar un material en edificación, deben conocerse los valores de su resistencia al flujo, de su rigidez dinámica, su coeficiente de absorción, etc., en función de la aplicación que se espera de él. Por tanto, es necesaria una caracterización del material que nos permita obtener estos valores de detalle de la validez de éste. Esta caracterización implica una incertidumbre asociada a la técnica experimental utilizada.

Un valor añadido a este respecto es la sostenibilidad, la capacidad de reutilización y reciclado, e incluso el uso de materiales basados en componentes naturales. La utilización de materiales en la edificación debe tender hacia la búsqueda de soluciones que reduzcan por un lado la cantidad de material necesario para obtener un resultado similar, que permitan reutilizar o reciclar materiales de otros ámbitos, darle una nueva vida útil y usar nuevos elementos que aumenten la riqueza de soluciones en edificación. En esta línea, están apareciendo materiales nuevos, que deben investigarse para poder favorecer cuestiones medioambientales u otros aspectos ya comentados. La base experimental de materiales porosos y fibrosos así como algunas láminas flotantes estudiadas en este trabajo son en gran medida materiales reciclados u obtenidos a partir de fibras naturales siendo una peculiaridad destacable.

Otra de las cuestiones que también se ha impuesto es la importancia de la cuantificación de las transmisiones laterales. Las soluciones constructivas no implican sólo diseñar y validar el muro o la pared de separación en un laboratorio o en una cámara de transmisión sino que se deben tener en cuenta todos los elementos o flancos instalados finalmente en la edificación, y valorar la transmisión del ruido por los diferentes caminos que se crean en la solución final decidida. Esta solución final depende de la pared o paramento principal, y de

todos esos caminos que habrá que diseñar con el fin de que no disminuya la protección frente al ruido de las personas.

Para valorar estas transmisiones laterales existen diferentes posibilidades. En primer lugar, debe conocerse el comportamiento acústico de todos los elementos que componen la solución completa. Es decir, como mínimo, el aislamiento acústico de cada elemento y su masa por unidad de área. Este dato puede venir de un ensayo en cámara de transmisión o de herramientas informáticas validadas bajo un conjunto de hipótesis. Además debe aplicarse algún procedimiento que, a partir de los datos de cada elemento, y teniendo en cuenta las condiciones en las que se han instalado, nos permita obtener las pérdidas por flanco de cada camino posible y obtener el valor del aislamiento conjunto.

Esas condiciones de instalación llevan consigo unas condiciones de unión de las cuales depende en gran medida la solución final. Las pérdidas en la unión en las diferentes combinaciones de transmisión del ruido, se cuantifican de forma indirecta con un factor denominado “índice de reducción vibracional”. Como se ha comentado más arriba, este parámetro, todavía en estudio, es objeto también de esta tesis, dada la importancia que tiene en los resultados.

Para obtener un resultado del aislamiento del conjunto constructivo, suponiendo ya conocidos los valores de laboratorio, existen métodos normativos reconocidos como válidos para abordar ciertas soluciones constructivas en fase de diseño.

Una familia importante de normas son las UNE-EN 12354, donde se ofrecen diferentes métodos predictivos de soluciones de aislamiento. Para ello, la norma ofrece valores orientativos del “índice de reducción vibracional” en ciertos casos muy concretos y con condiciones muy limitadas. No ofrece solución a varias de las soluciones constructivas que han aparecido actualmente con la publicación del DB-HR del CTE. Por tanto, si este es el procedimiento a aplicar, deben tenerse en cuenta estas limitaciones y asumirlas aunque no sean válidas, ya que no ofrece valores válidos del índice citado.

Otra familia de normas, la UNE EN ISO 10848, ofrece métodos de ensayo en laboratorio de este “índice de reducción vibracional”. En este caso, el valor de ensayo sustituye a la predicción ofrecida por las normas anteriores para realizar

los cálculos. Sin embargo, estas normas sólo ofrecen la posibilidad de ensayo de ciertas soluciones constructivas, estando todavía por resolver, por ejemplo, las soluciones con entramados ligeros.

Actualmente no existe una norma reconocida para la medición del “índice de reducción vibracional” “in situ”. Diferentes investigadores han llegado a procedimientos similares bastante parecidos a las líneas de actuación que se marcan en la UNE-EN ISO 10848-1:2007. Dado que el “índice de reducción vibracional” es crítico en el cálculo final, podría medirse este parámetro en obra para tener datos reales con configuraciones que luego podrían volver a repetirse. La propuesta y validación de un protocolo para la medida del “índice de reducción vibracional” para su posterior uso y conseguir así disminuir errores de predicción constituye un objetivo de este trabajo.

Por último, además de las normativas, se pueden utilizar otras herramientas. Por un lado, existen herramientas informáticas para la predicción basadas en métodos numéricos. La técnica de los elementos finitos, por ejemplo, que permiten abordar el problema desde otra perspectiva. En este caso, las soluciones se ajustarán en la medida en que lo hagan los elementos básicos con los que se construye la solución y las condiciones de contorno y otras cuestiones que se asuman. Esta línea de trabajo también se aborda en la tesis con simulaciones en dos dimensiones. Por otra parte, la utilización de maquetas puede proporcionar información en una escala de trabajo más manejable. En este trabajo se presentan algunos resultados de medidas realizadas en una cruceta de hormigón cuyas conclusiones son de utilidad para construcciones reales.

## **1.2. OBJETIVOS**

Como se ha mencionado más arriba, el objetivo general de este trabajo es contribuir a la mejora de las predicciones del aislamiento en la edificación y se concreta en dos aspectos u ámbitos relacionados.

El primero, la caracterización de los materiales que forman parte de las particiones multicapa y de los suelos flotantes. En este ámbito, el objetivo general puede desglosarse o concretarse en los siguientes:

- Obtener los parámetros más relevantes que caracterizan acústicamente los materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de materiales reciclados.
- Modelar y validar, con la experimentación, modelos para materiales acústicos, centrándonos en los materiales absorbentes acústicos de nueva generación (reciclados, naturales, etc.).

En cuanto al segundo, la determinación del índice de reducción vibracional, el objetivo general puede concretarse en los siguientes:

- Diseñar un procedimiento de medida “in situ” de las transmisiones por flanco en diferentes configuraciones propuestas en el DB-HR del CTE, y valorar su validez (incertidumbre), en función de las tipologías.
- Modelar de forma numérica las transmisiones laterales y poder así mediante simulación numérica predecir el comportamiento acústico de soluciones constructivas completas.

### **1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS**

Para conseguir los anteriores objetivos, se ha optado por estructurar este trabajo en los siguientes apartados:

En el capítulo 1 se relatan los objetos y antecedentes de este trabajo y se describen los contenidos de cada una de las secciones.

En el capítulo 2 se exponen los fundamentos teóricos necesarios para la mejor comprensión de las aportaciones realizadas en esta memoria de tesis. Se han revisado varias referencias, y se han seleccionado y resumido en este capítulo. En la sección 2.1, se establece una clasificación de los materiales desde el punto de vista de la acústica de la edificación, y se describen las principales propiedades de estos materiales.

En la sección 2.2 se estudian los parámetros macroscópicos normalmente utilizados en aislamiento acústico y se resumen las diferentes normativas de base de las que se dispone para poder conocer el aislamiento acústico, tanto a ruido aéreo como a ruido de impacto. Estas normativas pueden describir técnicas de

ensayo para obtener diferentes parámetros de aislamiento acústico o modelos de cálculo basados en ecuaciones empíricas.

En la sección 2.3 se resume el procedimiento normalizado que se conoce para la medida del índice de reducción vibracional, en base a la normativa vigente. Este procedimiento para laboratorio es la base del procedimiento utilizado en ensayos “in situ”, por lo que se ha decidido detallarlo más y adaptarlo al caso “in situ” en los diferentes puntos de la sección 4.1.

Por último, en la sección 2.4 se realiza una breve descripción del método de los elementos finitos que se utilizará en el capítulo 4 para simular el comportamiento de uniones en T y en cruz. Hay que señalar que sólo se ha utilizado este método como usuario de un programa, aplicado a un entorno en dos dimensiones.

Los capítulos 3 y 4 constituyen el núcleo de esta memoria y son fundamentalmente aportaciones originales propuestas por la autora de la misma.

Concretamente, en el capítulo 3 se describen las técnicas de caracterización y los modelos empíricos que se aportan para poder determinar el comportamiento acústico de diferentes materiales absorbentes. En la sección 3.1. se validan las técnicas de medición utilizadas y se presentan los resultados de las campañas de ensayos que han servido para poder obtener los diferentes modelos empíricos que también se muestran en este mismo apartado.

El mismo esquema sigue la sección 3.2, pero en este caso las técnicas de ensayo y los resultados de la campaña de mediciones no se refieren al comportamiento absorbente de los materiales, sino a su comportamiento elástico, y por lo tanto a su capacidad como atenuador acústico dentro de un sistema masa-muelle, y su influencia como lámina flotante en la valoración del aislamiento acústico global.

Para la realización de esta memoria de Tesis Doctoral también ha sido necesario realizar ensayos no solo de las características de los materiales como materiales acústicos, sino también de todo el conjunto constructivo. En el capítulo 4 se describen todas las técnicas de medición in situ realizadas de todas las magnitudes implicadas en la transmisión del ruido a través de diferentes caminos constructivos, esto es, a través de diferentes flancos.

Las técnicas de ensayo utilizadas para obtener la diferencia de niveles de velocidad y el tiempo de reverberación estructural se describen, respectivamente, en los puntos 4.1.1 y 4.1.2.

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones in situ han sido comparados con las predicciones empíricas que la normativa describe en la sección 2.2.

Además se ha estudiado la incertidumbre asociada a las técnicas de ensayo utilizadas. Esto se describe en los puntos 4.1.3 y 4.1.4.

Además de estudiar la transmisión del ruido a través de diferentes flancos mediante ensayos in situ, también se han realizado simulaciones mediante modelación numérica en dos dimensiones de las transmisiones laterales. El desarrollo, resultados y comparaciones con las expresiones empíricas de esta modelización en dos dimensiones se describen en la sección 4.2.1.

A partir de todos los resultados obtenidos tanto en ensayos in situ, sección 4.1, como a partir de simulaciones, sección 4.2, se proponen nuevas fórmulas empíricas para describir el comportamiento acústico de la transmisión por flancos, sección 4.3.

En la sección 4.4 se muestra un ejemplo de aplicación de las aportaciones que aparecen en esta memoria en cuanto a la transmisión por flancos se refiere. Se ha estudiado el caso real de una cámara de transmisión.

Finalmente, en el apartado 5 se resumen las conclusiones obtenidas en esta memoria y se marcan las líneas futuras de investigación sobre el tema.

## **CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN TEÓRICA**

En este capítulo se presentan resumidos los contenidos en los que se basan las aportaciones que se muestran en los siguientes dos capítulos.

Concretamente, en la sección 2.1, partiendo de una clasificación de los materiales desde el punto de vista de su aplicación en acústica de la edificación, se realiza una revisión de las principales características acústicas que los hacen válidos para poder formar parte de soluciones constructivas, sea en particiones multicapa o como elemento elástico en suelos flotantes. En el punto 2.1.1 se presentan los materiales absorbentes acústicos -porosos y fibrosos-, las capas impermeables al sonido y las láminas flotantes como solución a la disminución de ruido de impacto o vibraciones. En este mismo punto se describen los diferentes modelos predictivos del comportamiento acústico existentes de los materiales absorbentes así como las técnicas de obtención de los diferentes parámetros que caracterizan a estos materiales.

En la sección 2.2 se revisan las técnicas y protocolos normalizados de medida que existen en la actualidad apoyándonos en las diferentes normativas vigentes, para obtener tanto el aislamiento acústico a ruido aéreo como el aislamiento acústico a ruido de impacto (sección 2.2.1). En la sección 2.2.2 se detallan los modelos empíricos, descritos en diferentes normativas que nos permiten modelar el aislamiento acústico a ruido aéreo o a ruido de impacto.

En la sección 2.3 se resume la norma UNE-EN ISO 10848-1:2007, para la determinación experimental de la transmisión por flancos en laboratorio.

Por último en el punto 2.4, se realiza una breve descripción del método numérico de los elementos finitos (FEM).

### **2.1 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES PARA EDIFICACIÓN.**

En esta sección se presentan los tipos de materiales utilizados en el aislamiento y el acondicionamiento acústico, así como los parámetros que los caracterizan. Se va a proceder a realizar una clasificación muy genérica de estos, agrupándolos en dos categorías distintas:

### **a) Materiales Impermeables al Sonido**

Se considera que un material es impermeable al sonido cuando no permite que la onda de presión se introduzca en su interior. Estos materiales se caracterizan porque una onda sonora incidente produce que el material adquiera una velocidad de vibración, radiando energía acústica en la cara opuesta. Físicamente no hay ninguna onda de presión que atraviese al material, sino que la onda incidente produce esa velocidad de vibración que genera la onda de presión transmitida (ruido aéreo).

Existen modelos matemáticos que se acercan a una predicción de la onda de presión transmitida respecto a la onda incidente, es decir, el coeficiente de transmisión del material o capa impermeable. En la mayoría de estos modelos es necesario el conocimiento preciso de las características elásticas del material, pues de ellas depende en mayor grado la velocidad de vibración que se pueda producir. Además, es importante el valor de masa por unidad de superficie, pues dicho valor condiciona, generalmente, el valor del coeficiente de transmisión a baja frecuencia.

### **b) Materiales Absorbentes del Sonido**

Los materiales absorbentes del sonido, tales como, lanas minerales u orgánicas, fibras de vidrio o textiles, láminas de celdas abiertas (por ejemplo, poliuretano), etc., se basan en el efecto de absorción de energía que se produce cuando una onda incide sobre el material y lo atraviesa. En estos materiales parte de la energía incidente se disipa cuando la onda lo atraviesa.

El fenómeno por el cual se disipa la energía depende de cómo este constituido el material. Unos se caracterizan por estar formados por entramados de poros o canalizaciones conectadas entre sí, y otros se forman con pequeñas fibras que se comprimen hasta un determinado espesor. En general la pérdida de energía se produce por viscosidad transformándose parte de la energía acústica en calor, el

cual se disipa. La absorción en estos materiales depende de la frecuencia de la onda acústica incidente, y del ángulo de incidencia de la onda.

Un material absorbente acústico se puede caracterizar por distintos parámetros. Se destacan como más importantes los siguientes:

- La porosidad,  $H$ , que es la fracción de volumen vacío dentro del material, con respecto al volumen total de éste. Se puede expresar en función de las densidades volumétricas del material,  $\rho_m$ , y de la fibra,  $\rho_f$ :

$$H = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_f} \quad (2.1.1)$$

- La resistencia al flujo del aire por unidad de longitud,  $\sigma$ , que mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor,  $l$ , de éste. Este parámetro depende del gradiente de presiones en las caras del material,  $\nabla p$ , y de la velocidad de vibración dentro de él,  $u$ :

$$\sigma = \frac{\nabla p}{l \cdot u} \quad (2.1.2)$$

- El factor de estructura,  $Q$ , que mide la cantidad de espacio no útil, como por ejemplo los poros perpendiculares y paralelos al flujo del sonido incidente. (Un material con todos los poros paralelos a la onda incidente tiene un factor de estructura 1, mientras que un material con una estructura tortuosa de poros tiene un factor de estructura superior a la unidad).

En general, la propagación del sonido a través de materiales absorbentes es caracterizada suponiendo que el material es homogéneo e isotrópico y determinando dos valores complejos que dependen de la frecuencia: la constante de propagación compleja ( $\Gamma$ ) y la impedancia característica compleja ( $Z$ ). En el siguiente apartado se describe algunos de los métodos clásicos para obtener estos dos valores. Hay que matizar que los materiales absorbentes no suelen ser uniformes. El diámetro de la fibra y su disposición, por ejemplo, no es constante, haciendo que estos materiales no sean isotrópicos. Sin embargo, se supondrán en este trabajo que son lo suficientemente homogéneos.

Este tipo de materiales, los absorbentes al sonido, son los que se estudian en este punto, intentando entender su comportamiento acústico en su totalidad, así como, basándonos en los modelos ya existentes que describen su comportamiento y que se describen en puntos siguientes, encontrar nuevos modelos que se ajusten a cada tipo de material absorbente.

### 2.1.1 Materiales absorbentes acústicos.

En general, la propagación del sonido a través de un material homogéneo e isótropo está determinada por dos valores complejos, la Constante de Propagación Compleja ( $\Gamma$ ) y la Impedancia Característica Compleja ( $Z$ ):

$$\Gamma = \alpha + j\beta \quad (2.1.3)$$

$$Z = R + jX \quad (2.1.4)$$

En la mayoría de modelos teóricos el parámetro a partir del cual se obtienen estas dos características de los materiales porosos es la Resistividad al Flujo (Resistencia Específica al Flujo por unidad de espesor) ( $\sigma$ ), aunque existen otros modelos que se basan en el diámetro medio de la fibra.

En el siguiente punto se resumen brevemente los modelos y teorías que se utilizan para la caracterización de materiales. Posteriormente se describe alguna técnica de

procedimiento experimental de la resistencia específica al flujo así como se revisan los métodos de ensayo del coeficiente de absorción.

### 2.1.1.1 Modelos predictivos

#### 2.1.1.1.1 Modelos basados en la resistencia al flujo.

##### a) Modelo de Delany & Bazley

En el modelo de Delany & Bazley [Del70], la constante de propagación compleja  $\Gamma$  y la impedancia característica compleja  $Z$ , pueden obtenerse de forma teórica mediante las expresiones siguientes:

$$Z = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0.0571 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j0.087 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (2.1.5)$$

$$\Gamma = \frac{j2\pi f}{c_0} \left[ 1 + 0.0978 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.700} - j0.189 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (2.1.6)$$

siendo  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) la densidad del aire,  $f$  (Hz) la frecuencia,  $c_0$  (m/s) la velocidad del sonido en el aire y  $\sigma$  (N·s/m<sup>4</sup>) la resistencia específica al flujo. Las relaciones (2.1.5) y (2.1.6) se basan en interpolaciones de medidas en función del cociente  $f/\sigma$ . El rango válido para estas relaciones es el siguiente:

$$10^{-2} \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1 \quad (2.1.7)$$

Donde las magnitudes físicas se encuentran expresadas en el Sistema Internacional de unidades (S.I.). Por tanto, tal y como se justifica en [Del70], para valores de  $f/\sigma$  fuera de este rango no son aplicables estas expresiones. Las desviaciones del modelo son tanto más apreciables cuanto menor es la frecuencia.

**b) Modelo de Miki**

En el modelo de Miki [Mik90] se obtienen nuevas expresiones basadas en la interpolación de valores experimentales:

$$Z = \rho_o c_o \left[ 1 + 0.070 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} - j0.107 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right] \quad (2.1.8)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c_o} \left[ 0.160 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} + j \left( 1 + 0.109 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right) \right] \quad (2.1.9)$$

Este modelo también presenta la limitación (2.1.7) pero se justifica en el momento de publicación porque es más fácil de realizar un programa de cálculo, ya que los exponentes de las potencias son los mismos. Los comentarios realizados en Delany & Bazley se pueden extrapolar a este modelo. Este modelo y el Delany & Bazley se obtuvieron en su momento para lanas de roca y lanas de vidrio (lanas minerales), aunque actualmente se pueden utilizar en otros materiales, bajo ciertas limitaciones.

**c) Modelo de Allard & Champoux**

En este modelo [All85], se corrige las deficiencias encontradas a bajas frecuencias en el modelo de Delany & Bazley. La constante de propagación compleja  $\Gamma$  y la impedancia característica compleja  $Z$ , pueden obtenerse de forma teórica a partir de fórmulas basadas en diferentes propiedades físicas del material fibroso:

$$Z = \sqrt{\rho K} \quad (2.1.10)$$

$$\Gamma = j2\pi f \sqrt{\frac{\rho}{K}} \quad (2.1.11)$$

Donde  $\rho$  es lo que se denomina densidad dinámica y  $K$  el módulo de compresibilidad efectivo, que se obtienen a partir de las relaciones:

$$\rho = 1.2 + \sqrt{-0.0364 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-2} - j0.1144 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-1}} \quad (2.1.12)$$

$$K = 101320 \frac{j29.64 + \sqrt{2.82 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-2} + j24.9 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-1}}{j21.17 + \sqrt{2.82 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-2} + j24.9 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-1}} \quad (2.1.13)$$

Las ecuaciones (2.1.10) y (2.1.11) son aplicables a fibras de vidrio y lana de roca de diámetros menores de 1,5  $\mu\text{m}$  siempre que se cumpla la relación:

$$\frac{f}{\sigma} \leq 1 \quad (2.1.14)$$

Dichas relaciones se modifican [All92] para el caso de materiales con fibras muy finas. Se puede observar como el modelo no presenta limitaciones a bajas frecuencias como en el caso de los modelos de Delany & Bazley o Miki.

#### d) Modelo de Dunn y Davern

Los autores Dunn y Davern [Dun86] aplicaron el modelo de Delany & Bazley para muestras de espuma, muestras con valores de la resistencia al flujo bajos. Estos autores proponen nuevos coeficientes para las espumas estudiadas, espumas de poliuretano. El resultado es el siguiente:

$$Z = \rho_o c_o \left[ 1 + 0.114 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.369} - j0.0985 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.758} \right] \quad (2.1.15)$$

$$\Gamma = \frac{j2\pi f}{c_o} \left[ 1 + 0.136 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.491} - j0.168 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.715} \right] \quad (2.1.16)$$

### e) Modelo de Garai y Pompoli

Partiendo de la base de Delany & Bazley pero para fibras de poliéster, Garai y Pompoli [Gar05] desarrollan un modelo para predecir resistencia al flujo, impedancia acústica y coeficiente de absorción de las fibras de poliéster, fibras con diámetros medios aproximadamente de  $33 \mu m$ . Los coeficientes que describen el modelo de Delany&Bazley fueron obtenidos estudiando muestras de lanas de vidrio y lanas de roca, fibras con diámetros medios de  $10-15 \mu m$ . El hecho de que el modelo predictivo de Delany&Bazley no se ajustara a los valores experimentales que obtuvieron Pompoli&Garai para fibras de poliéster hizo que éstos recurrieran a un modelo micro-estructural, donde las dimensiones del diámetro de las fibras es importante. Este modelo es el modelo de Bies&Hansen [Bie80]. Bies&Hansen presentan un modelo sencillo en el que es posible conocer la resistencia al flujo del material,  $r$ , conociendo su densidad volumétrica,  $\rho_m$  ( $kg/m^3$ ) y el diámetro de la fibra,  $d$  (m):

$$r \times d^2 \times \rho_m^{-K_1} = K_2 \quad (2.1.17)$$

Experimentalmente Bies&Hansen obtienen valores de  $K_1$  y  $K_2$  de 1.53 y  $3.18 \times 10^{-9}$  respectivamente para fibras de vidrio. Pompoli&Garai re-escribieron la ecuación (2.1.17) de la siguiente forma:

$$r = A \times \rho_m^B \quad (2.1.18)$$

De esta forma,  $B = K_1$  y  $A = K_2 \times d^{-2}$ . Ajustando valores ensayados de la resistencia al flujo para la fibra de poliéster, Pompoli&Garai obtienen, mediante el modelo que denominaron como NMR, valores de  $A$  y  $B$  de 25.989 y 1.404 respectivamente.

Además, se basaron en el modelo de impedancia de Delany&Bazley, obteniendo nuevos coeficientes que describían mejor los valores experimentales de coeficiente de absorción en incidencia normal para las fibras de poliéster.

$$Z = \rho_o c_o \left[ 1 + 0.078 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.623} - j0.074 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.660} \right] \quad (2.1.19)$$

$$\Gamma = \frac{j2\pi f}{c_o} \left[ 1 + 0.159 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.571} - j0.121 \left( \frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.530} \right] \quad (2.1.20)$$

#### 2.1.1.1.2. Otros Modelos

##### a) El modelo de Voronina

El modelo de Voronina [Vor94] utiliza funciones analíticas en función de la porosidad del material, H, la frecuencia, f, y del diámetro predominante en la fibra, d. Si se verifica la condición:

$$kd \cdot 10^4 > 0,5 \quad (2.1.21)$$

Se puede obtener lo que Voronina denomina "característica estructural", Q, como:

$$Q = \frac{(1-H)(1+q_0)}{Hd} \sqrt{\frac{8\mu}{k\rho_o c_o}} \quad (2.1.22)$$

siendo  $\mu = 1.85 \cdot 10^{-5}$  Pa·s el coeficiente dinámico de viscosidad,  $\rho_o$  la densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_o$  la velocidad del sonido en el aire (m/s) y  $q_0$  se obtiene de la expresión empírica siguiente:

$$q_0 = \frac{1}{1 + 2 \cdot 10^4 (1 - H)^2} \quad (2.1.23)$$

A partir de la característica estructural, la impedancia característica,  $Z$ , y la constante de propagación,  $\Gamma$ , se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$Z = \rho_o c_o (1 + Q - jQ) \quad (2.1.24)$$

$$\Gamma = k \frac{Q(2 + Q)}{1 + Q} + jk(1 + Q) \quad (2.1.25)$$

siendo  $k$  el número de ondas ( $m^{-1}$ ), obtenido de la relación:

$$k = \frac{2\pi f}{c_o} \quad (2.1.26)$$

La condición (2.1.26) implica que la frecuencia de corte inferior a partir de la cual las expresiones anteriores son válidas es la siguiente:

$$f > \frac{c_o}{4\pi d} 10^{-4} \quad (2.1.27)$$

### **b) Modelo de relajación de Wilson**

Wilson [Wil97] relaciona la impedancia característica ( $Z$ ) de un material poroso y la constante de propagación compleja ( $\Gamma$ ) con la tortuosidad, influencia de la curvatura del poro y la porosidad,  $H$ . Cuando una onda acústica incide sobre un material poroso provoca perturbaciones en la temperatura de los poros, así como también gradientes de presión. El tiempo que tarde el material en volver a su estado de equilibrio se conoce como tiempo de relajación, este tiempo de

relajación depende de la viscosidad, tortuosidad y porosidad del material. En esto se basa Wilson para describir su modelo predictivo.

Matemáticamente Wilson se basa en el operador complejo de compresibilidad y volumen específico, para llegar a describir, impedancia característica y constante de propagación compleja de la siguiente forma:

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{q}{H} \left[ \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{1 - j\omega \tau_{ent}}} \right) \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - j\omega \tau_{vor}}} \right) \right]^{-1/2} \quad (2.1.28)$$

$$\frac{\Gamma}{w/c} = q \left[ \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{1 - j\omega \tau_{ent}}} \right) \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - j\omega \tau_{vor}}} \right) \right]^{+1/2} \quad (2.1.29)$$

$\gamma$  es la constante adiabática que toma el valor de 7/5,  $\tau_{ent}$  y  $\tau_{vor}$  se refieren a tiempos de relajación debidos a perturbaciones de difusión térmica y debidos a la vorticidad respectivamente.

### c) El modelo descrito por Champoux-Stinson

Estos autores [Cha90] describen el procedimiento de medida según se puede observar en la figura 2.1.1 mediante un tubo de impedancia. En este modelo se distingue entre impedancia en la cara incidente de la muestra,  $Z_b$ , e impedancia en la cara posterior,  $Z_s$

$$Z_b = -j\rho_0 c \cot(kd) \quad (2.1.30)$$

$$Z_s = Z_m \frac{Z_b \cosh(\gamma \times l) + Z_m \sinh(\gamma \times l)}{Z_b \sinh(\gamma \times l) + Z_m \cosh(\gamma \times l)} \quad (2.1.31)$$

Siendo  $l$  el espesor de la muestra,  $\rho_0$  la densidad del aire,  $k$  el número de onda,  $c$  la velocidad del sonido dentro del tubo de medida

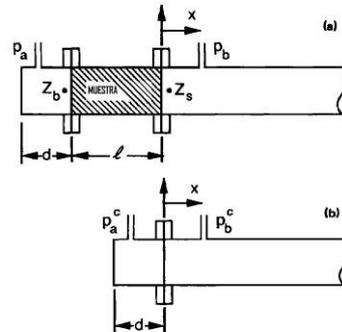


Figura 2.1.1 Dispositivo de medida descrito por Champoux&Stinson para materiales porosos.

Este dispositivo de medida presenta el mismo esquema que el propuesto por Ingard&Dear [Ing85] para la obtención de la resistencia al flujo y que se explica en puntos siguientes. Se basa en la medida de la función de transferencia,  $H$ , entre los dos micrófonos:

$$H = \left[ \cos kx_b + \left( \frac{j\rho_0 c}{Z_s} \right) \sin kx_b \right] \times \left[ \cosh \gamma l + \left( \frac{Z_m}{Z_b} \right) \sinh \gamma l \right] \times \frac{\cos kd}{\cos k((x_a + l + d))} \quad (2.1.32)$$

$x_a$  y  $x_b$  representan las posiciones de los micrófonos.

Se define el parámetro  $B$  por comodidad de manipulación matemática como:

$$B = H \frac{\cos k(x_a + l + d)}{\left[ \cos kx_b + \left( \frac{j\rho_0 c}{Z_s} \right) \sin kx_b \right] \cos kd} \quad (2.1.33)$$

Combinando ecuaciones, el modelo propuesto por Champoux y Stinson queda completo con las siguientes ecuaciones, aunque presenta limitaciones a bajas y altas frecuencias, la impedancia característica y la constante de propagación se pueden obtener mediante:

$$Z_m = Z_b Z_s \left[ (1 - B^2) / (Z_s^2 - B^2 Z_b^2) \right]^{1/2} \quad (2.1.34)$$

$$\gamma = \left( \frac{1}{2l} \right) \ln \left[ \frac{(Z_s + Z_m)(Z_b - Z_m)}{(Z_s - Z_m)(Z_b + Z_m)} \right] \quad (2.1.35)$$

### 2.1.1.2 Técnicas de caracterización

En este punto se describen métodos experimentales que se utilizan para la obtención de distintos parámetros de los materiales absorbentes acústicos.

#### 2.1.1.2.1 Coeficiente de absorción e impedancia.

##### a) El método de la onda estacionaria para la obtención del coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia específica del material

Sea un tubo de una longitud L y un diámetro D de forma que las ondas que se propagan en él sean ondas planas. Para ello debe cumplirse la condición:

$$\lambda \gg 1,7D \quad (2.1.36)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda en el tubo. Esta condición, es general, y se debe cumplir en todo método que utilicemos un tubo de estas características. El tubo propuesto debe ser rígido y su terminación también debe serlo. Se introduce en el extremo rígido una muestra de material absorbente acústico de espesor l. Al principio del tubo se coloca un altavoz capaz de generar tonos de frecuencias bajas. El esquema se muestra en la figura 2.1.2.

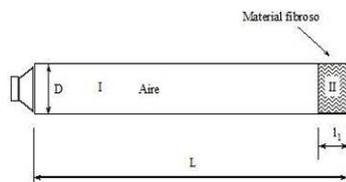


Figura 2.1.2. Montaje experimental para obtener coeficiente de absorción en incidencia normal e impedancia.

Una vez descrito el montaje, el proceso de medida es el siguiente, se alimenta el altavoz con un tono de una frecuencia determinada y se registra mediante una sonda que recorre el tubo la presión máxima y mínima,  $p_{\max}$  y  $p_{\min}$ . A partir de estos valores se obtiene la relación de onda estacionaria,  $s$ , para esa frecuencia:

$$s = \frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} \quad (2.1.37)$$

A partir de la expresión (2.1.37) se puede obtener el valor del coeficiente de absorción en incidencia normal:

$$\alpha = \frac{4s}{(1+s)^2} \quad (2.1.38)$$

La frecuencia límite superior está marcada por la expresión (2.1.36). En esta relación se puede observar que, cuanto menor sea el diámetro mayor será la frecuencia superior de corte.

El método permite obtener la impedancia de la muestra midiendo la distancia del primer mínimo a la muestra,  $x_1$ , figura 2.1.3, y aplicando la siguiente relación:

$$Z = \rho_0 c \frac{1 + \frac{s-1}{s+1} e^{j(2k(L-x_1)-\pi)}}{1 - \frac{s-1}{s+1} e^{j(2k(L-x_1)-\pi)}} \quad (2.1.39)$$

donde  $k(\text{m}^{-1})$  representa el número de onda.

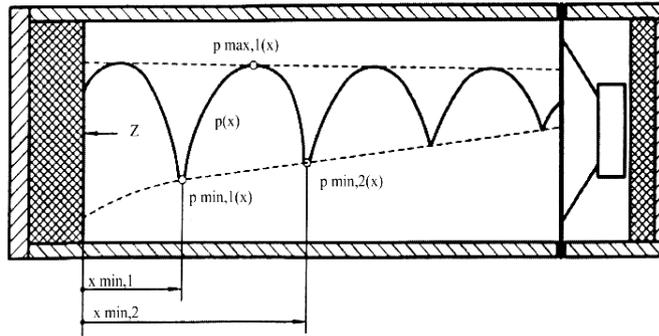


Figura 2.1.3. Muestra de la onda estacionaria en el tubo de medida

**b) El método de función de transferencia para la obtención del coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia específica del material**

Este método se describe en la Norma UNE-EN ISO 10534-2: 2002 [UNE10534]. Con este método es necesario registrar simultáneamente las señales de dos micrófonos fijos instalados en el tubo [UNE10534]. De los valores de estas dos señales y con ayuda del análisis FFT se determina la función de transferencia acústica compleja, y de esta función de transferencia se calcula el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal y la impedancia normalizada del material a estudio.

Las frecuencias de trabajo dependen de las dimensiones del tubo, el diámetro del tubo limita la frecuencia superior de ensayo. Además la distancia de separación entre los micrófonos marca un límite en frecuencia en el ensayo. En la figura 2.1.4 se muestra un esquema de las posiciones de micrófonos y muestras.

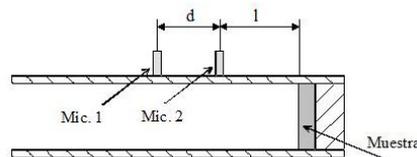


Figura 2.1.4. Montaje experimental descrito en la UNE EN ISO 10534-2:2002.

Como ya se ha indicado el diámetro de la sección impone un límite de frecuencia ya que determina la frecuencia a partir de la cual las ondas dejan de ser planas en el interior del tubo. El intervalo de frecuencia de trabajo en el tubo es  $f_1 < f < f_u$  siendo  $f_1$  y  $f_u$  las frecuencias de corte;  $f_1$  está limitada por la precisión del equipo de procesado de señal y por la distancia entre micrófonos ( $s$ ),  $f_u$  se elige para evitar que se produzcan modos de propagación de ondas no planas, asociado al diámetro del tubo y a las distancias entre micrófonos. En particular, para tubos de sección circular con diámetro  $d$ , la condición para  $f_u$  es:

$$d < 0.58 \lambda_u \quad ; \quad f_u \cdot d < 0.58 c_o \quad (2.1.40)$$

$c_o$  (m/s) es la velocidad del sonido dada por:

$$c_o = 343,2 \sqrt{T/293} \quad \text{m/s} \quad (2.1.41)$$

donde  $T$  (°K) es la temperatura del aire. La distancia  $s$  (m) entre los micrófonos debe elegirse de manera que

$$f_u \cdot s < 0,45 c_o \quad (2.1.42)$$

Por regla general, la distancia entre micrófonos debería exceder en el 5% la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés, supuesto que se satisfagan los requisitos de la ecuación 2.1.42. Una mayor distancia entre los micrófonos aumenta la precisión de los ensayos aunque aumenta también la frecuencia mínima de trabajo, por lo que el espectro frecuencial en el cual los resultados son válidos será menor.

A partir de la función de transferencia,  $H_{12}$ , que se define como el cociente complejo  $p_2/p_1$  ( $p_2$  presión en la posición del micrófono 2,  $p_1$  presión en la posición del micrófono 1) se obtiene el coeficiente de reflexión,  $r$ , y a partir de este el coeficiente de absorción en incidencia normal,  $\alpha$ , y la impedancia,  $Z$ :

$$r = \frac{H_{12} - e^{-j \cdot k \cdot l}}{e^{j \cdot k \cdot l} - H_{12}} \cdot e^{j \cdot 2 \cdot k \cdot (l+s)} \quad (2.1.43)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.1.44)$$

$$Z = \frac{1+r}{1-r} \quad (2.1.45)$$

Este método de ensayo tiene la ventaja de ser rápido (el tiempo de cálculo de la FFT y la función  $H_{12}$ ) y además es uno de los permitidos por la Normativa [UNE10534]. Este es el método que se ha utilizado para la obtención de todos los resultados de coeficiente de absorción en incidencia normal e impedancia específica presentados en este trabajo.

**c) El método de resonancia para la medida del coeficiente de absorción en incidencia normal**

El método de medida se basa en una configuración como la de la figura 2.1.2, donde se desplaza el altavoz para cada frecuencia hasta que la señal que registre el micrófono sea máxima. La posición del máximo es la posición de resonancia. Seguidamente se desplaza el altavoz una distancia  $\delta$ , de forma que la presión medida haya disminuido en un factor raíz de dos. A partir de  $\delta$  se calcula el valor del factor de reflexión:

$$\delta = \frac{c}{2\pi f} \frac{1-r}{2\sqrt{2}} \quad (2.1.46)$$

y teniendo en cuenta que:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.1.47)$$

se calcula  $\alpha$  a partir de  $\delta$ .

### 2.1.1.2.2 Resistencia al flujo.

#### a) Determinación de la resistencia al flujo del aire. UNE EN 29053:1994

El método expuesto en esta normativa [UNE29053] necesita de un montaje bastante complejo. En esta normativa se exponen 2 métodos: método con flujo de aire directo, o método con flujo de aire alterno. En la siguiente figura se muestra el esquema necesario para la realización de los ensayos de medida.

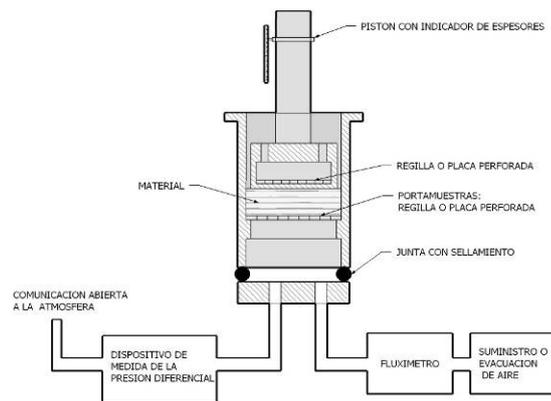


Figura 2.1.5 Esquema propuesto por la normativa (UNE EN 29053:1994) para la medida de la resistencia al flujo del aire.

Se definen en este modelo resistencia al flujo de aire,  $R$ , resistencia específica al flujo de aire,  $R_s$ , y resistividad al flujo del aire,  $r$ , con las siguientes expresiones:

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \left[ Pa \times s / m^3 \right] \quad (2.1.48)$$

$$R_s = RA \left[ Pa \times s / m \right] \quad (2.1.49)$$

$$r = \frac{R_s}{d} \left[ Pa \times s / m^2 \right] \quad (2.1.50)$$

$\Delta p$  es la diferencia de presión de aire, en pascuales, entre ambos lados de la probeta en relación a la presión atmosférica,  $q_v$  es el caudal volumétrico de aire

que atraviesa la probeta.  $A$  es el área de la sección de la probeta y  $d$  es el espesor de la probeta. La precisión de los valores que se obtienen en este ensayo, según indica la normativa, se están planteando todavía mediante intercomparaciones.

**b) Método indirecto de Ingard & Dear para la obtención de la resistencia específica al flujo**

El método indirecto de Ingard & Dear [Ing85] permite la obtención de la resistencia específica al flujo para materiales absorbentes en un montaje experimental para ciertas frecuencias determinadas. El montaje experimental que proponen estos autores es el que se puede observar en la figura 2.1.6.

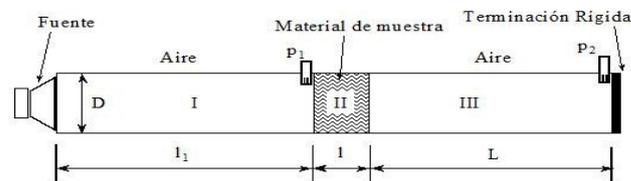


Figura 2.1.6 Montaje experimental descrito por Ingard & Dear

En este montaje, para que se cumpla la condición de onda incidente plana sobre el material absorbente, la sección del tubo debe ser pequeña comparada con la longitud de onda,  $\lambda$ , por lo que se toma como condición que  $\lambda \gg 1.7D$ , siendo  $D$  el diámetro del tubo. A partir de la impedancia específica al flujo y bajo una serie de condiciones, Ingard&Dear proponen un método relativamente sencillo para poder obtener la resistencia específica al flujo.

La expresión que relaciona la velocidad de la partícula en el punto 1 (cara incidente de la muestra),  $U_1$ , con la presión en el punto 2 (terminación rígida del tubo),  $P_2$ , es la siguiente:

$$U_1 = -i \frac{P_2}{\rho_0 c_0} \sin(KL) \tag{2.1.51}$$

Siendo  $L$  la distancia entre la cara no incidente de la muestra de material y la terminación rígida,  $\rho_0$  la densidad del aire,  $c_0$  la velocidad de la onda en el tubo y  $k$  el número de onda.

La expresión que relaciona las presiones registradas por ambos micrófonos es la siguiente:

$$P_1' = P_2 \cos(KL) \quad (2.1.52)$$

A partir de estas expresiones, la impedancia al flujo,  $Z = \frac{P_1 - P_1'}{U_1}$ , se puede expresar de la siguiente forma:

$$Z = i\rho_0 c_0 \frac{P_1}{P_2} \frac{1}{\sin(KL)} - i\rho_0 c_0 \cot(KL) \quad (2.1.53)$$

Puesto que la función de transferencia se define como  $H_{12} = \frac{P_2}{P_1}$ , la expresión (2.1.53) se puede reescribir:

$$Z = i\rho_0 c_0 \frac{1}{H_{12}} \frac{1}{\sin(KL)} - i\rho_0 c_0 \cot(KL) \quad (2.1.54)$$

Aquellas frecuencias que cumplen la expresión 2.1.55, la parte reactiva de la impedancia al flujo es mucho menor a la parte resistiva, pudiéndose esta despreciar y aproximando el valor de la resistencia específica al flujo al valor de la impedancia normalizada.

$$L = \frac{(2n-1)\lambda}{4} \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.1.55)$$

Por tanto la resistencia específica al flujo, a partir de la impedancia normalizada y para ciertas frecuencias toma la expresión:

$$\sigma = i \left| \text{Imag} \left( \frac{1}{H_{12}} \right) \right| \quad (2.1.56)$$

Este método es muy utilizado por la comunidad científica como alternativa al método propuesto por la normativa [UNE29053] y que se ha expuesto anteriormente.

**c) Método de Stinson&Daigle.**

En este método expuesto por los autores Stinson&Daigle se utiliza un sistema electrónico para conocer la resistencia al flujo. De esta forma, estos autores [Sti83] describen una rápida técnica de medida de la resistencia al flujo. También se basan en la medida de la diferencia de presiones, pero esta diferencia es ensayada con manómetros compuestos de capacitancias eléctricas variables, con una resolución de  $10^{-6}$  mmHg. Además para controlar que la corriente de aire que traviese la muestra sea estable se utilizan un controlador electrónico.

Estos autores, en definitiva, lo que proponen es un divisor de voltaje, el primer elemento es una resistencia conocida  $R_c$ , y el segundo es la incógnita, la resistencia al flujo,  $R_x$ . Véase figura 2.1.7.

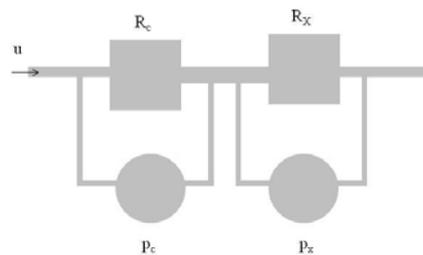


Figura 2.1.7 Montaje experimental para la medida de la resistencia al flujo propuesto por Stinson&Daigle.

Cuando la resistencia al flujo se estabiliza, es decir, cuando la velocidad volumétrica es constante a través de los dos elementos,  $p_c=R_c$  y  $p_x=R_x$ , así la resistencia al flujo se puede calcular como:

$$R_x = R_c \frac{p_x}{p_c} \quad (2.1.57)$$

$R_c$  es una resistencia conocida en régimen laminar, y con este valor se calcula  $R_x$ , aunque los autores advierten que puede ser, en algunos casos no se verifique la linealidad.

### 2.1.1.2.3 Impedancia al flujo.

En el punto anterior se ha descrito un método indirecto para poder obtener la resistencia al flujo, el método de Ingard&Dear, en este punto se presenta un modelo para la obtención de la Impedancia al flujo de materiales absorbentes, este modelo, el modelo de Mingzhang Ren y Finn Jacobsen [Ren93] es una particularidad del modelo indirecto que presentan Ingard&Dear. Este modelo es más completo que el de Ingard&Dear ya que permite estudiar la dependencia de la impedancia con la frecuencia, con este modelo quedan descritas parte real (resistencia al flujo) y parte compleja (reactancia al flujo) de la impedancia al flujo. Este método también se basa en la función de transferencia entre dos micrófonos, situados en un tubo de impedancia, pero no es necesario que la terminación de éste sea rígida. El montaje experimental que describe el modelo se observa en la figura 2.1.8:

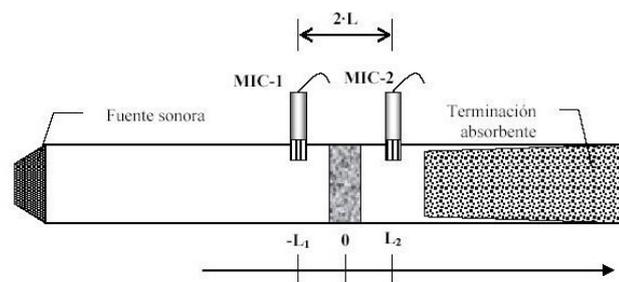


Figura 2.1.8 Esquema del montaje experimental propuesto por Ren&Jacobsen para obtener la impedancia al flujo.

La configuración de ensayo es tal que asegura que solo se pueden propagar en el tubo ondas planas, y además se asume que la dependencia temporal de la onda es exponencial. Con esto, el campo sonoro en el tubo se puede expresar como:

$$p(x) = p_i^L e^{-jkx} + p_r^L e^{jkx} \quad x \leq -l \quad (2.1.58)$$

$$p(x) = p_i^R e^{-jkx} + p_r^R e^{jkx} \quad x \geq l \quad (2.1.59)$$

$l$  es el espesor de la muestra,  $p_i$  y  $p_r$  son las amplitudes complejas, incidentes y reflejadas, respectivamente,  $k$  es el número de onda y  $L$  y  $R$  se refieren a izquierda y derecha de la muestra. Por tanto, la velocidad de partícula se puede describir como:

$$u_x(x) = \frac{(p_i^L e^{-jkx} - p_r^L e^{jkx})}{\rho c} \quad x \leq -l \quad (2.1.60)$$

$$u_x(x) = \frac{(p_i^R e^{-jkx} - p_r^R e^{jkx})}{\rho c} \quad x \geq l \quad (2.1.61)$$

La presión en la posición del primer micrófono viene descrita por:

$$p_1 = p(-L_1) = p_i^L e^{jL_1 k} + p_r^L e^{-jL_1 k} \quad (2.1.62)$$

La presión detectada por el segundo micrófono será:

$$p_2 = p(L_2) = p_i^R (e^{-jL_2 k} + R e^{jL_2 k}) \quad (2.1.63)$$

Donde se ha introducido el factor de reflexión en  $x=0$ ,  $R = \frac{p_r^R}{p_i^R}$ .

Mingzhang Ren & Finn Jacobsen asumen en la descripción de este método que el espesor de la muestra es comparable con la longitud de las ondas que se propagan en el tubo, para poder asegurar que la velocidad es constante a través de la muestra. Esta afirmación nos permite llegar a la siguiente expresión:

$$p_i^L e^{jkl} - p_r^L e^{-jkl} = p_i^R (e^{-jkl} - R e^{jkl}) \quad (2.1.64)$$

Se define X y Y como los cocientes:

$$X = \frac{p_i^L}{p_i^R} = \frac{e^{jk\Delta L} (R + e^{-j2kL_2}) + H_{12} e^{-jkL_1} (1 - Re^{j2kl})}{H_{12} [1 + e^{-j2k(L_1-l)}]} \quad (2.1.65)$$

$$Y = \frac{p_r^L}{p_i^R} = \frac{e^{jk(\Delta L+2l)} (R + e^{-j2kL_2}) - H_{12} e^{-jkL_1} (1 - Re^{j2kl})}{H_{12} [1 + e^{-j2k(L_1-l)}]} \quad (2.1.66)$$

Donde  $H_{12}$  es la función de transferencia,  $H_{12} = \frac{p_2}{p_1}$ , y  $\Delta L = L_2 - L_1$ .

La impedancia al flujo normalizada viene descrita:

$$Z/\rho c = \theta + j\chi = \frac{p(-l) - p(l)}{u(l)\rho c} \quad (2.1.67)$$

Siendo  $\theta$  y  $\chi$  resistencia y reactancia normalizadas, que gracias a las definiciones (2.1.65) y (2.1.66) podemos escribir como:

$$\theta + j\chi = \frac{X + (Y - 1)e^{-j2kl} - R}{e^{-j2kl} - R} \quad (2.1.68)$$

Con esta ecuación queda completamente descrita la impedancia al flujo, queda por determinar el factor de reflexión R. Definiendo s como la distancia entre micrófonos y  $H_{12}'$  como la función de transferencia sin muestra, R se describe como:

$$R = \frac{H'_{12} - e^{-jks}}{1 - H'_{12}e^{-jks}} \quad (2.1.69)$$

### 2.1.2 Capas impermeables.

Los parámetros necesarios como datos de entrada para muchos modelos de predicción del comportamiento acústico, en el caso de capas impermeables son: la masa por unidad de área ( $m$ ), el grosor de la capa ( $h$ ), su rigidez a flexión ( $D$ ), y su factor de pérdidas ( $\eta$ ).

La obtención de los parámetros anteriores puede realizarse por distintos métodos, si se dispone de una placa de material impermeable a estudiar calcular la flecha de la placa bajo unas condiciones de carga controlada, excitar la placa con un cierto modo de resonancia, etc. Existen además métodos indirectos, [Alb00] que se basan en algoritmos de aproximación que caracterizan estas capas impermeables. Estos algoritmos están basados en la minimización del error cuadrático y nos permiten determinar la masa por unidad de área, la rigidez a flexión y factor de pérdidas de la placa impermeable a partir de los resultados de medidas de aislamiento.

### 2.1.3 Láminas flotantes.

#### 2.1.3.1 Diseño de un suelo flotante

El suelo flotante es una solución pensada para reducir el ruido de impacto en el interior de las edificaciones, a la que a veces se le suponen propiedades para reducir también vibraciones de maquinaria. Hay que tener en cuenta que el ruido de impacto se genera en unas condiciones diferentes a las vibraciones que comúnmente generan algunas maquinarias.

El ruido de impacto es una señal con gran densidad espectral, asociada a la generación de transitorios por golpes, ruidos de pasos, etc. Una máquina en régimen estacionario estaría produciendo un espectro de armónicos de vibración con una frecuencia fundamental y múltiplos a altas frecuencias. Por tanto, el tipo de fuente de ruido es diferente. Sin embargo, en el caso de maquinaria ligera, con

masas de cientos de kilos como mucho podríamos pensar, por afinidad con los sistemas de amortiguación, que el suelo flotante también podría ser eficiente.

Un esquema típico de suelo flotante, a base de mortero de compresión, se muestra en la figura 2.1.9. En este esquema algunas capas pueden no existir, como la de arena. Las capas 4 a 6 podrían cambiarse por un suelo de madera u otro material, o cambiar de espesor.

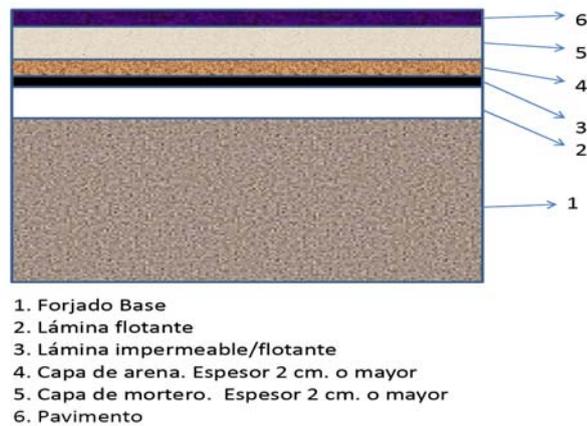


Figura 2.1.9. Suelo flotante

La rigidez dinámica es uno de los parámetros que determina el aislamiento acústico de los suelos flotantes en viviendas y que sirve para valorar la mejora a ruido de impacto. Esta magnitud será ampliamente descrita en el punto 2.1.3.2, a continuación se describe algunos conocimientos de la teoría básica de amortiguación, para poder entender el funcionamiento de los suelos flotantes.

El principio básico de funcionamiento (eficacia) de un suelo flotante viene descrito por el conjunto masa-muelle que forman todas las capas que, en conjunto, conforman el suelo flotante. Tomando como sistema base el de la figura 2.1.10, donde se supone sólo existe amortiguamiento en los muelles, la transmisión, de forma simplificada es [ISO2631] [UNE29052]:

$$T = \frac{1}{\left(\frac{f_d}{f_n}\right)^2 - 1} \quad (2.1.70)$$

Donde:

$f_d$ : frecuencia de la fuerza

$f_n$ : frecuencia natural de los muelles aisladores

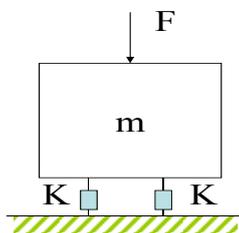


Figura 2.1.10. Sistema Masa-muelle base

La expresión anterior se representa en la Figura 2.1.11.

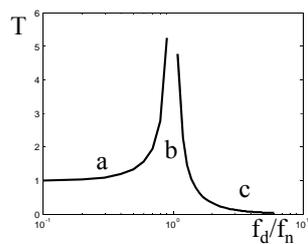


Figura 2.1.11. Análisis de la transmisión

Se pueden observar las zonas siguientes:

Zona a: Transmisión total, con  $f_n \gg f_d$ . No hay efecto de los muelles

Zona b: Resonancia, la transmisión se dispara, con  $f_n = f_d$ .

Zona c: La transmisión disminuye con  $f_n \ll f_d$ .

Por tanto, en una primera aproximación, el sistema empieza a reducir su transmisión si se cumple que:

$$f_d > \sqrt{2}f_n \quad (2.1.71)$$

Es decir, el sistema empieza a reducir la transmisión a partir de una frecuencia. Con la expresión anterior se puede determinar la transmisión a una frecuencia determinada. La frecuencia natural del sistema masa-muelle (no amortiguado) se obtiene de la ecuación siguiente:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1.72)$$

Donde:

$k$  (N/m) es la constante elástica (rigidez) del muelle

$m$  (kg) es la masa

En esta ecuación es fácilmente visible que el aumento de masa reduce la frecuencia natural y que si la rigidez aumenta, la frecuencia natural también aumentará. Si el sistema tiene mecanismos de absorción, su frecuencia natural es un poco más baja y depende de lo importante que sea ésta.

La rigidez del amortiguador está asociada a los parámetros elásticos de éste. En función de si trabaja a cortadura o a compresión, las expresiones que lo relacionan, en aquellos materiales donde se puedan utilizar, son las siguientes:

$$\frac{k}{A} = \frac{G}{t} (\text{cortadura}) \quad (2.1.73)$$

$$\frac{k}{A} = \frac{E}{t} (\text{compresión}) \quad (2.1.74)$$

Donde  $G$  ( $\text{N/m}^2$ ) es el módulo de rigidez,  $E$  ( $\text{N/m}^2$ ) es el módulo de Young,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) es la superficie de carga y  $t$  ( $\text{m}$ ) es el espesor del amortiguador. El cociente  $k/A$  es la rigidez dinámica del material ( $\text{N/m}^3$ ).

Conviene señalar que estamos modelando un sistema de un solo grado de libertad con las limitaciones que esto implica. Un estudio más profundo del problema se puede encontrar en los trabajos de [Dav09].

### 2.1.3.2 Técnica de ensayo de la rigidez dinámica

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

El ensayo estándar es la determinación de la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de la muestra objeto de ensayo, mediante un método de resonancia en el que se mide la frecuencia de resonancia de la vibración vertical fundamental de un sistema masa-muelle, en el que la masa es la placa de carga y el muelle es una muestra del material elástico objeto de ensayo [UNE29052].

La rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de la muestra tomada de lámina flotante,  $s'_t$  ( $\text{N/m}^3$ ), se puede obtener, bajo ciertas condiciones y limitaciones, de la relación:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t f_r^2 \quad (2.1.75)$$

Donde:

$m'_t$  ( $\text{kg/m}^2$ ) es la masa total por unidad de superficie empleada durante el ensayo

$f_r$  ( $\text{Hz}$ ) es la frecuencia de resonancia extrapolada, frecuencia a la que se produce la resonancia en las condiciones de ensayo.

Además, este parámetro está sometido a los efectos de la resistividad al flujo de aire del material. Si queremos obtener a partir de la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie,  $s'_t$  (se obtiene mediante ensayo) la rigidez dinámica por unidad de superficie  $s'$ :

- En casos de *alta resistividad* al flujo de aire, donde  $r \geq 100\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

$$s' = s'_t \quad (2.1.76)$$

- Casos de *resistividad intermedia* al flujo de aire, donde  $100\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2 > r \geq 10\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

$$s' = s'_t + s'_a \quad (2.1.77)$$

$$s'_a = P_o/d\varepsilon \quad (2.1.78)$$

Donde  $P_o$  es la presión atmosférica,  $d$  es el espesor de la muestra bajo la acción de la carga estática y  $\varepsilon$  es la porosidad de la muestra.

- Casos de *baja resistividad* al caudal de aire donde  $r < 10\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

$$s' = s'_t \quad (2.1.79)$$

A partir de la rigidez dinámica del material elástico, se puede obtener la frecuencia natural del sistema conformado por el suelo flotante. Para ello se aplica la relación:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}} \quad (2.1.80)$$

donde  $m'_t$  debe ser la masa por unidad de área de la losa flotante colocada encima de la lámina elástica. En ésta deberían contemplarse todos los elementos de masa encima de la lámina elástica.

A continuación se describe la técnica de ensayo para obtener la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie. Las magnitudes que se pueden obtener de forma directa son la frecuencia de resonancia, en concreto la frecuencia de resonancia de la vibración vertical fundamental de la muestra y de la placa de carga, y el amortiguamiento.

Se coloca la muestra entre dos superficies horizontales, la placa base y la placa de carga. La placa de carga debe cumplir una serie de características, tal y como se describe en [UNE29052], en esta normativa el procedimiento descrito es para la obtención del valor de la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de materiales elásticos. En muchas ocasiones puede ser interesante o a veces necesario realizar ensayos con variaciones de estas características ya que estas marcan, conjuntamente con la resolución del equipo de medida las frecuencias de corte de estudio. Las características a cumplir por la placa de carga según normativa son placas de carga de acero, cuadradas, de dimensiones  $(200\pm 3)$  mm x  $(200\pm 3)$  mm y una masa tal que, la carga total sobre la muestra de ensayo este comprendida entre 7,5kg y 8,5kg. Esta masa incluye todos los elementos sobre la muestra de estudio, incluidos los equipos de medida, transductores y equipos de excitación. En la figura 2.1.12 se puede observar el esquema del ensayo.

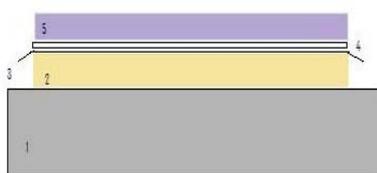


Figura 2.1.12. Esquema de la disposición de la muestra para el ensayo de la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie. 1-Base, 2-Muestra, 3-Lámina plástica (espesor aproximado de 0.02mm), 4-Placa escayola fina (espesor máximo 5mm), 5-Placa de carga.

Tanto la placa de carga como la placa base deben ser lo suficientemente rígidas como para evitar ondas de flexión dentro del intervalo de frecuencias de interés. Escogiendo la placa de carga de acero tal como se indica en [UNE29052] y como placa base el forjado del laboratorio de física o de acústica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG-UPV), bovedilla de hormigón de 300+50, se asegura esta condición.

Se desea obtener la frecuencia de resonancia y a partir de ésta la rigidez dinámica aparente por unidad de superficie de la muestra. Para ello, se obtiene la aceleración de la placa cuando ésta es excitada por una fuerza. Existen diferentes métodos de excitación de la placa, bien mediante señal sinusoidal, bien mediante ruido blanco o impulsivo.

Mediante excitación con señal sinusoidal es más fácil llegar a frecuencias bajas, ya que el espectro de la señal es más ancho que en el caso de señales impulsivas, no obstante, la mayoría de trabajos sobre medidas de rigidez dinámica de materiales para ser utilizados en suelos flotantes [Bar04] [Sim06] [Nev08] se basan en la excitación mediante señal impulsiva.

También para este trabajo, todos los ensayos que se han realizado han sido mediante señal impulsiva, en concreto con un martillo de Brüel&Kjaer 8206 con el extremo de aluminio, o en casos excepcionales con un martillo Brüel&Kjaer 8208. La masa del martillo 8206 es de 216 gramos, mientras que la masa del martillo 8208 es de 1623 gramos. Se ha registrado la aceleración con un acelerómetro Brüel&Kjaer 4370, acelerómetro de pulgada. Este se ha situado en el centro de la placa de carga y se ha golpeado en un área situada alrededor del acelerómetro, para evitar posibles efectos indeseados, como oscilaciones verticales.

Con excitación impulsiva obtenemos la frecuencia de resonancia por análisis de la respuesta en frecuencia del sistema, en base a [ISO 7626]

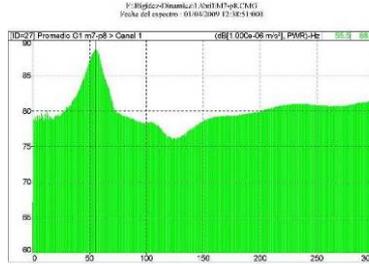


Figura 2.1.13. Función de transferencia en el dominio de la frecuencia. Aceleración (dB) en ordenadas, frecuencia (Hz) en abscisas.

En [ISO7626] se describen algunas de las ventajas y limitaciones de excitar con un martillo.

Las ventajas se enumeran a continuación:

- Los ensayos son rápidos
- es fácil poner en marcha el excitador
- es fácil localizar el punto de excitación y repetirlo
- la estructura necesaria para la excitación es mínima, importante en dimensiones de  $(200\pm 3)$  mm x  $(200\pm 3)$  mm.

Las limitaciones, un poco más detalladas son las siguientes:

- Restricciones de no linealidad; comparado con una señal de excitación sinusoidal, la fuerza del impulso tiene que ser mucho mayor (periodos cortos de tiempo) y esto hace que aumenten los efectos de no linealidad. Para poder detectar estas no linealidades es importante poder tener registros de la fuerza. En el caso que nos ocupa, utilizando el sistema de registro de señal que se ha utilizado (de doble canal) ha sido posible en cada caso registrar tanto el impulso (la fuerza) como la aceleración (figura 2.1.14)

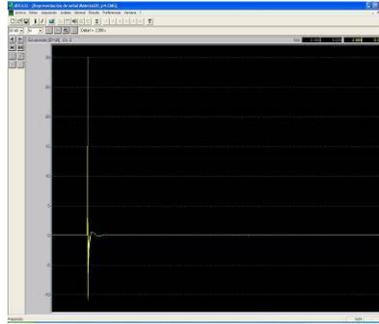


Figura 2.1.14 a)

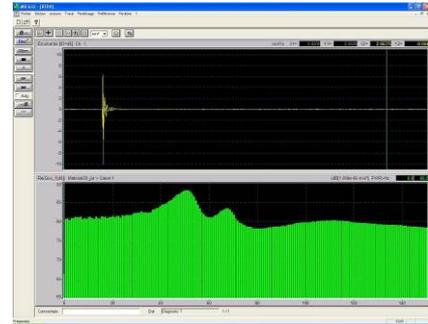


Figura 2.1.14 (b)

Figura 2.1.14. Registro simultáneo de fuerza (a) y de la aceleración (b).

- Problemas señal-ruido; Si el tiempo de duración del impacto es corto comparado con el tiempo de registro (inferior a un 1%) pueden aparecer problemas de ruido. Se pueden utilizar diferentes algoritmos de tratamiento de señal para filtrar los datos y eliminar el ruido, pero sin ninguna seguridad de que estemos eliminando información del espectro importante.
- Si las estructuras a ensayo son muy amortiguadas, es necesario fuerzas de excitación grandes y continuas, características de las señales sinusoidales. Pero, en el caso de estructuras poco amortiguadas, los picos de resonancia son muy delgados y pronunciados por lo es más fácil su detección mediante excitación por impulso.
- En este método existe dependencia de la habilidad del operador, por eso es importante la repetitividad de la medida. El impacto debe ser perpendicular a la superficie de estudio con  $10^\circ$  posibles de desviación (la postura habitual de impacto es correcta).

Es importante controlar el rango de frecuencias de excitación y el de registro, puede que la frecuencia de resonancia del sistema se encuentre fuera del rango de registro. Con el fin de obtener la máxima resolución en frecuencia, el intervalo frecuencial del analizador no debe extenderse más allá de la frecuencia máxima de interés. El rango óptimo depende de la masa del martillo, del área de la punta

de impacto, de la rigidez y de la masa efectiva de la muestra, además la rigidez de la estructura limita la frecuencia de corte de estudio, con lo que no es fácil obtener el rango óptimo de ensayo.

Si reescribimos la ecuación 2.1.75 de la siguiente forma:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}} \quad (2.1.80)$$

Se observa que si es necesario incrementar la frecuencia deberá reducirse  $m'_t$ , al contrario, si es necesario disminuir la frecuencia deberá aumentar  $m'_t$ . Existen algunos casos en los que debido a la resolución necesaria para poder detectar el pico de resonancia con claridad, la frecuencia de corte superior que nos da el equipo de medida es baja, por lo tanto necesitaremos disminuir  $f_r$ , aumentaremos pues  $m'_t$ . En [UNE29052] se permiten masas por unidad de área,  $m'_t$ , comprendidas entre 187,5 kg/m<sup>2</sup> y 212,5 kg/m<sup>2</sup>.

Se han utilizado para diferentes ensayos placas de carga de diferentes masas, diferentes martillos de impacto (Brüel&Kjaer 8206 0 Brüel&Kjaer 8208) y diferentes extremos de los mismos, además tenemos que tener en cuenta el acelerómetro, que en nuestro caso presenta una masa de 75 gramos. Disponemos pues de masas por unidad de área desde 177,4 kg/m<sup>2</sup> hasta 280,0 kg/m<sup>2</sup>. Aunque en algunos casos no cumplimos con las condiciones de ensayo descritas por [UNE29052] es útil testear algunos materiales con diferentes masas de carga, para poder así llegar a una resolución de los resultados más precisa.

## **2.2. AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LA EDIFICACIÓN**

### **2.2.1 Técnicas de ensayo “in situ”.**

#### **2.2.1.1 Medida del aislamiento acústico a ruido aéreo**

En la norma UNE-EN ISO 140-4:1999 [UNE140-4] se detalla un procedimiento de ensayo del aislamiento acústico a ruido aéreo de particiones entre locales. En

esta normativa se detallan los equipos necesarios para realizar la medición, las posiciones tanto de fuente como de micrófonos y los puntos de medida necesarios para obtener un campo sonoro lo más difuso posible, así como un ruido generado en el recinto emisor estacionario, las correcciones, si fuera necesario debido al ruido de fondo, etc.

En la figura 2.2.1 se puede observar un esquema de la situación de medida. Tal y como se indica en la normativa [UNE 140-4] en el caso de utilizar una sola fuente, ésta se sitúa al menos en dos posiciones distintas en la sala emisora, F1 y F2 de la figura. Para cada posición de fuente se registran tanto en emisión (E) como en recepción (R), al menos cinco puntos de registro del campo sonoro mediante micrófonos de presión.

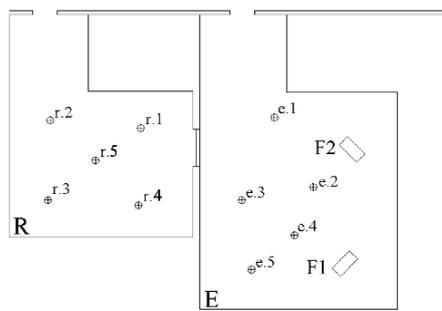


Figura 2.2.1 Esquema de medida del aislamiento acústico a ruido aéreo.

Tanto las posiciones de fuente como de micrófonos deben de cumplir una serie de distancias mínimas, estas son 0,7 m entre posiciones de fuente, 0,5 m entre la fuente y los bordes del recinto, 0,7 m entre diferentes posiciones de micrófono, 0,5 m entre cualquier posición de micrófono y los bordes del recinto y 1,0 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora.

El procedimiento descrito en esta normativa permite el cálculo de diferentes índices de aislamiento, que son los siguientes:

#### Aislamiento bruto estandarizado

$$D_{nT} = D + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (2.2.1)$$

Donde D se conoce como aislamiento bruto y se puede obtener a partir de la expresión (2.2.5), T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor (s) y T<sub>0</sub> es lo que se conoce como tiempo de referencia. Se toma un valor de 0,5 segundos en viviendas o recintos de tamaño comparable.

Aislamiento bruto normalizado:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{A_0}{A} \quad (2.2.2)$$

Donde A es el área de absorción acústica del recinto receptor (m<sup>2</sup>) y A<sub>0</sub> es lo que se conoce como área de absorción acústica de referencia. Se toma un valor de 10m<sup>2</sup> para viviendas.

Índice de reducción sonora aparente:

$$R' = D + 10 \log \frac{S}{A} \quad (2.2.3)$$

siendo S el área (m<sup>2</sup>) del elemento separador entre recinto emisor y recinto receptor.

Como se puede observar es necesario conocer el tiempo de reverberación del recinto emisor, en la expresión 2.2.1 este parámetro es necesario de forma directa para obtener el aislamiento bruto estandarizado, en las expresiones 2.2.2 y 2.2.3 este parámetro es necesario para obtener el área de absorción equivalente del recinto receptor. La expresión para obtener el área de absorción equivalente es la siguiente, donde T es el tiempo de reverberación en segundos y V el volumen de la sala receptora en m<sup>3</sup>.

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (2.2.4)$$

Nos referenciamos la UNE EN ISO 140-4:1999 a la Norma UNE EN ISO 354:2004 [UNE354] para obtener el tiempo de reverberación.

Obtenemos con las cinco posiciones de micrófono por las dos posiciones de fuente, niveles promediados de emisión,  $L_1$  y recepción  $L_2$ . En caso de que ambos recintos tengan diferente tamaño, como norma general y a no ser que se especifique lo contrario se tomará el de mayor tamaño como recinto emisor. A partir de estos niveles se obtiene lo que se conoce como aislamiento bruto:

$$D = L_1 - L_2 \quad (2.2.5)$$

Los niveles promediados de emisión y recepción se obtienen para las bandas centrales en tercios de octava desde los 100Hz hasta los 3150Hz. Si se desea obtener estos valores en octavas, el rango de estudio abarca desde los 125Hz hasta los 2000Hz, aunque es recomendable realizar las mediciones en tercios de octava, y solo en octavas si se trata de algún caso especial. Si se desea obtener información adicional además de poder comparar las mediciones in situ con valores de laboratorio se debe ampliar el rango de frecuencias de estudio hasta los 5000Hz, por otra parte, si se desea obtener mayor información a bajas frecuencias se puede ampliar este rango hasta los 50Hz.

Debemos asegurar que los niveles promediados en recepción,  $L_2$ , no estén afectados por ruidos ajenos como ruidos eléctricos o ruidos del exterior del recinto. Para ello debemos medir el ruido de fondo en sala receptora,  $L_b$  y asegurarnos de que el nivel medido con la fuente en funcionamiento,  $L_{sb}$ , está 10 dB por encima del ruido de fondo para cada una de las bandas de frecuencias. Si la diferencia entre estos niveles es menor de 10 dB y mayor que 6 dB se realizarán correcciones según la siguiente expresión:

$$L = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (2.2.6)$$

Si la diferencia entre  $L_b$  y  $L_{sb}$  es menor de 6dB, se decide no dar por válida la medida y aumentar el nivel de potencia de la fuente hasta aumentar esta diferencia.

### 2.2.1.2 Medida del aislamiento acústico a ruido de impacto

En la norma UNE-EN ISO 140-7:1999 [UNE140-7] se detalla un procedimiento de la medida in situ del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos. En esta normativa se detallan los equipos necesarios para realizar la medición, las posiciones tanto de la máquina de impactos como de micrófonos y los puntos de medida así como las correcciones, si fuera necesario debido al ruido de fondo, etc.

En la figura 2.2.2 se pueden observar dos de las configuraciones más comunes de distribución entre emisor (E) y receptor (R) en las que se debe determinar el aislamiento a ruido de impacto.

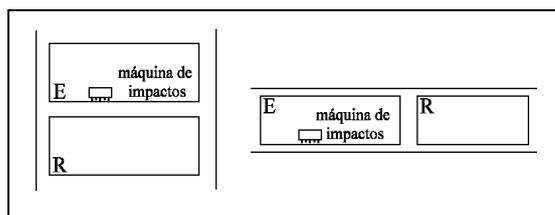


Figura 2.2.2 Esquema de dos de las configuraciones, emisor /receptor en vertical y emisor/receptor en horizontal, más comunes in situ para la medición del aislamiento a ruido de impacto.

Para obtener el aislamiento a ruido de impacto, solamente es necesario obtener el nivel promediado de diferentes posiciones de micrófono en recepción, esto es debido a que la fuente en el ensayo que se describe en la UNE EN ISO 140-7:1999 [UNE140-7] es una máquina normalizada.

En concreto una máquina de impactos normalizada, cuyas características se describen en el Anexo A de dicha normativa, por tanto el campo sonoro en el recinto de emisión queda totalmente caracterizado. Esta máquina de impactos deberá ser colocada en al menos cuatro posiciones distribuidas de forma aleatoria sobre el suelo sometido a ensayo. La línea que forman los cabezales de los martillos de los que está provista la máquina se colocan formando un ángulo de

45° con la dirección de las vigas. Se obtienen los niveles de presión de ruido de impactos con un solo micrófono moviéndolo de una posición a otra, con un número de posiciones mínimo de seis por cada posición de máquina.

También en este ensayo existen unas distancias mínimas a cumplir, estas son 0,5 m entre la máquina de impactos y los bordes del suelo, 0,7 m entre distintas posiciones de micrófono, 0,5 m entre cualquier posición de micrófono y los bordes del recinto y 1,0 m entre cualquier posición de micrófono y el suelo superior excitado por la máquina de impactos.

A partir de los niveles de presión promediados energéticamente para las diferentes posiciones de micrófono y de fuente, y corregidos si fuera necesario por el ruido de fondo se podrá obtener para bandas de frecuencias en tercios de octava el nivel normalizado,  $L'_n$ , o el nivel estandarizado,  $L'_{nT}$ .

El rango de frecuencias en tercios de octava es el mismo que se ha detallado en la descripción del procedimiento de medida del aislamiento acústico a ruido aéreo. También se sigue el mismo criterio para la corrección por ruido de fondo, solo que en el caso de que si la diferencia entre el nivel de fondo en recepción,  $L_b$ , y el nivel de fondo medido con la máquina de impactos en funcionamiento,  $L_{sb}$ , no supera los 6 dB no es posible aumentar el nivel de la máquina de impactos. En este caso se aplica la corrección de 1,3 dB correspondiente a 6 dB de diferencia, indicándose esta corrección de forma específica.

Con todas estas consideraciones, se puede obtener para cada banda de frecuencia el nivel normalizado mediante la siguiente expresión:

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (2.2.7)$$

Donde  $L_i$  es el nivel de presión sonora promediado para cada banda de frecuencia,  $A$  es el área de absorción equivalente en el recinto receptor, en  $m^2$ , (expresión 2.2.4) y  $A_0$  es el área de referencia. Esta área de referencia toma el valor de  $10m^2$  en el caso de viviendas o recintos con dimensiones comparables.

También se puede obtener el nivel estandarizado mediante la siguiente expresión:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (2.2.8)$$

Siendo T el tiempo de reverberación en segundos, y T<sub>0</sub> el tiempo de referencia, 0,5s para viviendas o recintos con dimensiones comparables.

## **2.2.2. Normativas reconocidas para la predicción del aislamiento acústico**

### **2.2.2.1. Aislamiento acústico a ruido aéreo**

En la Norma UNE-EN 12354-1:2000 se describen modelos de cálculo diseñados para estimar el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos de edificios, utilizando, en primer lugar medidas de transmisión directa e indirecta a través de los elementos constructivos del edificio y en segundo lugar, utilizando métodos teóricos derivados de la propagación acústica en los elementos estructurales.

Se describen en esta normativa dos modelos distintos, el modelo detallado y el modelo simplificado, de aplicación más restringido. En el modelo detallado los valores se dan por bandas de frecuencia y a partir de estos se permite el cálculo de un valor global. En el modelo simplificado el valor global se obtiene a partir de valores globales de los distintos elementos implicados en el aislamiento.

En esta normativa se distingue entre magnitudes que expresan características de los edificios y magnitudes que expresan características de los diferentes elementos que forman el edificio, éstas últimas se utilizan como datos de entrada en los modelos para estimar las características acústicas de la edificación y son magnitudes que se han obtenido en laboratorio, concretamente, la mayoría de estas magnitudes se obtienen en cámaras de transmisión. En cuanto a las magnitudes que expresan características de los edificios, son magnitudes que se obtienen en condiciones “in situ” por esto la UNE EN 12354-1:2000 [UNE12354-1] referencia a la UNE-EN ISO 140-4:1999 [UNE12354-1], siendo estas magnitudes el índice de reducción aparente, expresión 2.2.3, la diferencia de

nivel estandarizado, expresión 2.2.1 y la diferencia de nivel normalizado, expresión 2.2.2.

A continuación se definen las magnitudes que expresan características de los elementos más relevantes. El índice de reducción acústica,  $R$ , relaciona la potencia incidente sobre la muestra sometida a ensayo,  $W_1$ , y la potencia acústica transmitida a través de esta,  $W_2$ . Se puede obtener utilizando la siguiente expresión:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ dB} \quad (2.2.9)$$

Se puede conocer la influencia de una capa adicional sobre un elemento estructuralmente básico, por ejemplo un recubrimiento amortiguador en la pared, un techo suspendido, un suelo flotante, etc. Para conocer esta influencia se debe calcular la mejora del índice de reducción acústica,  $\Delta R$ , esta magnitud se obtiene como la diferencia del índice de reducción acústica con y sin el recubrimiento.

Otra de las magnitudes de interés para poder obtener mediante los modelos descritos en la normativa [UNE12354-1] el aislamiento global de todo el conjunto constructivo es el índice de reducción acústica por flancos,  $R_{ij}$ . Cuando la transmisión entre dos recintos sucede a través de un camino distinto al camino directo y, además es estructural se llama transmisión por flancos. La expresión para obtener el índice de reducción acústica por flancos se muestra a continuación:

$$R_{ij} = -10 \log \tau_{ij} \text{ dB} \quad (2.2.10)$$

Donde el factor de transmisión por flancos,  $\tau_{ij}$ , depende de la potencia acústica que incide sobre el área de la superficie separadora  $W_1$  y la potencia radiada desde elemento  $i$  del recinto emisor al elemento  $j$  del recinto receptor,  $W_{ij}$ .

$$\tau_{ij} = \frac{W_{ij}}{W_1} \quad (2.2.11)$$

La siguiente magnitud es el objeto de todo este trabajo de investigación. Es el índice de reducción vibracional o índice de reducción de vibraciones,  $K_{ij}$ . Esta magnitud está relacionada con la transmisión de potencia vibratoria entre diferentes elementos estructurales. Una de las expresiones a partir de la cual se puede obtener esta magnitud es la siguiente:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \text{ dB} \quad (2.2.12)$$

Donde:

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

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

$l_{ij}$  es la longitud común de la unión entre los 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 se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$a = \frac{2.2 \cdot \pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (2.2.13)$$

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; 1000 Hz y  $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire, en metros por segundo.

Además de necesitar evaluar estas magnitudes para poder conocer el aislamiento a ruido aéreo puede ser necesario conocer información sobre los elementos constructivos, como su masa por unidad de área,  $m'$ , en kilogramo por metro cuadrado, el tipo de elemento, el tipo de unión, etc.

La base tanto el modelo detallado como el modelo simplificado que presenta esta normativa [UNE12354-1] es el factor de transmisión total. La potencia acústica en el recinto receptor es debida no solo al sonido radiado por los elementos separadores estructurales, tanto de forma aérea como estructural, sino también debido a las transmisiones a partir de diferentes flancos. En la figura 2.2.3 se ilustra un ejemplo de la transmisión aérea entre dos recintos debida a diferentes contribuciones. En la figura 2.2.4 se muestra el esquema de los posibles caminos  $ij$  de transmisión radiado por un elemento estructural.

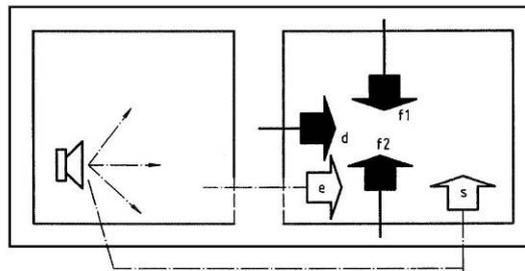


Figura 2.2.3 Diferentes contribuciones a la transmisión acústica total,  $d$ ; radiado directamente por el elemento separador,  $f1$  y  $f2$ ; radiado por elemento de flanco,  $e$ ; radiado de forma indirecta por componentes instalados en el elemento separador y  $s$ ; transmisión indirecta.

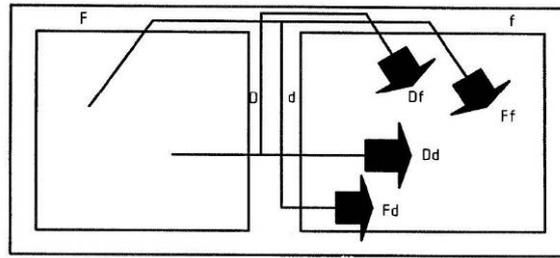


Figura 2.2.4 Diferentes caminos de transmisión ij si la transmisión es estructural. Para los elementos i del recinto emisor F; elementos de flanco y D para elemento separador. Para los elementos j del recinto receptor f; elementos de flanco y d; para elementos separadores.

Por lo tanto el índice de reducción acústica medido in situ, que se designa como  $R'$ , teniendo en cuenta todas las posibles transmisiones se puede escribir como:

$$R' = -10 \lg \left( \tau_d + \sum_1^m \tau_f + \sum_1^n \tau_e + \sum_1^q \tau_s \right) \quad (2.2.14)$$

Las suposiciones generales de ambos modelos, el detallado y el simplificado, son que los diferentes caminos de transmisión son independientes y que los campos acústicos se comportan estadísticamente. Con estas restricciones los modelos son bastante generales, aunque no representan la transmisión de potencia acústica entre cualquier tipo de elemento constructivo. En consecuencia los modelos presentados se restringen a recintos adyacentes y los elementos estructurales que menos se desvían de la realidad mediante estos modelos son elementos monolíticos, paredes con cavidades y paredes ligeras de doble hoja.

A continuación se detallan las contribuciones de transmisión que afectan a cada uno de los factores de transmisión de la expresión 2.2.14.

El factor de transmisión para el elemento separador está constituido por las contribuciones de la transmisión directa y n transmisiones por flanco.

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{F=1}^n \tau_{Fd} \quad (2.2.15)$$

El factor de transmisión para cada elemento de flanco  $f$  en el recinto receptor está formado por la contribución de dos transmisiones de flanco, la directa y la indirecta.

$$\tau_f = \tau_{Df} + \tau_{Ff} \quad (2.2.16)$$

Y cada camino de transmisión estructural se puede obtener de la siguiente forma:

$$\tau_{ij} = 10^{-R_{ij}/10} \quad (2.2.17)$$

Por último  $\tau_e$  y  $\tau_s$ , transmisiones aéreas directas e indirectas respectivamente, se obtienen a partir de las diferencias de nivel normalizadas,  $D_{n,e}$  y  $D_{n,s}$ , a partir del área del elemento separador,  $S_s$  y a partir del área de absorción equivalente de ésta,  $A_0$ .

$$\tau_e = \frac{A_0}{S_s} 10^{-D_{n,e}/10} \quad (2.2.18)$$

$$\tau_s = \frac{A_0}{S_s} 10^{-D_{n,s}/10} \quad (2.2.19)$$

Necesitamos conocer el índice de reducción acústica tanto de las transmisiones directas como de las indirectas, estos se obtienen a partir de una serie de datos de entrada obtenidos en condiciones normalizadas, esto es en laboratorio, pero es necesario transformarlos a valores in situ antes de determinar la transmisión acústica.

Para obtener el índice de reducción acústica del elemento separador,  $R_{situ}$ , a partir de  $R$  es necesario conocer el tiempo de reverberación estructural in situ del elemento, en segundos  $T_{s,situ}$  y el tiempo de reverberación estructural del elemento obtenido en laboratorio,  $T_{s,lab}$ .

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (2.2.20)$$

La norma UNE EN 12354-1:2000 [UNE12354-1] permite para algunos elementos de construcción considerar  $T_{s,situ}$  igual al  $T_{s,lab}$ , indicando que para estos elementos en concreto esta aproximación conduce a un término de corrección de 0 dB. Los elementos constructivos en concreto son; elementos ligeros de doble hoja, elementos con un factor de pérdidas interno mayor que 0,03, elementos mucho más ligeros que los elementos estructurales que los rodean (por un factor de al menos 3) y elementos que no estén fuertemente conectados a los elementos estructurales circundantes. Para cualquier otro tipo de elemento o situación, y en el caso de no poder obtener el cociente de la expresión 2.2.20 la normativa permite una serie de estimaciones. Estas estimaciones han sido estudiadas con detalle para este trabajo de investigación. En el punto 4.1.4 se pueden ver los resultados de este estudio en concreto.

Para los recubrimientos, la normativa permite utilizar el valor del laboratorio como aproximación del valor in situ a la mejora:

$$\Delta R_{situ} = \Delta R \quad (2.2.21)$$

Una vez transformados los valores de laboratorio en valores in situ, y considerando la base de estos modelos en los que el factor de transmisión se desglosa en transmisiones directas y/o indirectas, aéreas y/o estructurales, se puede obtener el índice de reducción acústica mediante la siguiente expresión:

$$R = -10 \log \left( 10^{-R_{Dd}/10} + \sum_{f=F=1}^n 10^{-R_{Ef}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd}/10} \right) \quad (2.2.22)$$

Siendo las expresiones para cada uno de los términos aéreo (2.2.23) o estructural (2.2.24):

$$R_{Dd} = R_s + \Delta R_{Dd} \quad (2.2.23)$$

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_i + \Delta R_j + \overline{D}_{v,ij} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (2.2.24)$$

Donde  $S_i$  y  $S_j$  son las áreas de los elementos  $i$  y  $j$  respectivamente en  $m^2$  y  $S_s$  es el área del elemento separador.  $\overline{D}_{v,ij}$  representa el primer término de la expresión 2.2.12, la diferencia de niveles de velocidad promediada. La expresión 2.2.24 se puede reescribir tomando una serie de aproximaciones, estas aproximaciones hacen referencia al tiempo de reverberación estructural y se traducen en que las longitudes de absorción equivalente,  $a_i$  y  $a_j$ , ecuación 2.2.13, in situ se puedan aproximar a  $S_i/l_0$  o  $S_j/l_0$  respectivamente, siendo  $l_0$  una longitud de referencia de 1m.

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_i + \Delta R_j + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{ij}} \quad (2.2.25)$$

Donde  $l_{ij}$  es la longitud común de acoplo entre los elementos  $i$  y  $j$ , en metros.

Destacar que en la herramienta de cálculo que ofrece el Código Técnico de la Edificación [DB-HR] para el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos, las expresiones a partir de las cuales se obtienen las contribuciones por flancos,  $R_{ij}$ , responde a la expresión 2.2.25, sin indicar particularmente que esta expresión implica haber considerado una serie de aproximaciones referentes al tiempo de reverberación estructural, o en la práctica, referente a las longitudes de absorción equivalentes.

A continuación se enumeran las limitaciones que presenta el modelo detallado de cálculo descrito en la UNE EN ISO 12354-1:2000 [UNE12354-1] y reconocidas en el mismo documento:

El modelo solo se puede utilizar para combinaciones de elementos en los que el índice de reducción de vibraciones sea conocido o se pueda estimar. Sólo es aplicable a elementos estructurales básicos que tengan aproximadamente las mismas características de radiación por ambas caras.

En aquellos casos en los que los forjados no se puedan considerar elementos independientes, el cálculo del aislamiento a partir del modelo sólo puede hacerse a modo de estimación.

En este modelo se desprecia la contribución de transmisiones secundarias que involucren más de una unión. Puede que en el mismo modelo quede esto compensado ya que las ecuaciones empíricas reconocidas para obtener el índice de reducción de vibraciones están basadas en mediciones in situ, pero puede que en casos donde existan recubrimientos, las transmisiones secundarias no sean despreciables.

El modelo solo describe transmisiones entre recintos adyacentes.

Las limitaciones que presenta el modelo simplificado son más amplias. Recordemos que en el modelo simplificado los valores de entrada son valores globales ponderados, con ponderación  $w$  según la norma UNE EN ISO 717-2:1997 [UNE717], y que a partir de valores globales de cada elemento se obtiene el valor global total. Las limitaciones que presenta este modelo simplificado, además de las mismas que presenta el modelo detallado son las siguientes;

El modelo simplificado puede dar resultados menos precisos si en las viviendas donde se aplica las dimensiones de los elementos estructurales se desvían de las dimensiones empleadas en los ensayos normalizados.

El modelo simplificado supone una dependencia con la frecuencia de las diferentes uniones entre elementos similar. Si el índice de reducción de

vibraciones presenta dependencia en la frecuencia, la precisión de este modelo es menor.

### 2.2.2.2. Aislamiento acústico a ruido de impacto

En la Norma UNE-EN 12354-2:2001 [UNE12354-2] se especifican modelos de cálculo para la estimación del aislamiento acústico a ruido de impactos. Fundamentalmente estos modelos se basan en las mediciones para la caracterización de la transmisión directa o indirecta a través de los elementos constructivos del edificio y en métodos desarrollados teóricamente a partir de la propagación acústica a través de elementos estructurales.

Al igual que para el aislamiento acústico a ruido aéreo se describen en esta normativa dos modelos distintos, el modelo detallado y el modelo simplificado, de aplicación más restringido. En el modelo detallado los valores se dan por bandas de frecuencia y a partir de estos se permite el cálculo de un valor global. En el modelo simplificado el valor global se obtiene a partir de valores globales de los distintos elementos implicados en el aislamiento.

También del mismo modo, en esta normativa se distingue entre magnitudes obtenidas mediante ensayos normalizados, en laboratorio y magnitudes que se obtienen in situ. Las magnitudes normalizadas puedan ser utilizadas como datos de entrada de estos modelos, antes se deben transformar a valores in situ, tomando también en el caso de aislamiento a ruido de impacto la expresión 2.2.20 para el índice de reducción acústica y la análoga para el nivel de presión acústica:

$$L_{n,situ} = L_n + 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \quad (2.2.26)$$

La mayoría de magnitudes relevantes en el modelo detallado por esta normativa [UNE12354-2] ya han sido expresadas en los puntos anteriores; nivel de presión acústica de impactos normalizado,  $L'_n$ , nivel de presión de impactos normalizada,  $L'_{nT}$  (expresión 2.2.7), índice de reducción acústica a ruido aéreo,  $R$  (expresión

2.2.8), índice de reducción de vibraciones (expresión 2.2.12), etc. Además se da la expresión para el nivel de presión acústica de impactos indirecta, a través de flancos, normalizado:

$$L'_{n,f} = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (2.2.27)$$

Siendo  $L_i$  el nivel de presión acústica de impactos medido en recepción, en decibelios,  $A$  el área de absorción equivalente en el recinto receptor, expresión 2.2.4,  $A_0$  un área de referencia,  $10\text{m}^2$  y el subíndice  $f$  corresponde al flanco. Un esquema de los posibles flancos en la transmisión de ruido de impacto se puede observar en la figura 2.2.5, donde se distingue entre recintos adyacentes en vertical o recintos adyacentes en horizontal.

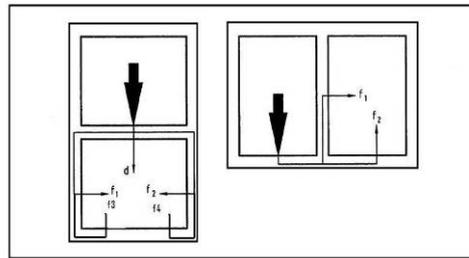


Figura 2.2.5 Esquema de los caminos de transmisión del ruido de impactos entre dos recintos en horizontal o en vertical.

Las suposiciones generales de ambos modelos, el detallado y el simplificado, son que los diferentes caminos de transmisión son independientes y que los campos acústicos y vibratorios se comportan estadísticamente de forma que el nivel de presión acústica de impactos,  $L'_n$ , se puede obtener mediante la suma de la energía transmitida a través de cada uno de los recorridos. Se dan las siguientes expresiones para recintos adyacentes en vertical, esto es uno encima del otro, expresión 2.2.28 y para recintos adyacentes en horizontal, uno al lado del otro, expresión 2.2.29:

$$L'_n = 10 \log \left( 10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (2.2.28)$$

$$L'_n = 10 \log \left( \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (2.2.29)$$

Los caminos de transmisión considerados se muestran en la figura 2.2.5 donde *d* indica la transmisión acústica a impacto directa y *f* la transmisión acústica de impactos indirectos.

El modelo detallado permite determinar el nivel de presión acústica de impactos normalizado para la transmisión directa mediante la siguiente expresión:

$$L_{n,d} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ} \quad (2.2.30)$$

Y permite determinar el nivel de presión acústica de impactos normalizado para la transmisión indirecta desde el forjado *i* hasta el flanco *j* como:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \quad (2.2.31)$$

Donde  $S_i$  es el área del elemento excitado (forjado) y  $S_j$  es el área del elemento radiante receptor, ambos en metros cuadrados.

Las limitaciones de este modelo detallado según la propia normativa [UNE12354-2] se enumeran a continuación:

El modelo sólo es aplicable para las transmisiones en las que el índice de reducción de vibraciones sea conocido o pueda ser estimado.

Si los elementos implicados en la transmisión no radian por sus dos caras de forma semejante el modelo presenta desviaciones.

En este modelo, se está suponiendo que la contribución a la radiación de caminos secundarios es despreciable.

En el caso de aislamiento a ruido de impacto, también en el modelo simplificado se dará el resultado en ponderación w [UNE717], pero a diferencia del aislamiento a ruido aéreo el nivel de presión acústica normalizado, y ponderado, no presenta la misma expresión que en el modelo detallado, en este caso

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \tag{2.2.32}$$

Siendo  $L_{n,w,eq}$  el nivel de presión acústica ponderada de impactos normalizada equivalente y K una corrección para la transmisión acústica de impactos sobre construcciones de flancos homogéneas, en decibelios. Sus valores para diferentes combinaciones de masa superficiales, en  $kg/m^2$  se pueden ver en la tabla 2.2.1

Densidad superficial del elemento separador (forjado) , en $kg/m^2$	Densidad superficial media de los elementos de flanco no cubiertos con una capa adicional , en $kg/m^2$								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
<b>100</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>150</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>200</b>	2	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>250</b>	2	1	1	1	0	0	0	0	0
<b>300</b>	3	2	1	1	1	0	0	0	0
<b>350</b>	3	2	1	1	1	1	0	0	0
<b>400</b>	4	2	1	1	1	1	1	0	0
<b>450</b>	4	3	2	2	1	1	1	1	1
<b>500</b>	4	3	2	2	1	1	1	1	1
<b>600</b>	5	4	2	2	2	1	1	1	1
<b>700</b>	5	4	3	3	2	2	1	1	1
<b>800</b>	6	4	3	3	2	2	2	1	1
<b>900</b>	6	5	3	3	3	2	2	2	2

Tabla 2.2.1 Corrección K para las transmisiones indirectas, modelos simplificado, en dB

Las limitaciones que presenta el modelo simplificado son, además de las que presenta el modelo detallado, son que solo es aplicable a construcciones homogéneas (cemento y/u hormigón) con suelo flotantes o recubrimientos blandos sobre forjados homogéneos y que solo es aplicable a recintos verticales, uno encima del otro, además estos recintos tienen que tener unas dimensiones comparables con las dimensiones de una vivienda convencional.

Debido a que parte de esta memoria de tesis doctoral está dedicada a la caracterización de materiales para la edificación, se ha decidido introducir en este punto información de la reducción del nivel de presión acústica de impactos,  $\Delta L$ , en el caso particular de suelos flotantes, ya que en este caso una de las propiedades elásticas del material que forma el suelo flotante y que ha sido presentada en el punto 2.1.3, la rigidez dinámica, juega un papel fundamental.

En uno de los anexos de la norma UNE EN 12354-2:2000 [UNE12354-2] se muestran las expresiones para obtener la reducción del nivel de presión acústica a impactos en el caso de suelos flotantes, si este está hecho a base de arena/cemento o sulfatos de calcio, expresión 2.2.33 o si el suelo flotante es de tipo asfáltico o suelo flotante eco, expresión 2.2.34.

$$\Delta L = 30 \log \left( \frac{f}{f_0} \right) \quad (2.2.33)$$

$$\Delta L = 40 \log \left( \frac{f}{f_0} \right) \quad (2.2.34)$$

Siendo  $f$  la frecuencia central de la banda en tercio de octava, en Hercios y  $f_0$  la frecuencia de resonancia del sistema y que está relacionada con la masa por unidad de área ( $m'$  en  $\text{kg/m}^2$ ) del suelo flotante y con la rigidez dinámica aparente ( $s'$  en  $\text{MN/m}^3$ ) de la capa elástica que conforma el suelo flotante.

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (2.2.35)$$

### 2.2.2.3. Índice de reducción vibracional

Se ha decidido dedicar este punto a las ecuaciones empíricas que nos ofrece la normativa vigente [UNE12354-1] para poder obtener el índice de reducción de vibraciones. El valor de este parámetro no solo influye en el aislamiento global de todo un conjunto constructivo, sino que además sirve como dato de entrada de muchos modelos de predicción del aislamiento acústico. Es posible, por tanto, obtener información de la transmisión por flanco utilizando una serie de ecuaciones empíricas reconocidas para ciertas soluciones constructivas y en un conjunto determinado de diseños rígidos o con elementos elásticos insertados.

En la norma UNE-EN 12354-1:2000 [UNE12354-1] donde se estima las características acústicas de los edificios a partir de las características acústicas de los elementos que lo conforman, se detallan, como se ha visto anteriormente dos modelos de cálculo: el detallado y el simplificado. En ambos el índice de reducción de vibraciones aparece como dato de entrada y es además determinante para algunas de las limitaciones que presentan estos modelos.

Cabe destacar que en ambos modelos se considera la estimación del índice de reducción vibracional de recubrimientos, como por ejemplo suelos flotantes, de forma idéntica a la unión de elementos rígidos, asumiendo de forma independiente una mejora posterior al estudio de  $K_{ij}$  en el índice de reducción acústica. En la estimación de esta mejora presenta un papel importante la rigidez dinámica del recubrimiento.

Las magnitudes involucradas en estos modelos deberían, tal y como se dice en la normativa, obtenerse fundamentalmente mediante medidas normalizadas en laboratorio. Sin embargo, también podrían deducirse de otras formas, como estimaciones empíricas o resultados de mediciones in situ.

En la misma normativa, en su Anexo E, se dan datos para el índice de reducción vibracional para los tipos habituales de uniones, dependiendo de las densidades

superficiales de los elementos,  $m_1$  y  $m_2$ , en  $\text{kg/m}^2$ . Solo hay datos disponibles para uniones en las que los elementos a ambos lados del mismo plano tienen la misma masa. Las ecuaciones empíricas que se dan para la estimación de  $K_{ij}$  se basan en  $M$ :

$$M = \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \quad (2.2.36)$$

Donde

$m'_i$  es la densidad superficial ( $\text{kg/m}^2$ ) del elemento  $i$  en la transmisión  $ij$ .

$m'_{\perp i}$  es la densidad superficial ( $\text{kg/m}^2$ ) del otro elemento, perpendicular al  $i$ , y que forma la unión.

Se dan ecuaciones empíricas para los diferentes caminos de transmisión de las siguientes posibilidades: Unión rígida en cruz, unión rígida en T, unión de paredes con capas intermedias flexibles, unión de fachada ligera, unión de pared ligera de doble hoja con elementos homogéneos, unión de paredes ligeras de dobles hoja acoplados, esquinas o cambios de espesor.

A continuación se reproducen tan sólo algunas de estas ecuaciones empíricas de diferentes configuraciones, ecuaciones que han sido necesarias para el estudio de los resultados presentados en capítulos siguientes.

En la figura 2.2.6 se puede observar el esquema que representa la configuración rígida en cruz, y las expresiones empíricas asociadas son las expresiones (2.2.37) y (2.2.38)

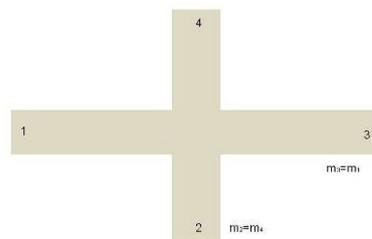


Figura 2.2.6 Uniones Rígidas en Cruz

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \text{ dB}; 0 \text{ dB/octava} \quad (2.2.37)$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7M^2 (= K_{23}) \text{ dB}; 0 \text{ dB/octava} \quad (2.2.38)$$

El esquema que representa la configuración unión en T rígida se observa en la figura 2.2.7. Las expresiones empíricas asociadas son las (2.2.39) y (2.2.40).

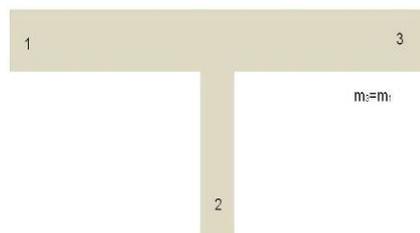
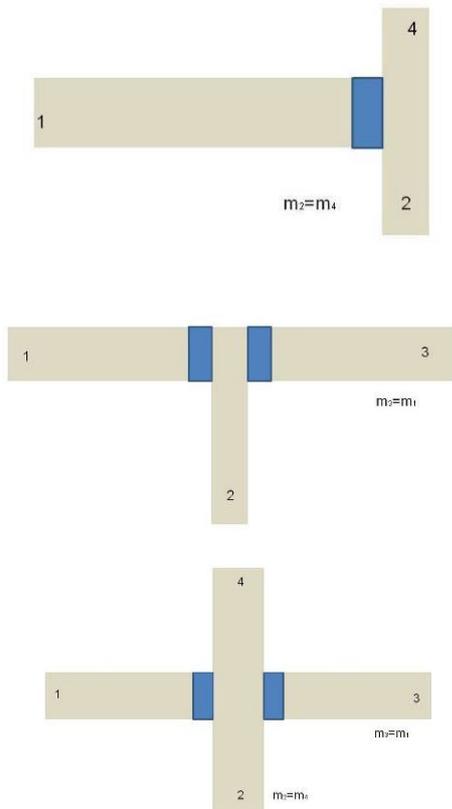


Figura 2.2.7 Uniones Rígidas en T

$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \text{ dB}; 0 \text{ dB/octava} \quad (2.2.39)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7M^2 (= K_{23}) \text{ dB}; 0 \text{ dB/octava} \quad (2.2.40)$$

En la figura 2.2.8 se puede observar las diferentes configuraciones que en [UNE12354-1] se describen para uniones de paredes con capas intermedias flexibles. El índice de reducción de vibraciones en estas configuraciones vienen descritas por las expresiones desde la (2.2.41) hasta la (2.2.44).



$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 + 2\Delta_1 dB \quad (2.2.41)$$

$$K_{24} = 3,7 + 14,1M + 5,7M^2 dB \quad (2.2.42)$$

$$0 \leq K_{24} \leq -4dB; 0dB/octava$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7M^2 + \Delta_1 (= K_{23}) dB \quad (2.2.43)$$

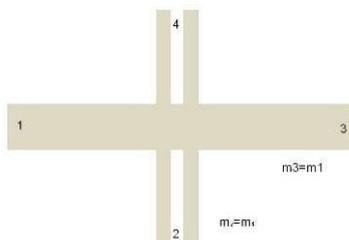
$$\Delta_1 = 10 \lg \frac{f}{f_1} dB; f > f_1 \quad (2.2.44)$$

$f_1 = 125$  Hz si existe la siguiente relación entre Módulo de Young ( $E_1$  en  $N/m^2$ ) y espesor ( $e_1$  en m) del elemento flexible insertado

$$\frac{E_1}{e_1} \approx 100 MN/m^3$$

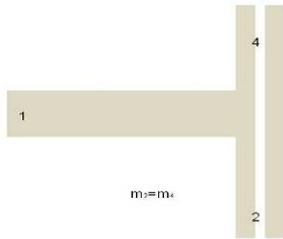
Figura 2.2.8 Uniones de paredes con capas intermedias flexibles.

La descripción de uniones de paredes ligeras de doble hoja con elementos homogéneos se puede observar en la figura 2.2.9 y mediante las expresiones (2.2.45), (2.2.46) y (2.2.47).



$$K_{13} = 10 + 20M - 3,3 \lg \frac{f}{f_k} dB; \min 10dB \quad (2.2.45)$$

$$K_{24} = 3,0 - 14,1M + 5,7M^2 dB; \quad (2.2.46)$$



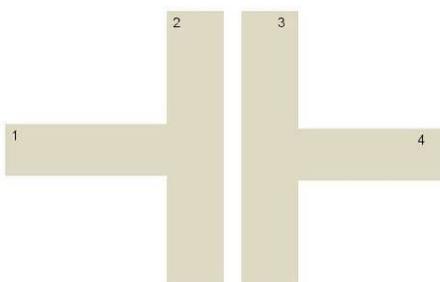
$$\frac{m_2}{m_1} > 3,0dB/octava$$

$$K_{12} = 10 + 10|M| + 3,31g \frac{f}{f_K} dB (= K_{23}) \quad (2.2.47)$$

$$f_K = 500Hz$$

Figura 2.2.9 Uniones de paredes ligeras de doble hoja con elementos homogéneos.

Existen investigaciones del Centre Scientifique et Technique du Batiment, CSTB, donde se ofrecen diferentes ecuaciones empíricas a las descritas anteriormente para algunos casos particulares. En concreto para el caso en que alguno de los elementos que forman la unión sean elementos dobles de ladrillos, bien rígidos, bien sobre alguna lámina elástica. A continuación se describen algunos de los casos que se presentan en el estudio del CSTB y que nos interesan para este trabajo, podemos observar que las ecuaciones empíricas son muy semejantes a las descritas por 12354-1:2000, pero con algunas correcciones. En la figura 2.2.10 se pueden observar ecuaciones y esquema de configuración de doble ladrillo.

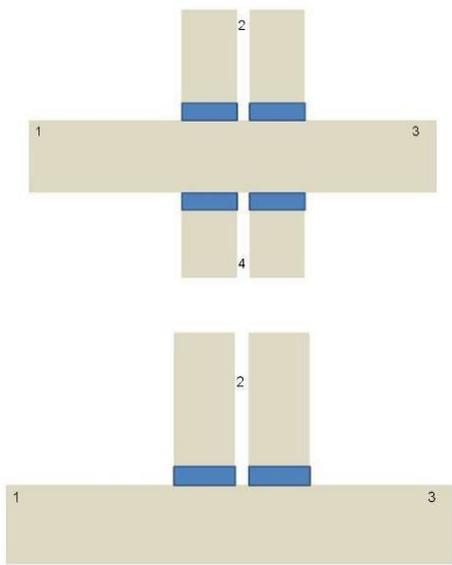


$$K_{12} = 30 + 10|M| - 3,31g \left( \frac{f}{500} \right) = K_{23} dB \quad (2.2.48)$$

$$K_{13} = 20 + MAX(10; 10 + 20M) - 3,31g \left( \frac{f}{500} \right) dB \quad (2.2.49)$$

Figura 2.2.10 Configuración de doble ladrillo.

Figura 2.2.11 y expresiones desde la (2.2.50) hasta (2.2.52) para configuraciones de doble ladrillo pero con láminas flexibles.



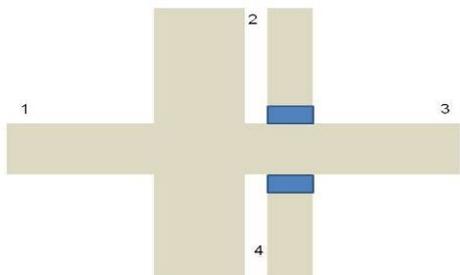
$$K_{12} = 7,5 + 10M^2 + 3,3 \lg \frac{f}{500} = K_{23} dB \quad (2.2.50)$$

$$K_{13} = 4,7 + 14,1M + 5,7M^2 dB \quad (2.2.51)$$

$$K_{24} = 7,5 + 20M^2 - 3,3 \lg \frac{f}{500} dB \quad (2.2.52)$$

Figura 2.2.11 Configuración de doble ladrillo con láminas.

En el caso de unión en Cruz de doble ladrillo, pero con masa distintas, las expresiones aportadas por CSTB a utilizar serían las siguientes:



$$K_{12} = 8,7 + 5,7M^2 = K_{23} dB \quad (2.53)$$

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 dB \quad (2.54)$$

$$K_{24} = 8,7 - 17,1M + 5,7M^2 dB \quad (2.55)$$

Figura 2.2.12 Uniones rígidas de diferente masa y elemento flexible en una de sus hojas

### **2.3 NORMATIVA PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL EN LABORATORIO**

Desde el punto de vista numérico, el método reconocido más habitual para valorar acústicamente la transmisión por flancos es el de obtener el índice de reducción vibracional. Los procedimientos de ensayo para obtener este parámetro vienen detallados en la norma UNE-EN ISO 10848-1:2007 [UNE10848-1]. En esta Norma se describe un procedimiento de medida de la diferencia de niveles de velocidad entre los elementos a estudio, así como del tiempo de reverberación estructural para recintos de ensayo en laboratorio. Estas magnitudes, como podremos ver más adelante, son esenciales para poder conocer el índice de reducción de vibraciones.

Es habitual trasladar este procedimiento a situaciones in situ ya que no se disponen de procedimientos de medida concretos para este caso. Con esto, se deben asumir una serie de limitaciones.

A continuación se enumeran algunas generalidades del procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 10848-1:2007 [UNE10848-1] para obtener el valor del índice de reducción de vibraciones en condiciones normalizadas. El procedimiento más detallado, y a veces adaptado, se desarrollará en la sección 4.1. En esta sección cada uno de los puntos; 4.1.1 y 4.1.2 describe partes de esta normativa [UNE10848-1] y muchas de las limitaciones que se describen en la misma se enumeran en el punto 4.1.4.

La norma UNE-EN ISO 10848-1:2007 especifica los métodos experimentales que se deben utilizar en un laboratorio de ensayo para caracterizar la transmisión por flancos de uno o varios elementos de construcción. En esta normativa, se definen no solo las magnitudes que caracterizan la transmisión por flancos, sino también aquellas magnitudes necesarias para obtenerlas.

Una de las que ofrece para describir la transmisión por flancos es el índice de reducción de vibraciones,  $K_{ij}$ . Esta magnitud presenta sus restricciones y sus campos de aplicación. Se basa en las consideraciones de la transmisión de potencia como una simplificación de la teoría del análisis estadístico de la energía [Cro69].

Las principales hipótesis son condiciones de acoplamiento entre  $i$  y  $j$  débil y campos de vibración difusos.

El índice de reducción de vibraciones se puede obtener mediante excitación aérea de los elementos o excitación estructural. La misma normativa muestra que la excitación aérea en algunos casos no es aplicable y en otros conlleva a un proceso lento e ineficaz. Todos los ensayos necesarios para redactar este trabajo se han realizado mediante excitación estructural.

Se detallan también, de forma muy específica, las condiciones de las muestras y recintos de ensayo, las posiciones relativas de fuentes de excitación, transductores, límites de ensayo y uniones. Esto para la medición de las magnitudes necesarias para obtener el índice de reducción de vibraciones; diferencia de niveles de velocidad promediada y tiempo de reverberación estructural.

#### **2.4. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

En esta sección se introduce el método de los elementos finitos, que se ha utilizado para poder desarrollar la memoria de Tesis Doctoral que se presenta, a nivel de usuario, como herramienta de cálculo.

Mediante el método de los elementos finitos, un sistema continuo se divide en una serie de porciones finitas delimitadas por nodos, cuyos grados de libertad constituyen las incógnitas del problema. La exactitud de los resultados depende del número de elementos utilizados en el mallado.

Cuando se tiene un problema definido por un sistema continuo complejo, su resolución resulta a veces inabordable. El método de los elementos finitos propone fragmentar el sistema en elementos menores, enlazando los resultados obtenidos para cada elemento y así poder lograr la solución del sistema original.

A principios del siglo XX ya algunos investigadores aproximaron y modelaron un sistema continuo elástico usando barras elásticas discretas equivalentes. Sin embargo Courant en 1943 ha sido acreditado como la primera persona que desarrolló el método de los elementos finitos [Cou43]. En 1967 Zienkiewicz y

Cheung [Zie67] escribieron el primer libro sobre el Método y en 1971 apareció por primera vez ANSYS [Ans71], herramienta que ha sido utilizada, como usuarios, para la realización de parte de esta memoria de tesis doctoral.

Este método ha evolucionado de diferentes maneras. Por un lado con el estudio de sistemas físicos con un número discreto de variables, para describir el comportamiento físico de las partes que constituyen el sistema. Y por otro lado con el estudio matemático de ecuaciones diferenciales utilizando métodos de diferencias finitas, métodos de residuos ponderados o técnicas aproximadas.

La evolución tecnológica de los ordenadores ha incrementado el interés por estos sistemas de cálculo, ya que la gran cantidad de procesos de datos necesarios solo pueden abordarse eficientemente con el uso de ordenadores en ocasiones de gran potencia.

El primer paso en el método de los elementos finitos es el de discretizar la estructura. Es decir, se ha de dividir el sistema continuo en partes reemplazando por tanto un sistema con infinitos grados de libertad por otro con un número finito de grados de libertad. La forma, el tamaño y los grados de libertad permitidos al elemento fijarán la validez de la solución obtenida. En la figura 2.4.1 se observan diferentes ejemplos de discretización.

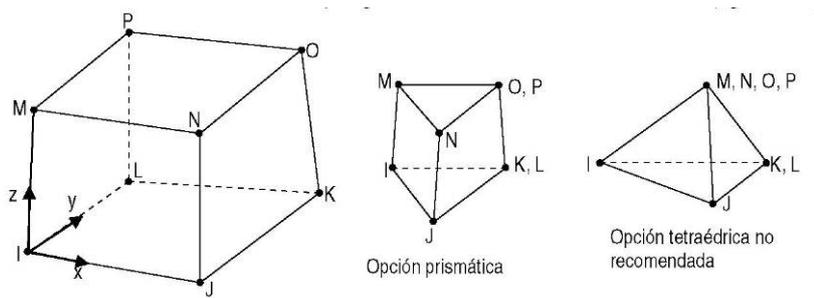


Figura 2.4.1

Los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, llamados nodos situados en sus contornos. Las incógnitas de los problemas son los desplazamientos de los nodos.

En la figura 2.4.2 se muestra un elemento para un análisis en 2D. En ese caso, el

mallado es con elementos planos de ocho nodos, con dos grados de libertad por nodo, lo que permite desplazamientos en X e Y.

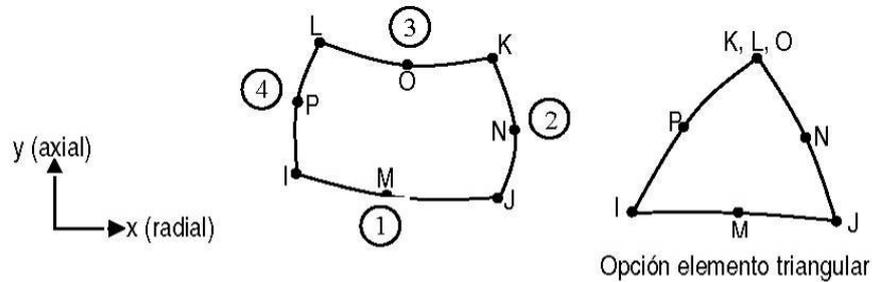


Figura 2.4.2

El número medio de elementos por modelo suele ser elevado (10000 elementos o más). En la figura 2.4.3 se muestra el ejemplo de un mallado de una unión en T. En este caso, la ecuación del movimiento armónico a resolver es la siguiente:

$$\{F(t)\} = [M] \left\{ \frac{d^2 y}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dy}{dt} \right\} + [K] \{y\} \tag{2.4.1}$$

Donde  $\{F(t)\}$  es la fuerza de excitación armónica,  $[M]$  es la matriz de masa,  $[C]$  es la matriz de amortiguamiento y  $[K]$  es la matriz de rigidez.

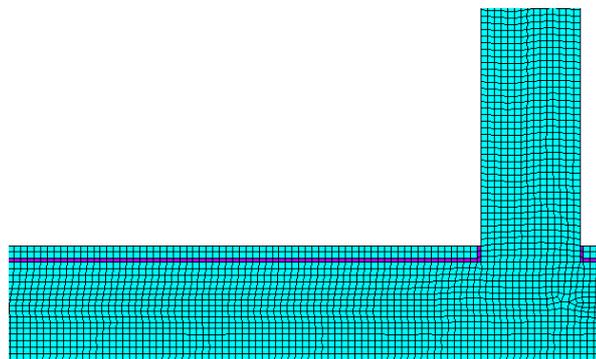


Figura 2.4.3 Ejemplo de mallado de una de las configuraciones en T estudiadas para la elaboración de parte de esta memoria de Tesis Doctoral.

### **3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

A partir de este capítulo empiezan las aportaciones presentadas en esta memoria de Tesis Doctoral. Tal y como se ha distinguido en el capítulo primero las aportaciones también se clasifican en dos vertientes.

En este capítulo 3 se describen las aportaciones referidas a la caracterización de materiales. En la sección 3.1 se presentan las aportaciones realizadas tomando como base experimental los materiales absorbentes acústicos, centrándonos no solo en materiales clásicos (desde el punto de vista del aislamiento acústico) sino también en los que podríamos denominar de nueva generación, tales como materiales reciclados o materiales elaborados a partir de fibras naturales. En la sección 3.2 la base experimental ha sido las propiedades elásticas de los materiales. Se presentan en esta sección las aportaciones a los materiales que presentan características elásticas evaluables para considerar su aplicación en un suelo flotante.

#### **3.1 MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS**

En los diferentes puntos de esta sección se validan las técnicas de caracterización que se han puesto en marcha para obtener magnitudes propias de los materiales absorbentes acústicos. Además se presenta la amplia campaña de ensayos que ha permitido tanto validar las técnicas utilizadas como estudiar diferentes modelos empíricos de predicción. Los modelos empíricos también son resultado de las aportaciones. En el punto 3.1.2 se estudia la incertidumbre asociada a los modelos ya existentes y se presentan nuevos modelos para absorbentes.

##### **3.1.1 Técnicas de medición.**

###### **3.1.1.1 Validación de un sistema de medida del coeficiente de absorción e impedancia en tubo de Kundt.**

Todos los resultados que aparecen en este trabajo o bien han sido utilizados para cálculos del coeficiente de absorción en incidencia normal e impedancia, han sido obtenidos realizando las medidas con un tubo de Kundt. Este procedimiento es cada vez más habitual ya que permite, bajo ciertas limitaciones, caracterizar

materiales absorbentes acústicos. Existen normativas europeas de referencia como la norma UNE EN 10354-2:2002 [UNE10534] que describen un procedimiento de medida para obtener el coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia de cierre de materiales acústicos. Además, diversos autores basan la caracterización y obtención de modelos de comportamiento en estas medidas [Gar05] [Lor04] [Alb05].

Tanto en las normativas como en los trabajos de base que han hecho posible estas normativas, se especifican las condiciones de ensayo de la función de transferencia para mejorar en lo posible la coherencia de la medida, así como los límites frecuenciales de medida asociados a la construcción del sistema. Uno de los límites clásicos es el grosor del tubo, que debe ser menor que la longitud de onda para asegurar propagación de ondas planas. El tamaño de la cápsula de los micrófonos de medida limita la alta frecuencia y la distancia entre micrófonos limitan la baja frecuencia (debe haber cambios de fase entre los micrófonos) y las altas frecuencias (la distancia de separación debe ser inferior a media longitud de onda).

Otra de las cuestiones abordadas, es el número de promedios, para conseguir aumentar el valor de la función de coherencia y conseguir así, mejorar la medida de la función de transferencia, que suele ser la base de cálculo de los parámetros.

Sin embargo, en estas normativas no se tienen en cuenta las posibles desviaciones por una incorrecta determinación de las distancias y los tamaños de las muestras. En este punto se hace un análisis más detallado de las posibles desviaciones que se pueden cometer en el cálculo del grosor de la muestra o en las distancias que separan a los micrófonos, valorando la validez de los ensayos del coeficiente de absorción y de la impedancia con la técnica descrita en la norma UNE EN 10354-2:2002 [UNE10534]. El rango de frecuencias válido para las medidas, en función del diámetro del tubo, la distancia entre micrófonos y el grosor de la muestra, se discute en esta normativa.

El procedimiento de medida es el descrito en el punto 2.1.1.2.1. Retomemos las ecuaciones allí expresadas:

$$r = \frac{H_{12} - e^{-jk \cdot l}}{e^{jk \cdot l} - H_{12}} \cdot e^{j2k \cdot (l+d)} \quad (3.1.1)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (3.1.2)$$

$$Z = \frac{1+r}{1-r} \quad (3.1.3)$$

Denominemos  $h$  al módulo de la función de transferencia ( $H_{12}$ ) y  $\Omega$  a su fase, se puede escribir la expresión del coeficiente de absorción [Alb06] introduciendo (3.1.3) en (3.1.2):

$$\alpha = 1 - \frac{h^2 - 2h \cos(\Omega + kl) + 1}{h^2 - 2h \cos(-\Omega + kl) + 1} \quad (3.1.4)$$

Se puede observar cómo la dependencia directa con la distancia entre micrófonos,  $d$ , desaparece. Por tanto, una vez obtenida  $H_{12}$ , no existe influencia de  $d$  sobre el coeficiente de absorción (aunque sí que existe en la obtención de  $H_{12}$ ). La expresión (3.1.4) se puede simplificar:

$$\alpha = 1 - \frac{h^2 - 2h \cos(\Omega + kl) + 1}{h^2 - 2h \cos(-\Omega + kl) + 1} = \frac{-4h \sin(\Omega) \sin(kl)}{h^2 - 2h \cos(-\Omega + kl) + 1} \quad (3.1.5)$$

La expresión de la desviación para el coeficiente de absorción,  $\Delta\alpha$ , respecto a la indeterminación cometida en la medida de distancia desde el micrófono 2 a la muestra,  $\Delta l$ , obtenida a partir de (3.1.5) es:

$$\Delta\alpha = \left| -4hk \sin(\Omega) \left[ \frac{\cos(kl)}{(h^2 - 2h \cos(-\Omega + kl) + 1)} + \frac{2h \sin(kl) \sin(-\Omega + kl)}{(h^2 - 2h \cos(-\Omega + kl) + 1)^2} \right] \right| \Delta l \quad (3.1.6)$$

Respecto a la impedancia, esta se puede expresar en función del coeficiente de reflexión:

$$Z = \frac{1+r}{1-r} = \frac{1 - \text{Im}(r)^2 - \text{Re}(r)^2 + j2 \text{Im}(r)}{1 + \text{Re}(r)^2 + \text{Im}(r)^2 - 2 \text{Re}(r)} \quad (3.1.7)$$

A partir de (3.1.7) y tomando parte real y parte imaginaria, se pueden obtener las expresiones para las incertidumbres de partes real e imaginaria de la impedancia:

$$\Delta \text{Re}(Z) = \left| \frac{-2(\text{Im}(r) - 1 + \text{Re}(r))(\text{Im}(r) + 1 - \text{Re}(r))}{(1 + \text{Re}(r)^2 + \text{Im}(r)^2 - 2 \text{Re}(r))^2} \right| \Delta \text{Re}(r) + \quad (3.1.8)$$

$$+ \left| \frac{4 \text{Im}(r)(\text{Re}(r) - 1)}{(1 + \text{Re}(r)^2 + \text{Im}(r)^2 - 2 \text{Re}(r))^2} \right| \Delta \text{Im}(r)$$

$$\Delta \text{Im}(Z) = \left| \frac{-4 \text{Im}(r)(\text{Re}(r) - 1)}{(1 + \text{Re}(r)^2 + \text{Im}(r)^2 - 2 \text{Re}(r))^2} \right| \Delta \text{Re}(r) + \quad (3.1.9)$$

$$+ \left| \frac{-2(\text{Im}(r) - 1 + \text{Re}(r))(\text{Im}(r) + 1 - \text{Re}(r))}{(1 + \text{Re}(r)^2 + \text{Im}(r)^2 - 2 \text{Re}(r))^2} \right| \Delta \text{Im}(r)$$

Las expresiones de las desviaciones cometidas en la obtención de la parte real y en la parte imaginaria del coeficiente de reflexión,  $\Delta \text{Re}(r)$  y  $\Delta \text{Im}(r)$ , se han obtenido de [Lor04].

Se han realizado todos los ensayos de coeficiente de absorción en incidencia normal e impedancia con un tubo de 4cm de diámetro interior. Los micrófonos que se han utilizado son de media pulgada y la separación entre ambos puede ser de 4,8cm o 3,2cm. Para estimar la validación de este sistema de ensayo, se ha estudiado la desviación que se comete en el valor ensayado si tenemos

incertidumbre en la distancia entre el micrófono y la muestra. Para ello se han utilizado diferentes materiales (lanas de roca, lanas de poliéster, espumas recicladas) diferentes promediados de la función de transferencia  $H_{12}$  (4, 16,64 y 128) y las dos distancias entre micros (4,8 y 3,2 cm). Las siguientes figuras nos permiten entender la validez de este método de medida.

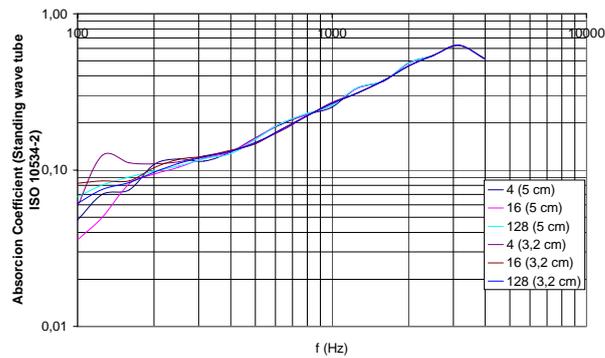


Figura 3.1.1 Coeficiente de absorción en incidencia normal de lana de poliéster, ensayado a diferentes distancias entre los dos micrófonos y diferentes promediados para la obtención de la función de transferencia  $H_{12}$

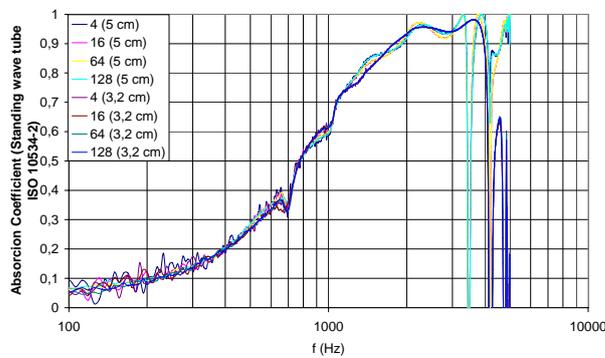


Figura 3.1.2. Coeficiente de absorción en incidencia normal de lana de roca, ensayado a diferentes distancias entre los dos micrófonos y diferentes promediados para la obtención de la función de transferencia  $H_{12}$

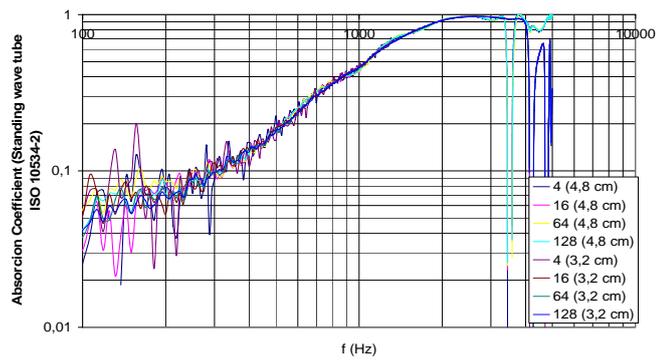


Figura 3.1.3 Coeficiente de absorción en incidencia normal de espumas recicladas, ensayado a diferentes distancias entre los dos micrófonos y diferentes promediados para la obtención de la función de transferencia  $H_{12}$

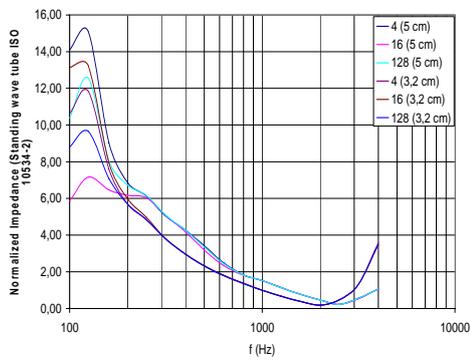


Figura 3.1.4 a)

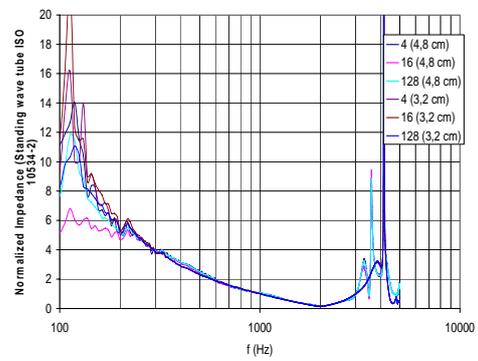


Figura 3.1.4 b)

Figuras 3.1.4. Impedancia característica normalizada de lana de poliéster.

a) Desviación de 2mm en la distancia entre micrófonos (de 4,8 a 5cm)

b) Sin desviación

## Caracterización de Materiales

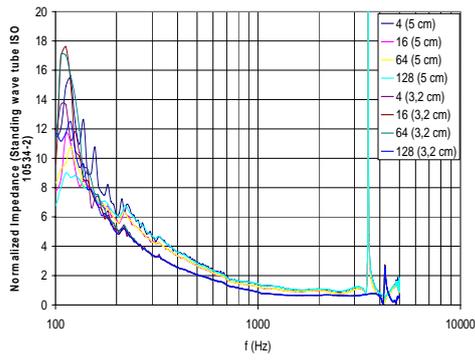


Figura 3.1.5 a)

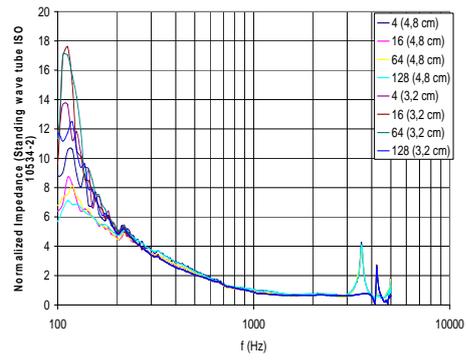


Figura 3.1.5 b)

Figuras 3.1.5. Impedancia característica normalizada de lana de roca.

a) Desviación de 2mm en la distancia entre micrófonos (de 4,8 a 5cm)

b) Sin desviación

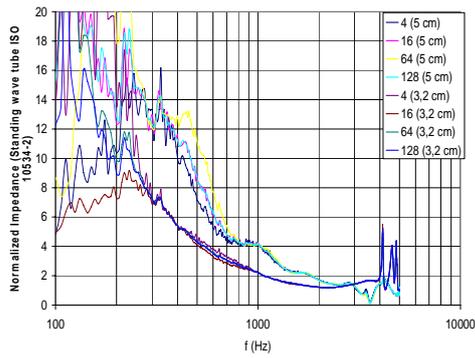


Figura 3.1.6 a)

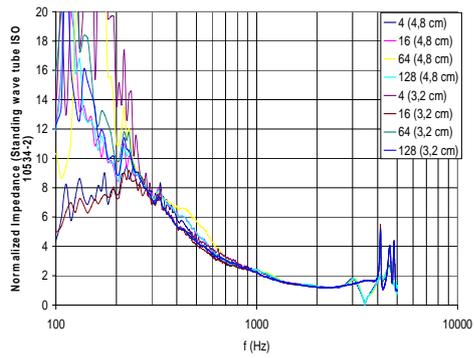


Figura 3.1.6 b)

Figuras 3.1.6. Impedancia característica normalizada de espuma reciclada.

a) Desviación de 2mm en la distancia entre micrófonos (de 4,8 a 5cm)

b) Sin desviación

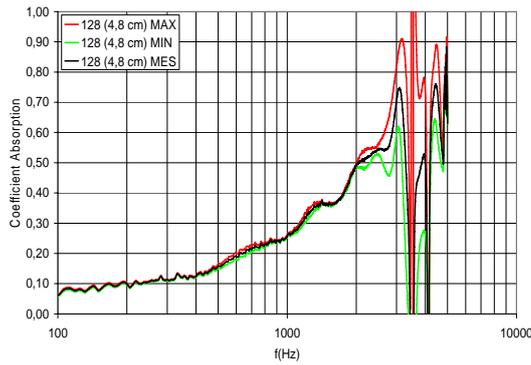


Figura 3.1.7 a)

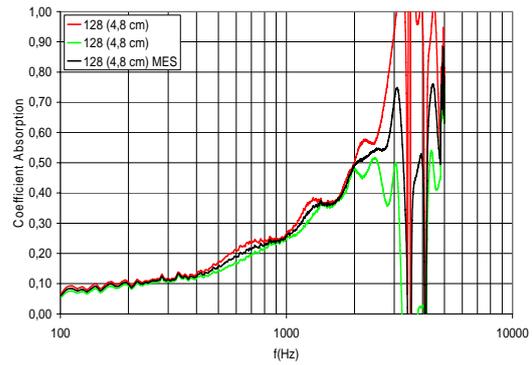


Figura 3.1.7 b)

Figura 3.1.7. Coeficiente de absorción de lana de poliéster. 4,8 cm de separación entre micrófonos. Desviación en la distancia entre el segundo micrófono y la muestra.

a) Desviación de 1 mm b) Desviación de 2mm

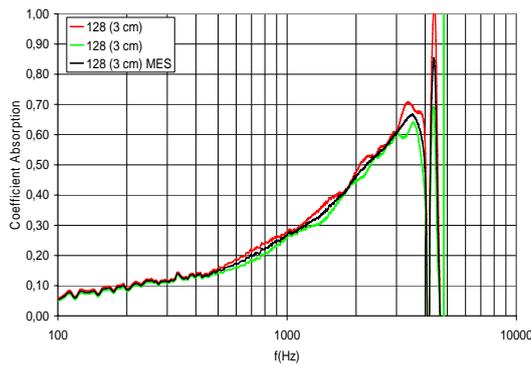


Figura 3.1.8 a)

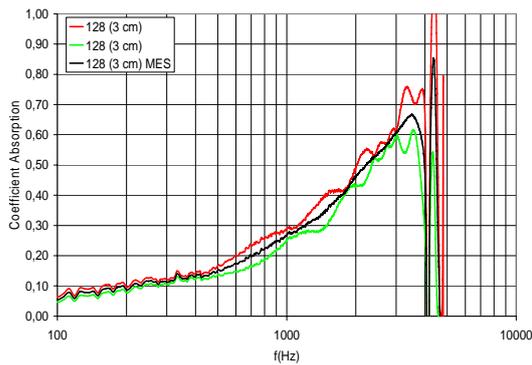


Figura 3.1.8 b)

Figura 3.1.8. Coeficiente de absorción de lana de poliéster. 3,2 cm de separación entre micrófonos. Desviación en la distancia entre el segundo micrófono y la muestra.

a) Desviación de 1 mm b) Desviación de 2mm

De las figuras podemos concluir que la determinación de la distancia entre micrófonos puede ser crítica a bajas y altas frecuencias. Sin embargo, hay una distancia a determinar con mayor exactitud, la distancia entre el micrófono y la muestra, es decir, la colocación de la muestra en la probeta es fundamental. Pequeñas desviaciones en el grosor del material producen tolerancias que

aumentan con la frecuencia. Además, en este caso, la distancia entre micrófonos también influye, como se observa en las figuras 3.1.7 y 3.1.8. La indeterminación en el valor de la medida debido a la incertidumbre en el espesor de la muestra se estudia con más detalle en el punto 3.1.2.1

### 3.1.1.2 Validación de un sistema de medida de resistencia al flujo

Todos los resultados que se presentan en este trabajo de valores de la resistencia específica al flujo han sido obtenidos utilizando el método de Ingard&Dear. Ingard & Dear [Ing85] proponen un método de ensayo basado en tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos para la obtención de la resistencia específica al flujo, método que ha sido expuesto en el punto 2.1.1.2.2. Retomemos lo expuesto en dicho punto. El montaje propuesto por Ingard&Dear para obtener la resistencia específica al flujo es el que se muestra en la figura.

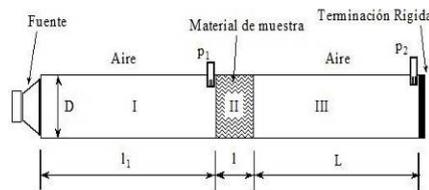


Figura 3.1.9. Esquema del montaje propuesto por Ingard&Dear para la medida de la resistencia específica al flujo.

Recordemos la expresión que tomaba la impedancia al flujo

$$Z = i\rho_0 c_0 \frac{1}{H_{12}} \frac{1}{\sin(KL)} - i\rho_0 c_0 \cot(KL) \quad (3.1.10)$$

El segundo término de la expresión anterior está sujeto a una importante restricción impuesta por el argumento de la cotangente. La ecuación diverge de

forma periódica para algunos valores de KL. Ingard & Dear validan esta ecuación sólo para valores que cumplan:

$$L = \frac{(2n-1)\lambda}{4}; n = 1,2,3\dots \quad (3.1.11)$$

Con estos valores anulamos la cotangente, simplificando la ecuación (3.1.10), de ambos términos complejos, a:

$$\frac{z}{\rho_0 c_0} = \theta + i\chi = i \frac{1}{H_{12}} (-1)^{n-1} \quad (3.1.12)$$

Donde, si desarrollamos ambos términos,

$$\theta = \left| \text{Im ag} \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \right| \quad (3.1.13)$$

$$\chi = \text{Re al} \left( \frac{p_1}{p_2} \right) (-1)^{n-1} \quad (3.1.14)$$

A frecuencias habituales de trabajo, frecuencias bajas ya que un parámetro fundamental en muchos modelos para materiales absorbentes es la resistencia al flujo estática, a 0 Hz, la reactancia al flujo  $\chi$  es despreciable frente la parte real,  $\theta$ , por lo tanto el cálculo de la resistencia específica al flujo, a ciertas frecuencias, utilizando la configuración de Ingard&Dear es tan sencilla como realizar el cálculo de  $\theta$ , conforme la ecuación (3.1.13).

Para validar el modelo simplificado propuesto por Ingard&Dear se ha calculado el error relativo en la medida de la resistencia específica al flujo, si utilizamos la simplificación de que podemos despreciar la parte reactiva de la impedancia. Se han realizado los cálculos para lanas de roca, fibras de vidrio y lanas de poliéster.

Este error es la diferencia entre el valor predicho utilizando las ecuaciones completas (3.1.10) y utilizando las ecuaciones de forma simplificada (3.1.13). A continuación se presentan las gráficas de los resultados:

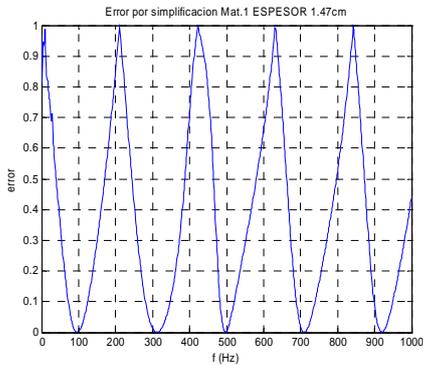


Figura 3.1.10 a) Material 1

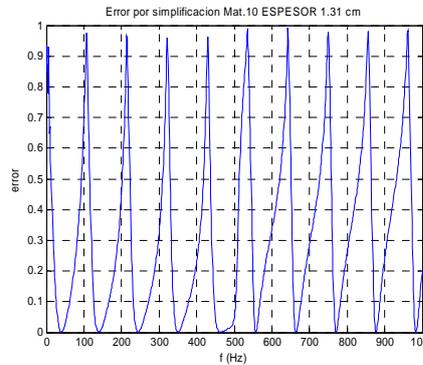


Figura 3.1.10 b) Material 10

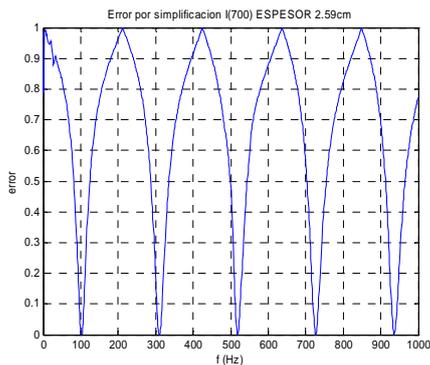


Figura 3.1.10 c) Material I(700)

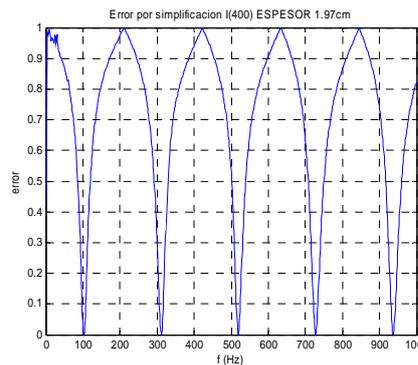


Figura 3.1.10 c) Material I(400)

Figura 3.1.10. Error cometido en el cálculo de la resistencia al flujo si consideramos la simplificación propuesta por Ingar&Dear, a) Material 1, lana de vidrio b) Material 10, lana de roca, c) y d) lanas de poliéster de diferentes densidades superficiales.

Se observa que el error cometido es despreciable a ciertas frecuencias, son las frecuencias propuestas por Ingar&Dear para las cuales se anula la cotangente y coinciden con los resultados experimentales. En la simplificación propuesta en este método, solo son válidas estas frecuencias, y por interpolación se obtiene la curva de resistencia al flujo de todo el intervalo deseado, por lo tanto, con estas

gráficas, tanto para lanas de vidrio, de roca o fibras de poliéster queda validado este método [Jul06].

### 3.1.1.3 Campaña de ensayos de materiales

En este apartado se muestran algunos de los resultados de los ensayos realizados en laboratorio. Se han realizado un número muy elevado de ensayos de coeficiente de absorción en incidencia normal, impedancia normalizada y resistencia específica al flujo, o resistividad al flujo (resistencia específica por unidad de superficie), con el fin de poder caracterizar los materiales como absorbentes acústicos para aislamiento o acondicionamiento acústico. Se han agrupado los ensayos realizados en cuatro; a) materiales clásicos, b) lanas de poliéster, c) materiales reciclados y d) fibras naturales. Esta clasificación no es más que el intento de dar un orden a los resultados que se presentan así como facilitar la comparación entre estos.

#### a) Materiales Clásicos

Los materiales más comúnmente utilizados en acústica arquitectónica, bien para el aislamiento o para el acondicionamiento han sido lanas minerales; lanas de vidrio y lanas de roca, de diferentes espesores y densidades. En la tabla 3.1.1, se muestran las densidades y espesores de algunos de éstos materiales estudiados. Las curvas del coeficiente de absorción en incidencia normal de estos materiales en función de la frecuencia se presentan en la figura 3.1.11.

Etiqueta	Material	Espesor (mm)	Densidad(kg/m <sup>3</sup> )
1	Fibra Vidrio	15	62,2
2	Lana Roca	40	18,5
3	Lana Roca	40	72
4	Lana Roca	15	170

Tabla 3.1.1. Tipo de material, espesor (mm) y densidad (kg/m<sup>3</sup>) de 4 de algunos de los materiales clásicos que se han estudiado para la realización de este trabajo.

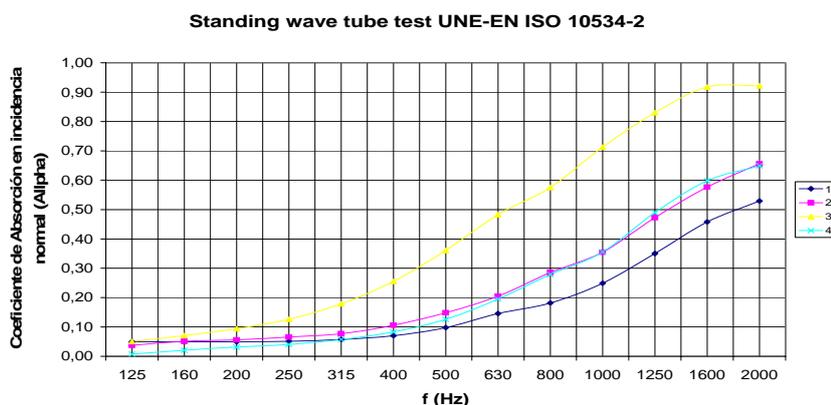


Figura 3.1.11. Valores del coeficiente de absorción de los materiales presentados en la tabla 3.1.1

A continuación se presenta un listado de combinaciones de lanas minerales bien de vidrio, de roca o ambas, de diferentes espesores, valores de resistividad al flujo y aplicaciones, todas comúnmente utilizadas en la acústica arquitectónica. Aunque el siguiente listado no se presenta en forma de tabla, el número que aparece a la izquierda de cada elemento es la etiqueta que se ha utilizado para el estudio (ídem a tabla 3.1.1):

5-Lana Mineral (LM), 40mm de espesor, 11900 rayls/m de resistencia al flujo, se utiliza para el aislamiento acústico en general.

6-Lana Mineral Arena (Arena), 28 mm de espesor, 10100 rayls/m de resistencia al flujo, generalmente esta gama de lanas minerales se utiliza para el aislamiento a ruido de impacto.

7-Panel de lana de vidrio (P vidrio), 40mm de espesor, 6000 rayls/m de resistencia al flujo, utilizado para disminuir la rigidez entre forjado y pavimento.

8-Panel de lana de roca (P roca), 30 mm de espesor, 1800 rayls/m, también para aislamiento entre forjado y pavimento.

9-Panel de lana de roca y lana de vidrio (P varios), de 25mm de espesor y 10900 rayls/m.

10-Panel Plaver (Plaver), 38mm de espesor, 9200 rayls/m , se utiliza como panel absorbente acústico entre dos hojas de divisorios, mejora la eliminación de puentes acústicos.

11-Panel Plaver Arena (Plaver Arena), 48mm de espesor, 8270 rayls/m, también se utiliza entre divisorios.

En la figura 3.1.12 se pueden observar los valores del coeficiente de absorción de estos materiales. Y en la figura 3.1.13 su impedancia normalizada.

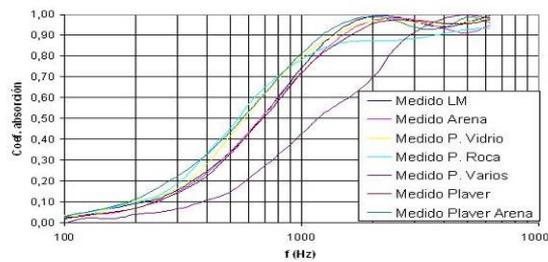


Figura 3.1.12. Coeficiente de absorción en incidencia normal de lanas minerales utilizadas habitualmente.

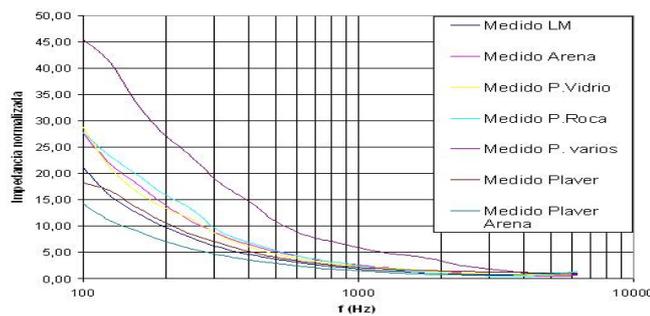


Figura 3.1.13. Impedancia normalizada de lanas minerales utilizadas habitualmente.

### b) Lanas de poliéster

Aunque la lana de poliéster se está utilizando desde no hace mucho en el mundo de la acústica arquitectónica, ya existe un modelo reconocido por la comunidad científica que describe el comportamiento acústico de este tipo de material fibroso, el modelo propuesto por Pompoli&Garai [Gar05].

En la tabla 3.1.2 podemos observar espesores (mm) y valores de resistividad específica al flujo (rayls/m) de lanas de poliéster estudiadas

<b>Etiqueta</b>	<b>Material</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Resistividad al flujo (Rayls/m)</b>
12	Lana Poliéster 1	30	2700
13	Lana Poliéster 2	20	1150
14	Lana Poliéster 3	36	640
15	Lana Poliéster 4	16	1130
16	Lana Poliéster 5	35	2510

Tabla 3.1.2. Valores de espesores (mm) y resistencia específica al flujo (rayls/m) de fibras de poliéster

En la figura 3.1.14 podemos observar los valores de coeficiente de absorción en incidencia normal de estas lanas.

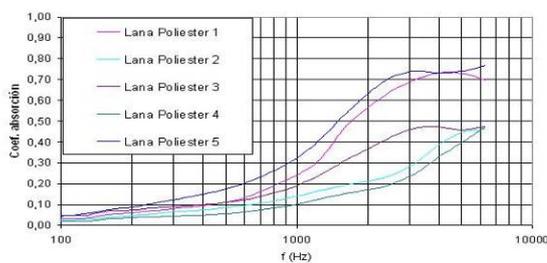


Figura 3.1.14. Coeficiente de absorción de las lanas de poliéster descritas en la tabla 3.1.2.

Se han estudiado para la elaboración de este trabajo y con el fin de introducir las lanas de poliéster en otros ámbitos o ampliar su aplicación en el mundo de la arquitectónica diferentes combinaciones. Veremos a continuación el efecto de capas, de capas simples y capas intermedias, de pegado, de pintado, de combinación con textiles, etc.

En la figura 3.1.15 podemos observar el efecto de capas y de pegado. Se utiliza como material base una lana de poliéster de 1cm de espesor y  $47,8 \text{ kg/m}^3$  de densidad, etiquetada para nuestro estudio como 17, esta lana es referenciada por el fabricante con el código 67017.

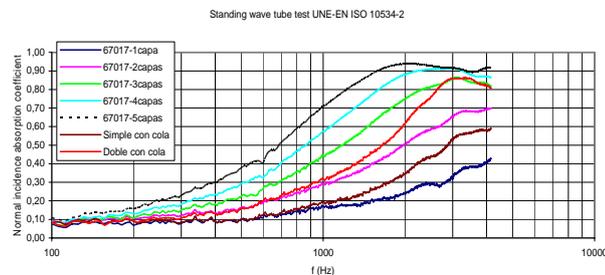


Figura 3.1.15. Efecto de capas de fibra de poliéster, con o sin adhesivo para la unión.

En la tabla 3.1.3 vemos los espesores, en cm, y características de los materiales cuyas curvas de coeficiente de absorción en incidencia normal se presenta en la figura 3.1.16.

Etiqueta	Material	Espesor (mm)	Características/Adhesivos
18	M1: PANOX	25	poliacrilonitrilo oxidado +poliéster+poliacrilonitrilo oxidado.
19	M2	20	poliéster + poliéster punzado
20	M2BIS	15	poliéster + poliéster punzado
21	M3	20	aluminio (30 micras) +poliéster
22	M4	25	aluminio+poliéster+aluminio
23	M5	35	poliéster +aluminio +poliéster
24	M6	10	aluminio+poliéster
25	M7	5	poliéster punzonado
26	M8	15	poliéster base
27	M9	25	panox+poliéster
28	M10	25	panox+poliéster
29	M11	10	poliester prensado

Tabla 3.1.3. Etiquetado, espesores y características de las combinaciones con poliéster que se han estudiado en este punto.

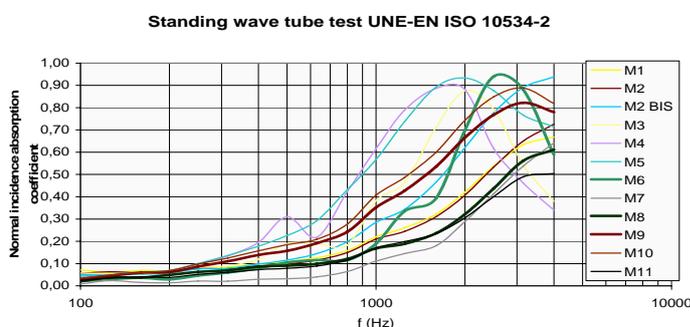


Figura 3.1.16. Resultados de ensayos en materiales multicapa.

Se han estudiado también combinaciones de poliéster con EPDM, con el fin de poder implantar estas combinaciones como posibles soluciones para fachadas ventiladas. Los espesores de EPDM son de entre 0.5 y 2mm, y la fibra de poliéster de 20mm y diferentes densidades, las densidades ( $g/m^2$ ) y etiquetas de estas lanas se pueden ver en la siguiente tabla:

Etiqueta	Material	Densidad (g/m <sup>2</sup> )
30	Lana Poliéster. mat. 7	360
31	Lana Poliéster. mat.8	440
32	Lana Poliéster. mat.23	320
33	Lana Poliéster. mat.400	400

Tabla 3.1.4. Etiquetado y densidad de las combinaciones de lanas de poliéster con EPDM.

En la figura 3.1.17 se muestra la primera secuencia de mediciones realizadas. En la figura 3.1.18 se muestran resultados de combinar lanas de poliéster de 1 cm y de 3 cm.

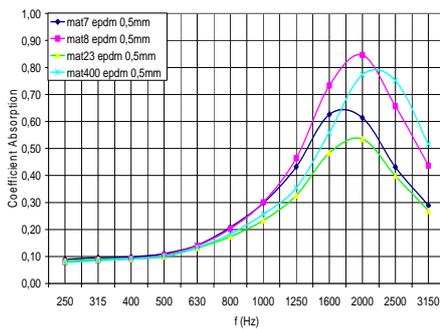


Figura 3.1.17.a) Poliéster con epdm de 0,5mm

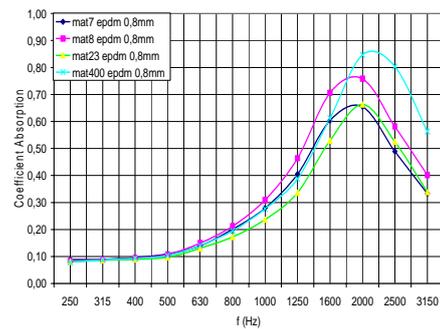


Figura 3.1.17.b) Poliéster con epdm de 0,8mm.

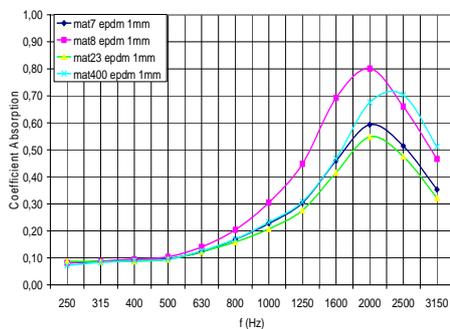


Figura 3.1.17.c) Poliéster con epdm de 1mm.

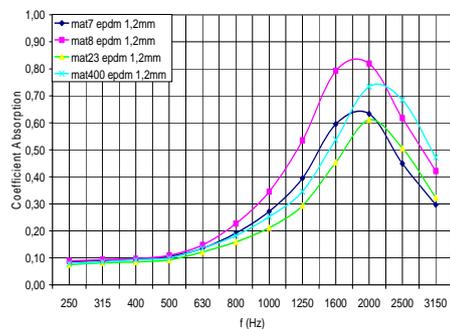


Figura 3.1.17.d) Poliéster con epdm de 1,2mm.

Caracterización de Materiales

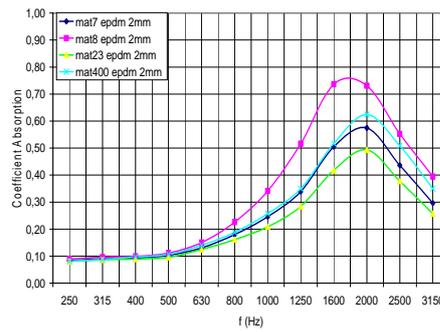
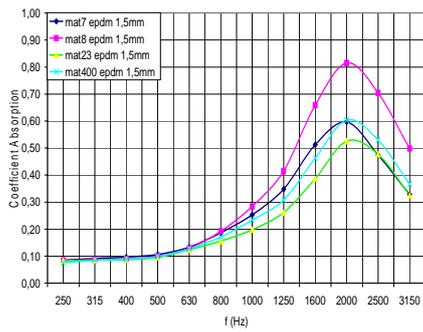


Figura 3.1.17.e) Poliéster con epdm de 1,5mm.      Figura 3.1.17.f) Poliéster con epdm de 2mm.

Figura 3.1.17 Coeficiente de absorción en incidencia normal para combinaciones con poliéster y diferentes espesores de epdm

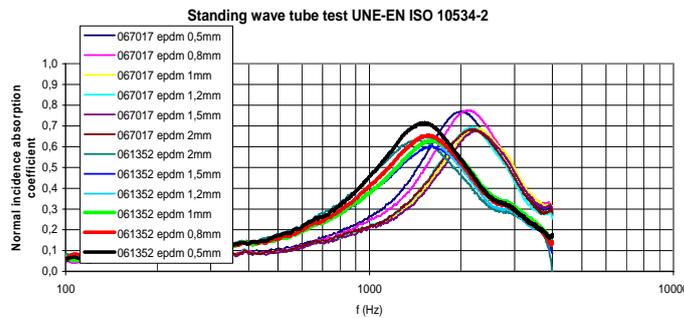


Figura 3.1.18 Efecto de la variación del grosor de la lana de poliéster

En la siguiente figura podemos observar la influencia de la incidencia de la onda por una cara recubierta de una lámina de aluminio, o si la incidencia es por la parte del poliéster. Esta muestra es de 2.52cm de espesor y  $24 \text{ kg/m}^3$ . Se ha etiquetado como 34. La curva m4 hace referencia a la incidencia por el poliéster y m5 a la incidencia por el aluminio.

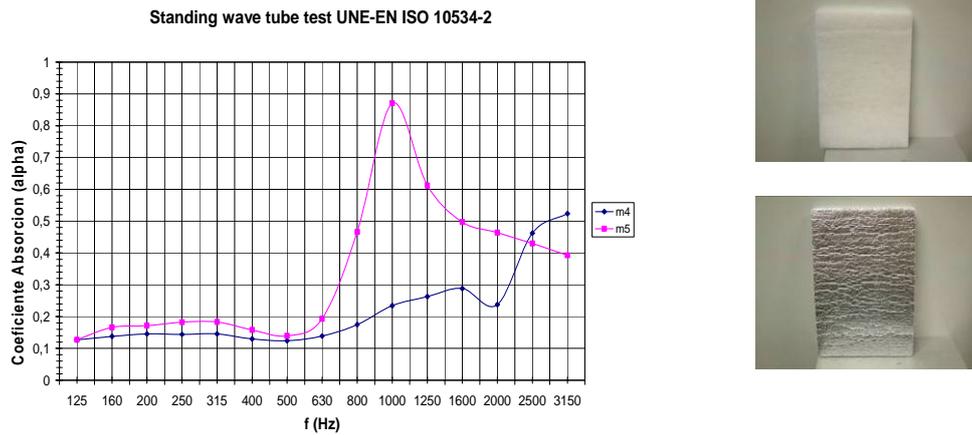


Figura 3.1.19 Resultados obtenidos para el material 34

En las figuras 3.1.20 y 3.1.21 observamos la curva de coeficiente de absorción en incidencia normal e impedancia normalizada respectivamente, de una lana de poliéster referenciada para este trabajo como 35 (Referencia), de 1.7cm d espesor y  $500\text{g/m}^2$ , con un textil referenciado por el fabricante como 07.01.13 de 0.3cm.

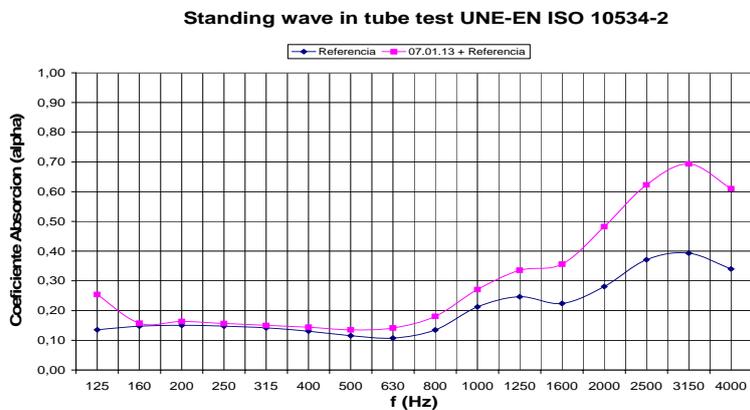


Figura 3.1.20. Resultados del coeficiente de absorción obtenidos para la lana de poliéster y para la fibra de poliéster con el textil.

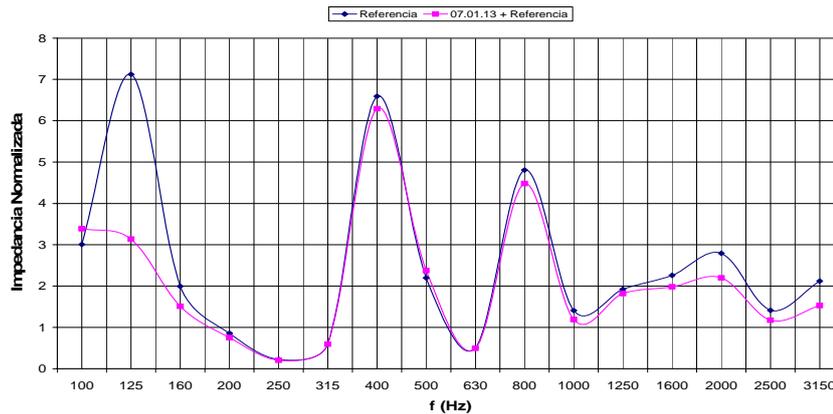


Figura 3.1.21. Resultados de la impedancia normalizada obtenidos para la lana de poliéster y para la lana de poliéster con el textil.

Otro textil de características muy similares, y referenciado por el fabricante como 3230 ha sido estudiado con la misma muestra de poliéster de referencia. Este textil se estudió para poder conocer si la combinación podría ser utilizada en el sector de la automoción. En automoción existen normas internas para la validación de materiales a utilizar en este campo. Un ejemplo de este tipo de normativas es el límite inferior del coeficiente de absorción en incidencia normal, clasificada internamente, debe ser de Clase 3 (grupo PSA Peugeot Citroën). En la figura 3.1.22 podemos observar como la curva de comercialización (en amarillo), la curva mínima para poder ser catalogado el material como Clase 3, está por encima de la curva de coeficiente de absorción de la del textil, pero, al combinar el textil con el poliéster, los valores de esta curva son superados.

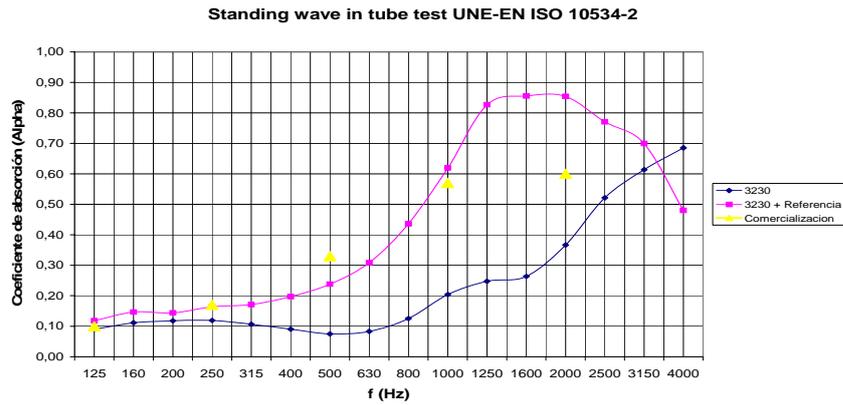


Figura 3.1.22. Curvas de comercialización (Clase 3) para materiales en el ámbito de automoción, curva de la muestra referenciada como 35 y del conjunto 35+3230.

Por último dentro de este apartado estudiaremos el efecto de pintado para una muestra de poliéster (36) de 2cm de espesor y 700g/m<sup>2</sup>. Se desconoce el procedimiento de pintado de la fibra.

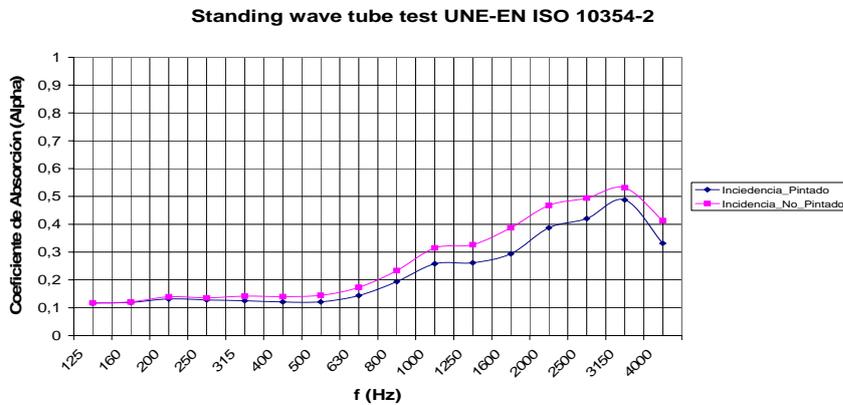


Figura 3.1.23. Resultados obtenidos para una fibra de poliéster cuando la incidencia es sobre la cara pintada o sobre la cara de poliéster.

### c) Reciclados

Poco o poco se van abriendo paso otros materiales, alternativas a las lanas de vidrio o roca, y al poliéster, que pueden poseer características acústicas, cuyos

componentes principales son residuos obtenidos a partir de la fabricación del material o del propio reciclado de estos. De esta forma se consigue, además de solucionar parte del problema de almacenaje de residuos, volver a introducir en el ciclo de producción material que había llegado al final de su vida útil, en muchos casos, esto es posible utilizando infraestructura ya existente para su proceso de fabricación.

En la siguiente tabla podemos ver los espesores y densidades de los materiales reciclados estudiados para este trabajo. La mayoría son residuos de textiles, o residuos de espumas, combinaciones de éstos con láminas de impacto o con poliéster. Han sido etiquetados para este trabajo desde el 37 al 49, respectivamente, aunque en la tabla 3.1.5 y en la figura 3.1.25 están numerados des 1 al 13 respectivamente. En la siguiente figura podemos ver algunos de estos materiales:



Figura 3.1.24. Algunos de los materiales reciclados estudiados.

RECICLADOS	ESPESOR (mm)	DENSIDAD(kg/m <sup>3</sup> )
Mat.1	9	136,3
Mat.2	23	42,8
Mat.3	20	139,6
Mat.4	20	75,6
Mat.5	16	49,7
Mat.6	4	162,4
Mat.7	5	106,0
Mat.8	46	51,9
Mat.9	8	297,7
Mat.10	21	86,6
Mat.11	27	69,5
Mat.12	34	199,2
Mat.13	20	144,7

Tabla 3.1.5 Espesores y densidades de los materiales reciclados estudiados en este trabajo.

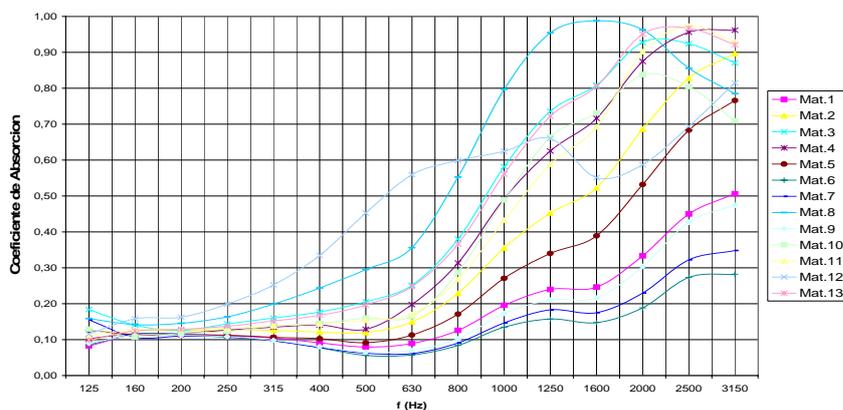


Figura 3.1.25. Resultados obtenidos para los materiales reflejados en la tabla 3.1.5

Algunas de estas curvas han sido comparadas con materiales utilizados habitualmente como aislantes acústicos [Rey07], con el fin de ir introduciendo

poco a poco otro tipo de materiales diferentes a la lana de roca o fibras de vidrio.  
 En las figuras 3.1.26 y 3.1.27 podemos observar estas comparaciones:

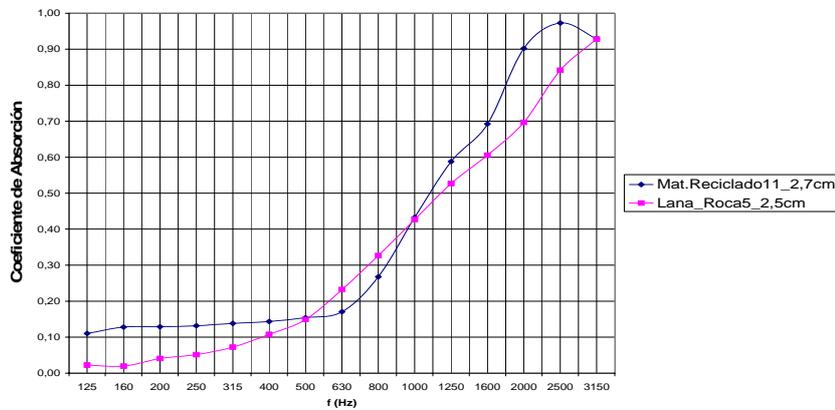


Figura 3.1.26 Coeficiente de absorción en incidencia normal para el material reciclado 11, de 2.7cm de espesor y para lana de roca de 2.5cm de espesor.

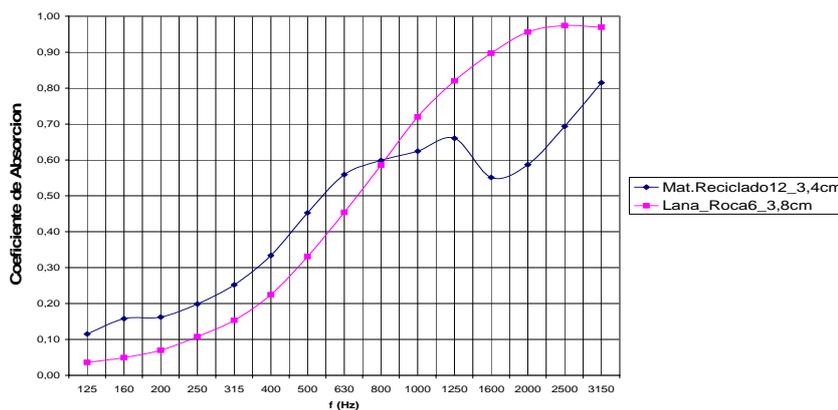


Figura 3.1.27 Coeficiente de absorción en incidencia normal para el material reciclado 12, de 3.4cm de espesor y para lana de roca de 3.8cm de espesor.

Se observa que los materiales reciclados estudiados presentan una curva de coeficiente de absorción en incidencia normal bastante característica de los materiales absorbentes, aumentando en la frecuencia. Alguno de ellos, como el 8, 12 o 13, presentando valores del coeficiente de absorción altos a altas frecuencias, y otros como el material 6, presentando valores razonables a frecuencias bajas-intermedias, frecuencias problemáticas en aislamiento acústico. En las figuras

3.1.26 y 3.1.27 se observa que utilizar materiales reciclados como alternativa en el aislamiento-condicionamiento acústico es más que razonable, pudiendo mejorar el valor del coeficiente de absorción re-utilizando materiales, en función del rango de frecuencias de interés.

#### **d) Fibras Naturales**

A continuación se describen de forma muy breve las fibras naturales que se han utilizado para este trabajo.

*KENAF*. Es un recurso renovable, que se adapta a un amplio rango de suelos. Es un cultivo que no aguanta heladas y requiere mucha humedad, se utiliza también para biocompostas de usos industriales. Es un cultivo de carácter medioambiental.

*CAÑAMO*. Del cáñamo industrial se obtiene la fibra para usos textiles. Se utiliza el tallo para obtener la fibra, es aislante, absorbente y duradera. Utiliza menos agua que el algodón y madura en tres o cuatro meses.

*COCO*. La fibra de coco es un producto natural y ecológico, con elevados índices de rigidez y dureza, baja conductividad al calor, resistencia al impacto, a las bacterias y al agua.

*YUTE*. Necesita de un clima caliente y húmedo. Se puede utilizar en el ámbito de los geotextiles, en construcción de carreteras y en la edificación. Es biodegradable, no causa daños ecológicos, y se puede usar como producto ecológico y fertilizante.



Figura 3.1.28. Plantas y ejemplos de materiales fabricados

En la tabla siguiente aparecen las etiquetas, espesores (mm) y densidades ( $\text{kg/m}^3$ ) de los materiales formados por fibras naturales que se han estudiado en este punto.

Etiqueta	Material	Espesor (mm)	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )
54	Coco lateral	106	110
55	Coco base	80	110
56	Yute	10	91,5
57	Cáñamo	28	41,6
58	kenaf 1	16	54,7
59	kenaf 2	18	120,6
60	kenaf 3	29	55
61	kenaf 4	50	40,6
62	kenaf 5	15	58,2
63	kenaf 6	13	74,8
64	kenaf 7	17	117
65	kenaf 8	75	50,5
66	kenaf 9	460	47,7
67	kenaf 10	90	47,6

Tabla 3.1.6. Espesores y densidades de los materiales compuestos por fibras naturales estudiados en este trabajo.

En las siguientes figuras se muestran las curvas de los coeficientes de absorción en incidencia normal de materiales de coco, de yute y cáñamo y de kenaf, respectivamente. Este último material ha sido estudiado con mayor detenimiento y en el punto 3.1.2.4 queda reflejado este estudio.

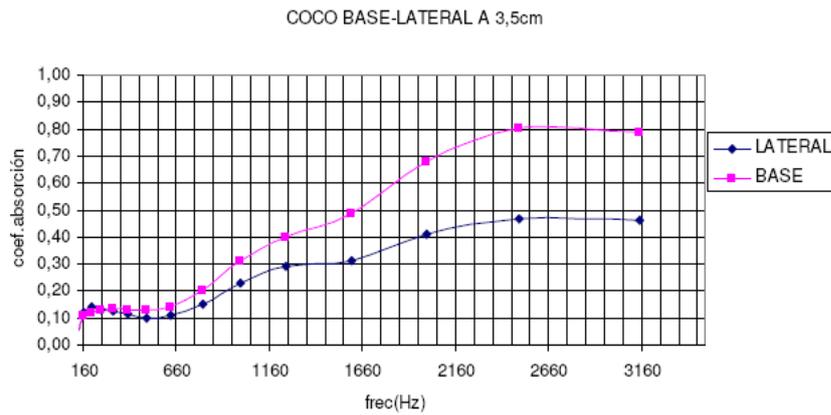


Figura 3.1.29 Resultados obtenidos para dos muestras de coco, lateral de 10,6c, y base de 8cm. Ambas presentan la misma densidad.

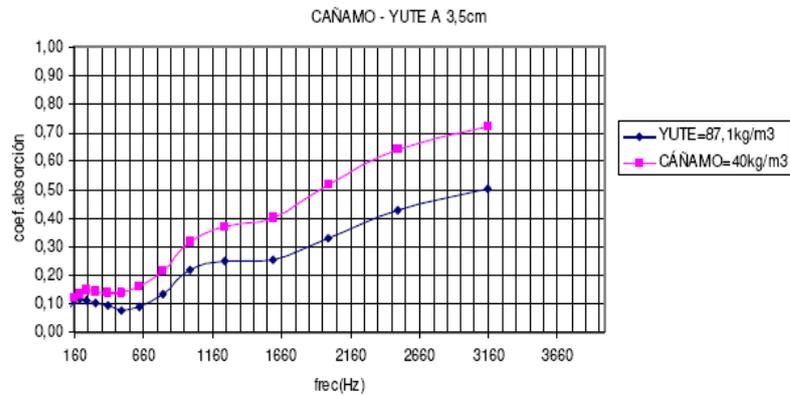


Figura 3.1.30 Resultados para una muestra de yute de 87 kg/m<sup>3</sup> y una de cáñamo de 40 kg/m<sup>3</sup>

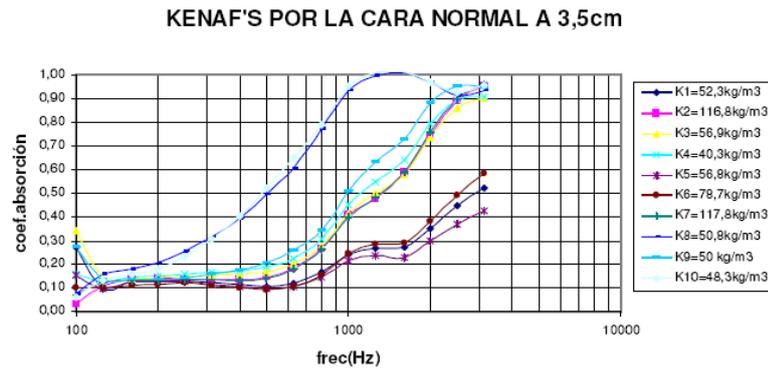


Figura 3.1.31 Resultado para diferentes muestras de Kenaf, de diferentes densidades y espesores.

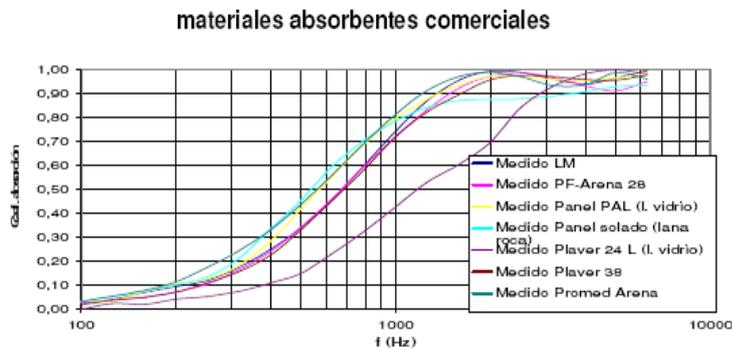


Figura 3.1.32 Resultado para diferentes muestras de lanas de roca y lanas de vidrio.

De las soluciones diseñadas, la fibra de kenaf es la que mejor resultados ha producido, con coeficientes de absorción comparables con los de otras lanas minerales, por lo que, desde el punto de vista acústico, podría ser una alternativa.

### 3.1.2 Modelos para materiales absorbentes acústicos

En el punto 2.1.1.1 se han presentado algunos modelos predictivos que describen el comportamiento de materiales absorbentes, en el primer apartado de este punto (3.1.2.1) se discutirá la incertidumbre de los modelos más utilizados y en los siguientes se presentaran diferentes modelos que se han obtenido en base a todo el trabajo realizado, estos modelos describen diferentes tipos de materiales absorbentes estudiando su comportamiento en base a la resistencia específica al Romina del Rey Tormos

flujo , se presentan también modelos específicos para un tipo de material en concreto.

### 3.1.2.1 Incertidumbre en los modelos aceptados

Hemos podido observar en puntos anteriores que en todos los modelos uno de los parámetros de mayor relevancia es la resistencia específica al flujo. Los modelos anteriormente descritos permiten obtener estimaciones del coeficiente de absorción en incidencia normal, simulando la medida en tubo de Kundt descrita en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002. Sin embargo, tanto en la obtención de estos modelos como en los ensayos, no se tiene en cuenta las posibles divergencias que se pueden producir en los materiales: en el mismo proceso de fabricación hay un 20% de desviación en la densidad del material, sin entrar en detalles de otras variables y el efecto de transporte, manipulado, etc. [UNE10534] [Gar05]

Retomemos la ecuación (2.1.17):

$$r \times d^2 \times \rho_m^{-K_1} = K_2 \quad (3.1.15)$$

Consideremos la desviación que se comete en la resistencia al flujo debido a la incertidumbre que existe en la densidad del material:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{k_1 \times \Delta \rho_m}{\rho_m} \quad (3.1.16)$$

Recordemos que  $K_1$  siempre toma valores mayores que la unidad, por tanto, una incertidumbre en la densidad del material introduce una incertidumbre de mayor magnitud en el valor de la resistencia al flujo. En la tabla 3.1.7 se pueden observar

los errores relativos del espesor  $\Delta d/d$ , densidad  $\Delta\rho/\rho$  y resistencia al flujo  $\Delta r/r$  de algunos materiales fibroso estudiados en este trabajo.

Material	$\Delta d/d$	$\Delta\rho/\rho$	$\Delta r/r$
1	8,5	13,9	20,1
2	21,4	33,6	48,7
3	16,0	11,7	16,9

Tabla 3.1.7. Errores relativos (%) del espesor (d), densidad ( $\rho$ ) y resistencia específica al flujo (r) en tres materiales fibrosos.

Se define el parámetro C, conocido como frecuencia normalizada, a partir de la resistencia al flujo:

$$C = \frac{\rho_0 f}{\sigma} \tag{3.1.17}$$

Garai&Pompoli [Gar05] ajustaron los coeficientes descritos por Delany&Bazley [Del70] basándose en la expresión de la impedancia de cierre ( $Z_l$ ), que no es más que la impedancia que presenta la muestra cuando esta está apoyada sobre una superficie rígida reflectante.

$$Z_l = Z \times \coth(\Gamma \times l) = (R + jX) \times \coth(\alpha l + j\beta l) = Z_{Rl} + j \times Z_{Il} \tag{3.1.18}$$

El coeficiente de absorción en incidencia normal escrito en función de la impedancia de cierre toma la siguiente expresión:

$$\alpha_n = \frac{4 \times Z_{IR} \times \rho_0 \times c_0}{|Z_l|^2 + 2 \times \rho_0 \times c_0 \times Z_{IR} + (\rho_0 \times c_0)^2} \quad (3.1.19)$$

Si desarrollamos la expresión (3.1.18):

$$Z_l = (R + jX) \left[ \frac{\sinh(2\alpha l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} - j \frac{\sinh(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \right] = Z_{IR} + jZ_{II} \quad (3.1.20)$$

Donde:

$$|Z_l|^2 = (R^2 + X^2) \left[ \frac{\cosh(2\alpha l) + \cos(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \right] \quad (3.1.21)$$

$$Z_{IR} = \frac{R \sinh(2\alpha l) + X \sinh(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \quad (3.1.22)$$

$$Z_{II} = \frac{X \sinh(2\alpha l) - R \sinh(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \quad (3.1.23)$$

Y las expresiones del error absoluto asociadas:

$$\begin{aligned} \Delta|Z_l| = & \frac{1}{|Z_l|} \left( \left[ \frac{\cosh(2\alpha l) + \cos(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \right] (R\Delta R + X\Delta X) + \right. \\ & \left. + 4(R^2 + X^2) \left[ \frac{\sinh(2\alpha l) \cos(2\beta l)}{(\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l))^2} \right] \Delta\alpha + 4(R^2 + X^2) \left[ \frac{\sinh(2\beta l) \cos(2\alpha l)}{(\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l))^2} \right] \Delta\beta \right) \end{aligned} \quad (3.1.24)$$

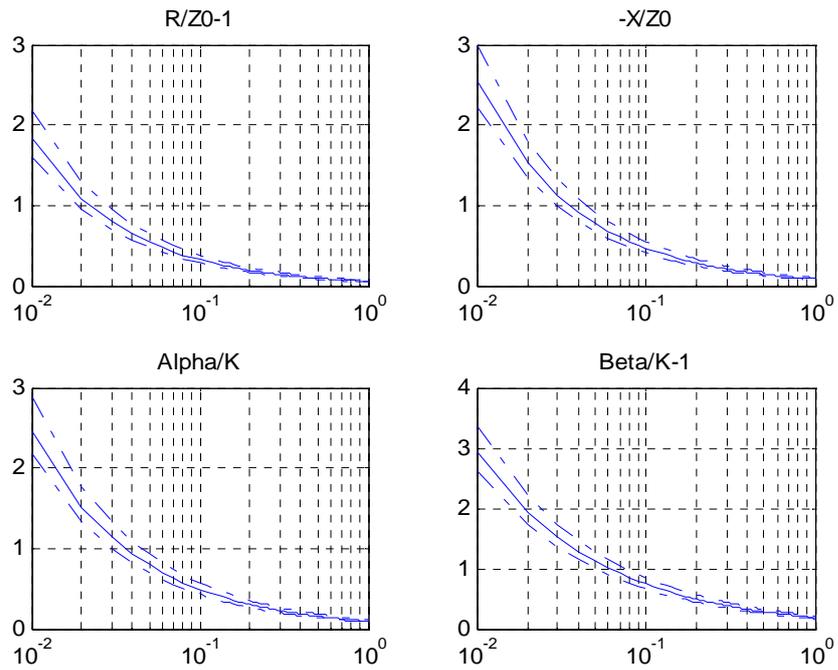
$$\begin{aligned} \Delta Z_{IR} = & \frac{\sinh(2\alpha l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \Delta R + \frac{\sin(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \Delta X + \\ & + 2 \frac{R \cosh(2\alpha l) \cos(2\beta l) - R + X \sinh(2\alpha l) \sin(2\beta l)}{(\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l))^2} \Delta \alpha + \\ & + 2 \frac{X \cosh(2\alpha l) \cos(2\beta l) - X - R \sinh(2\alpha l) \sin(2\beta l)}{(\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l))^2} \Delta \beta \end{aligned} \quad (3.1.25)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_{II} = & \frac{\sinh(2\alpha l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \Delta X - \frac{\sin(2\beta l)}{\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l)} \Delta R + \\ & + 2 \frac{X \cosh(2\alpha l) \cos(2\beta l) - X - R \sinh(2\alpha l) \sin(2\beta l)}{(\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l))^2} \Delta \alpha + \\ & + 2 \frac{-R \cosh(2\alpha l) \cos(2\beta l) + R - X \sinh(2\alpha l) \sin(2\beta l)}{(\cosh(2\alpha l) - \cos(2\beta l))^2} \Delta \beta \end{aligned} \quad (3.1.26)$$

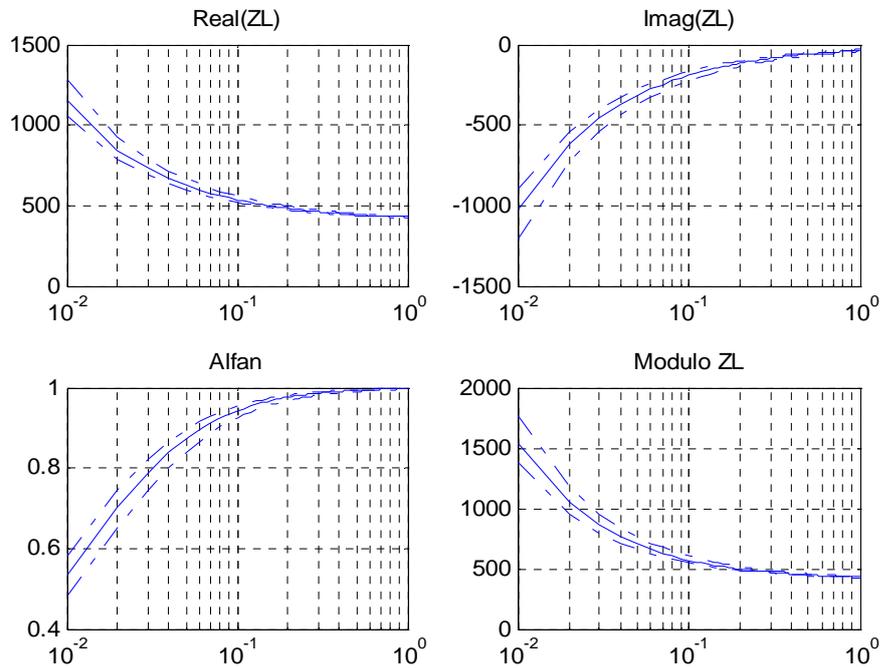
Y la incertidumbre del coeficiente de absorción en incidencia normal:

$$\Delta \alpha_n = \frac{4\rho_o c_o (|Z_I|^2 + (\rho_o c_o)^2)}{(|Z_I|^2 + 2\rho_o c_o Z_{IR} + (\rho_o c_o)^2)^2} \Delta Z_{IR} + \frac{8Z_{IR} \rho_o c_o |Z_I|}{(|Z_I|^2 + 2\rho_o c_o Z_{IR} + (\rho_o c_o)^2)^2} \Delta |Z_I| \quad (3.1.27)$$

En las figuras 3.1.33 y 3.1.34 se muestra los resultados para un 20% de desviación en la densidad de una lana de roca de 50000 Rayls de resistencia específica al flujo, utilizando el modelo de Delany & Bazley. Este modelo es la base para la obtención de la absorción sonora en espacios cerrados, norma UNE-EN 12354-6:2004 [UNE12354-6], para todo tipo de material fibroso. En el eje de las abscisas se representa la frecuencia normalizada C.



Figuras 3.1.33



Figuras 3.1.34

Figuras 3.1.33 y 3.1.34. Delany & Bazley. Lana de roca, resistencia específica al flujo 50000 Rayls, 4 cm de espesor. 20 % de desviación en la densidad.

En la figura 3.1.35 se muestra los resultados para un 20% de desviación en el valor del espesor para diferentes lanas de roca de 20mm de espesor y diferentes densidades y valores de la resistencia al flujo, utilizando el modelo de Delany & Bazley. En el eje de las abscisas se representa el error que se comete en el coeficiente de absorción en incidencia normal.

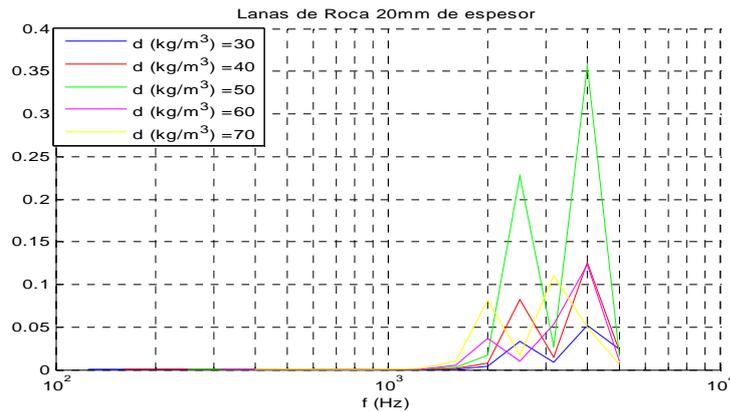


Figura 3.1.35  $\Delta\alpha$  Debido a la incertidumbre en el espesor para las diferentes densidades estudiadas

En las figuras 3.1.36 y 3.1.37 se muestran los resultados para un 20% de desviación en la densidad de una fibra de poliéster de 3000 Rayls de resistencia específica al flujo, utilizando el modelo de Garai & Pompoli. En el eje de las abscisas se representa la frecuencia normalizada C.

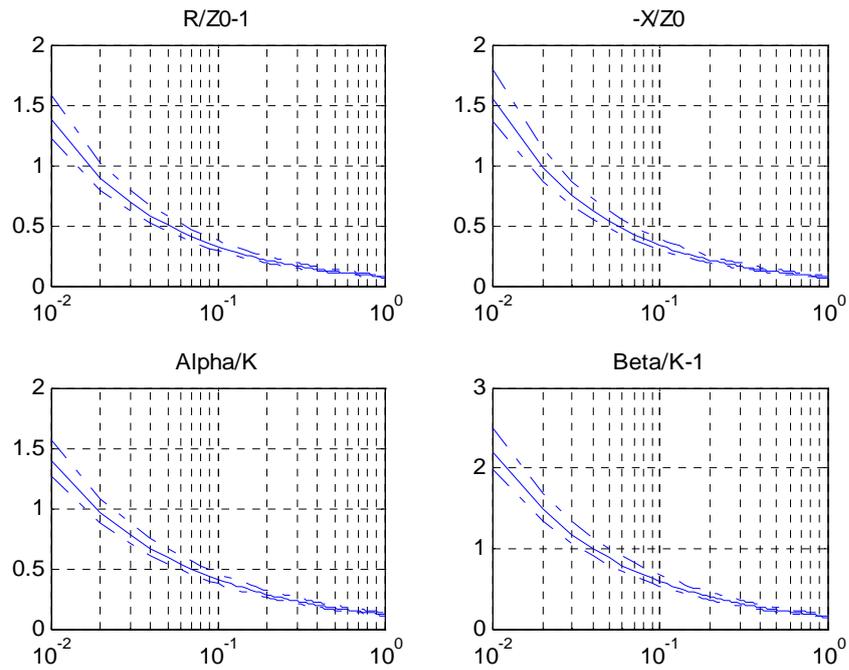


Figura 3.1.36

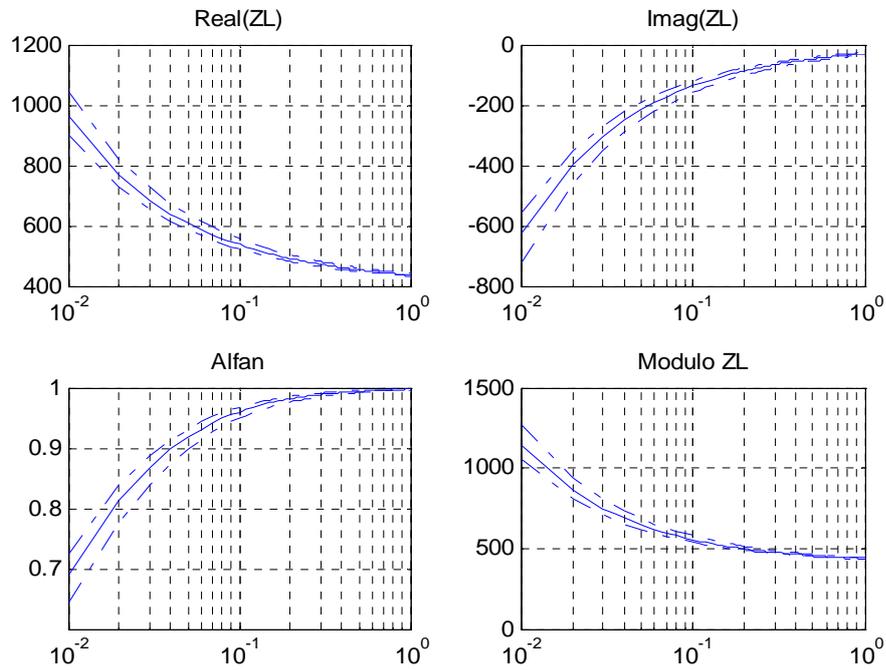


Figura 3.1.37

Figuras 3.1.36 y 3.1.37 Garai & Pompoli. Fibra de poliéster, resistencia específica al flujo 3000 Rayls y 4 cm de espesor. 20 % de desviación en la densidad.

En la figura 3.1.38 se muestra los resultados para un 20% de desviación en el valor del espesor para diferentes lanas de poliéster de 40mm de espesor y diferentes densidades y valores de la resistencia específica al flujo, utilizando el modelo de Garai & Pompoli. En el eje de abscisas se representa el error cometido en el coeficiente de absorción en incidencia normal.

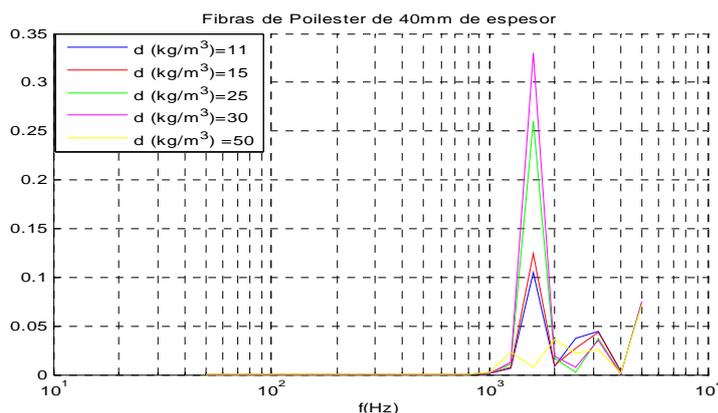


Figura 3.1.38.  $\Delta\alpha$  Debido a la incertidumbre en el espesor para las diferentes densidades estudiadas.

Después de estudiar este punto podemos concluir que, existe una desviación a baja frecuencia debida a los posibles cambios de densidad, que no se pueden distinguir de los errores del proceso de medida, enmascarándose a baja frecuencia con el error sistemático del equipo. Además, la normativa marca como 0.5 el límite del redondeo, hemos podido observar que, a baja frecuencia el error puede ser superior. Por último, en este punto hemos observado, que la tendencia a altas frecuencias es la disminución del error por aumentos de densidad.

### 3.1.2.2 Modelo empírico para varios materiales

En la introducción teórica de este trabajo hemos descrito modelos para la predicción del comportamiento acústico de materiales absorbentes, la mayoría de estos, basados en la resistencia específica al flujo. En estos modelos, las partes

real y compleja de la impedancia y de la constante de propagación del material se basan en fórmulas como las siguientes:

$$R = \rho_0 c_0 (1 + A1 \cdot C^{-A2}) \quad (3.1.28)$$

$$X = -\rho_0 c_0 A3 \cdot C^{-A4} \quad (3.1.29)$$

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c_0} A5 \cdot C^{-A6} \quad (3.1.30)$$

$$\beta = \frac{2\pi f}{c_0} (1 + A7 \cdot C^{-A8}) \quad (3.1.31)$$

en las que se puede observar que los coeficientes desde A1 a A8 son los que se obtienen por un proceso de ajuste y recordemos que C es la frecuencia normalizada.

Otros autores como Garai & Pompoli [Gar05] o Dunn & Davern [Dun86] han desarrollado modelos basados en estas fórmulas para materiales como las lanas de poliéster o espumas. El hecho de que no todas las predicciones reflejaran de forma satisfactoria los valores reales del coeficiente de absorción en incidencia normal para nuevos materiales, ha hecho que algunos autores revisaran los valores de los coeficientes propuestos. Con esta filosofía aparecen nuevos modelos, basados en el de Delany & Bazley [Del70], los coeficientes de estos modelos son los que se reflejan en la tabla 3.1.8.

Modelo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Delany & Bazley [5]	0.0571	0.754	0.087	0.732	0.189	0.595	0.0978	0.700
Miki [6-7]	0.070	0.632	0.107	0.632	0.160	0.618	0.109	0.618
Dunn & Davern [8]	0.114	0.369	0.099	0.758	0.168	0.715	0.136	0.491
Garai & Pompoli [9]	0.078	0.623	0.074	0.660	0.159	0.571	0.121	0.530

Tabla 3.1.8. Coeficientes propuestos por diferentes autores.

Estos modelos utilizan la expresión 3.1.19 para la obtención del coeficiente de absorción en incidencia normal, a partir de la impedancia de cierre, que se define a partir de la constante de propagación compleja e impedancia característica compleja.

Las expresiones de la 3.1.28 a la 3.1.31 representan un modelo típico de ajuste, donde algunos autores han ajustado a partir de la expresión del coeficiente de absorción en incidencia normal los coeficientes  $A_i$ ,  $i=1,2,\dots,8$ , para un material en concreto, en un rango que suele ir entre 0.01 y 1 respecto al valor de la frecuencia normalizada  $C$ .

Según lo anterior, se puede definir la función del error cuadrática [Alb08] de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i})^2 \quad (3.1.32)$$

donde  $\alpha_{n,i}$  representa el valor del coeficiente de absorción en incidencia normal, medido para un material absorbente elegido, a la frecuencia  $i$ —ésima y  $\hat{\alpha}_{n,i}$  es la estimación del valor anterior realizada a partir de las ecuaciones 3.1.28 a 3.1.31. Para la minimización de la función de error es necesario realizar las siguientes derivadas parciales e igualarlas a cero.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial A_i} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i}) \frac{\partial \hat{\alpha}_{n,i}}{\partial A_i} = 0 \quad i = 1, \dots, 8 \quad (3.1.33)$$

Por tanto, las ecuaciones anteriores forman un sistema de 8 ecuaciones no lineales cuya resolución permite obtener el valor de los coeficientes  $A_i$  que minimizan el error cometido. La complejidad del sistema, sugiere la aplicación de método iterativo de resolución de sistemas no lineales.

Los métodos iterativos utilizados en la obtención de soluciones se describen en las referencias [Mik90] y [Miky90]. Los mejores resultados se han obtenido mediante el método de Broyden y el método de Newton, aunque para el segundo ha sido necesario obtener el Jacobiano de las funciones no lineales definidas anteriormente e invertirlo, con lo que el coste computacional se eleva considerablemente.

Respecto a la iteración inicial, dado que es un sistema de ecuaciones no lineal con 8 incógnitas, se ha decidido tomar los coeficientes de Delany & Bazley, que ya ajustan parte de los materiales absorbentes acústicos. La elección de la iteración inicial en este caso ha sido esencial. Al elegir coeficientes de modelos existentes, la convergencia hacia un único conjunto de coeficientes es clara, pero no converge con cualquier iteración inicial.

Para obtener los nuevos coeficientes ajustados, se han realizado diferentes mediciones en los laboratorios de acústica del Campus de Gandia, de la Universidad Politécnica de Valencia. Se han realizado ensayos según la UNE-EN 10534-2:2002 [UNE10534] para la determinación del coeficiente de absorción y se ha utilizado el método descrito por Ingard & Dear [Ing85] para la determinación de la resistencia al flujo de las muestras.

Se han ensayado muestras de lanas minerales y de lanas de poliéster. Se referencia solamente algunos de estos resultados.

Se muestran dos ajustes: el primero toma como datos de entrada Delany &

Bazley (reajuste de 8 coeficientes, “ajuste 1”) y el segundo Miki, con  $A_2 = A_4$  y  $A_6 = A_8$  (reajuste de 6 coeficientes, “ajuste 2”). En las tablas 3.1.9 y 3.1.10 se muestran los coeficientes obtenidos para lanas minerales. En la tabla 3.1.11 los coeficientes obtenidos para las lanas de poliéster.

Material	Espesor(mm)	Error medio	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>
LM	38,71	0,09	0,059	0,953	0,096	0,769	0,140	0,681	0,083	0,796
Arena	28,79	0,09	0,068	1,301	0,076	0,438	0,199	0,626	0,075	0,718
P. Vidrio	39,31	0,11	0,034	1,678	0,099	0,731	0,175	0,707	0,060	0,298
P. Roca	30,30	0,13	0,035	1,979	0,081	1,564	0,313	0,649	0,066	0,143
P. Varios	24,79	0,06	0,035	1,843	0,093	1,190	0,254	0,815	0,069	0,160
Plaver	37,22	0,09	0,026	1,383	0,065	0,441	0,257	0,296	0,068	0,192
Plaver Arena	47,44	0,09	0,021	1,401	0,060	0,369	0,278	0,266	0,080	0,165

Tabla 3.1.9 Resultados de los coeficientes para el ajuste de lanas minerales. Iteración inicial: Delany & Bazle.

Material	Espesor (mm)	Error medio	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>
LM	38,71	0,04	0,068	0,648	0,103	0,648	0,168	0,603	0,114	0,603
Arena	28,79	0,07	0,025	0,821	0,097	0,821	0,210	0,656	0,083	0,656
P. Vidrio	39,31	0,13	0,004	0,313	0,065	0,313	0,152	0,136	0,040	0,136
P. Roca	30,3	0,25	0,004	0,244	0,032	0,244	0,248	0,128	0,042	0,128
P. Varios	24,79	0,09	0,005	0,270	0,059	0,270	0,307	0,035	0,048	0,035
Plaver	37,22	0,15	0,002	0,008	0,172	0,008	0,343	0,002	0,065	0,002
Plaver Arena	47,44	0,11	0,003	0,003	0,366	0,003	0,559	0,001	0,014	0,001

Tabla 3.1.10 Resultados de los coeficientes para el ajuste de lanas minerales. Iteración inicial: Miki

Material	Espesor(mm)	Error medio	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>
Lana Poliéster 1	35,0	0,09	0,055	0,777	0,096	0,827	0,199	0,362	0,104	0,734
Lana Poliéster 2	25,0	0,06	0,047	0,944	0,155	0,795	0,189	0,607	0,116	0,894
Lana Poliéster 3	40,0	0,04	0,062	0,790	0,116	0,853	0,182	0,726	0,118	0,954
Lana Poliéster 4	20,0	0,06	0,067	0,857	0,140	0,928	0,189	0,990	0,119	1,038
Lana Poliéster 5	40,0	0,09	0,077	1,068	0,124	0,809	0,203	0,455	0,130	0,935

Tabla 3.1.11 Resultados de los coeficientes para el ajuste de lanas depoliéster. Iteración inicial: Delany & Bazley.

Por último, se han utilizado todos los datos de los ensayos, sin distinguir tipos de materiales para reajustar los coeficientes del A<sub>1</sub> al A<sub>8</sub>, en la tabla 3.1.12 se muestran los coeficientes obtenidos. El error medio en este caso es de 0,03.

<i>MODELO</i>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>
<i>COEFICIENTES AJUSTADOS</i>	0,060	0,863	0,088	0,764	0,194	0,589	0,100	0,683

Tabla 3.1.12 Resultados de los coeficientes para el ajuste global de todos los datos. Iteración inicial: Delany&Bazley.

En las figuras 3.1.39 se muestran los resultados de los diferentes ajustes para lanas minerales. En color negro las curvas de las medidas reales y en rojo el ajuste con los coeficientes globales obtenidos.

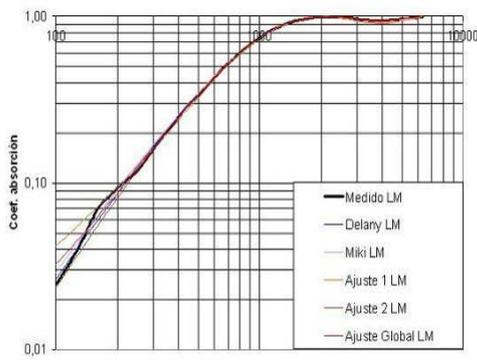


Figura 3.1.39 a)

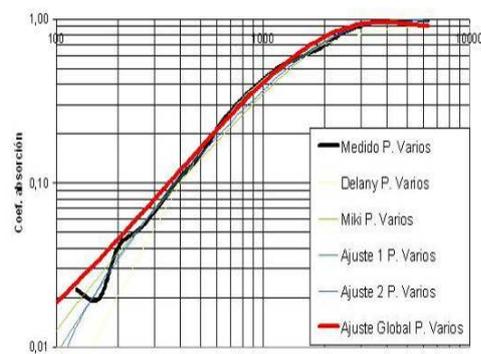


Figura 3.1.39 b)

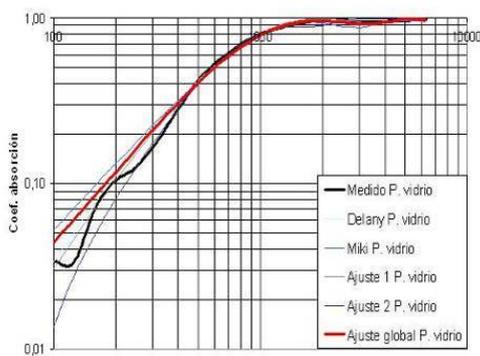


Figura 3.1.39 c)

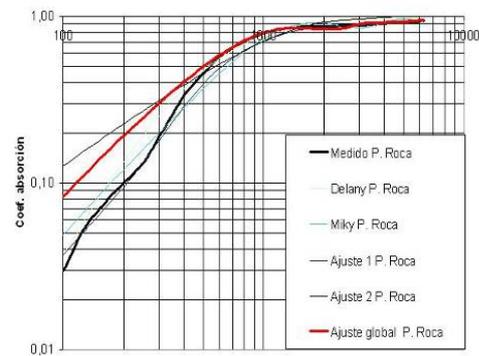


Figura 3.1.39 d)

Figura 3.1.39. Coeficientes de absorción y ajustes para a) LM, b) panel de varias lanas minerales, c) panel de lana de vidrio y d) panel de lana de roca.

En la figura 3.1.40 a) y b) se muestran los resultados de los diferentes ajustes para lanas de poliéster. En la figura 3.1.41 se muestran los ajustes de impedancia de cierre para dos de los materiales estudiados.

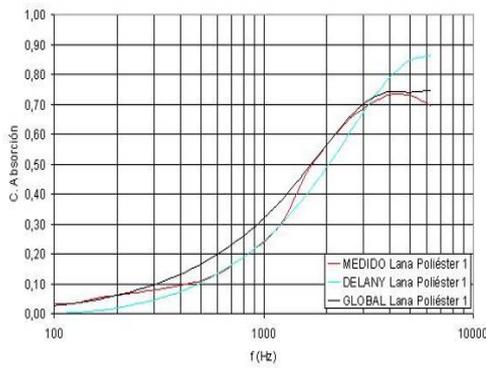


Figura 3.1.40 a)

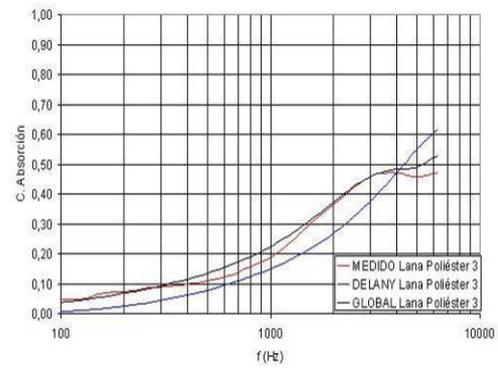


Figura 3.1.40 b)

Figura 3.1.40. Coeficientes de absorción y ajustes para fibras de poliéster.

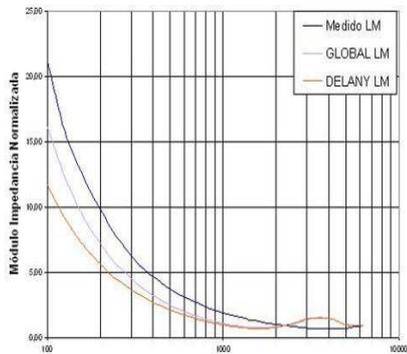


Figura 3.1.41 a)

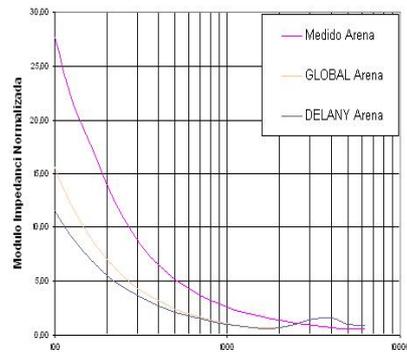


Figura 3.1.41 b)

Figura 3.1.41. Módulo de la Impedancia y ajustes para LM a) y Arena b).

### 3.1.2.3 Modelo específico

En este trabajo se presenta un modelo semi-empírico desarrollado tomando como referencia los pasos seguidos por Garai&Pompoli [Gar05]. En el citado trabajo, se realiza un ajuste para determinar los coeficientes que mejor describían el comportamiento acústico de las fibras de poliéster. En el caso que nos ocupa, se ha implementado un método para obtener los coeficientes para el caso de materiales absorbentes obtenidos a partir de fibras naturales, concretamente, el Kenaf. Para la propuesta que se formula se han utilizado fibras naturales que

verifican las prestaciones de materiales ya consolidados en el mercado y que al mismo tiempo presentan ciertas ventajas adicionales que pueden consultarse en [Ram10].

En la figura 3.1.42 se presentan imágenes de microscopio de muestras de kenaf. Como se puede apreciar, se trata de un material fibroso. Por tanto, dada su naturaleza, es de esperar que desempeñe un papel similar a otros materiales absorbentes como la lana de roca. Estos materiales se obtienen utilizando la fibra de poliéster en porcentaje conocido como elemento de termo fusión para unir las fibras de kenaf, consiguiendo un material compuesto en su mayoría por fibra de kenaf y sin el uso de adhesivos para conformarlo.

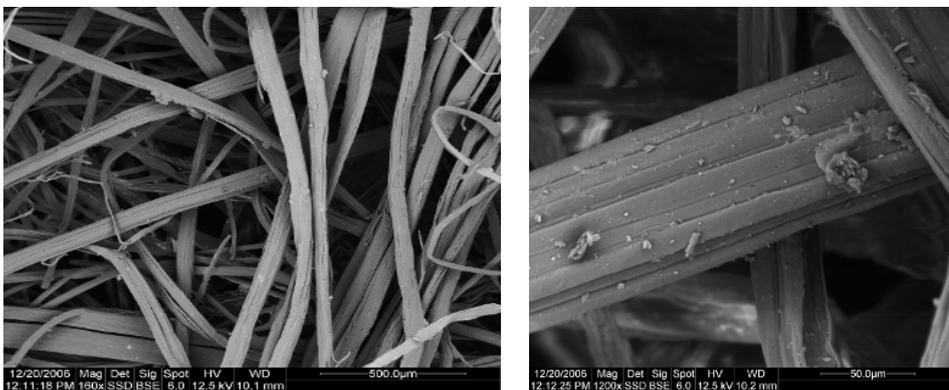


Figura 3.1.42. Imágenes a diferente escala de las fibras naturales de Kenaf

El modelo semi-empírico que se presenta en este punto pretende describir el comportamiento acústico del material fibroso utilizando el menor número posible de parámetros físicos no intrínsecos, atenuando de esta forma algunos errores de propagación que se cometen al utilizar parámetros obtenidos experimentalmente para implementar modelos empíricos.

Básicamente, se trata de encontrar los coeficientes  $A_i$  ( $i=1\dots 8$ ) que mejor ajusten las ecuaciones de la 3.1.28 a la 3.1.31 para el caso del material que estamos tratando.

Para llevar a cabo el ajuste, es necesario, disponer de datos del coeficiente de absorción en incidencia normal y de resistencia específica al flujo del material en

cuestión. Los datos de entrada básicos son los de la resistencia específica al flujo ya que nos permiten obtener la parte real e imaginaria de la constante de propagación del material, así como la parte real e imaginaria de la impedancia característica normalizada

Para obtener el coeficiente de absorción en incidencia normal, se ha aplicado el método de la función de transferencia [UNE10534]. En la figura 3.1.43 se presenta un esquema del dispositivo experimental con las posiciones de los micrófonos y la muestra para obtener la resistencia específica al flujo.

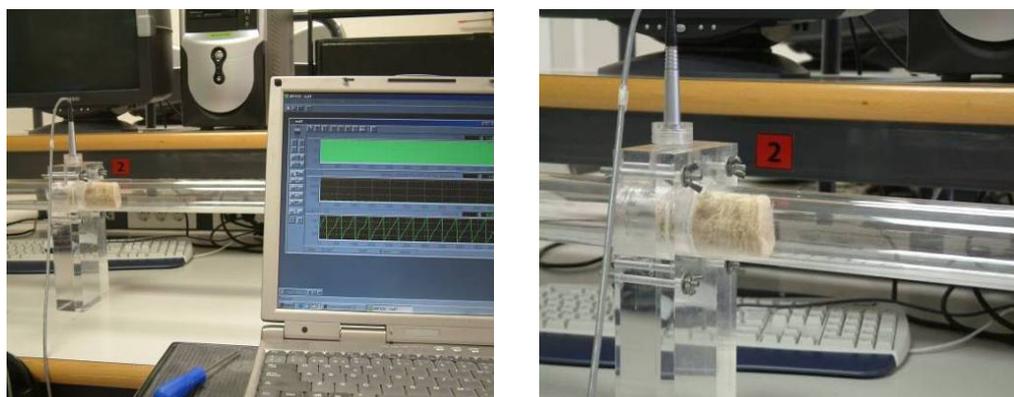


Figura 3.1.43. Esquema de montaje y medida de la resistencia al flujo de una muestra de kenaf.

Para obtener los coeficientes que describen de mejor forma el comportamiento acústico medido de las muestras de material de kenaf, hemos utilizado un método iterativo de disminución de función de error cuadrática. Este método también se ha utilizado para la obtención de modelos empíricos de varios materiales y ya ha sido descrito en el punto 3.1.2.2. En la tabla 3.1.13 se enumeran algunas de las muestras de kenaf estudiadas y algunas de sus características básicas. Los espesores, densidades y resistividad al flujo (resistencia específica al flujo por unidad de espesor) del resto de las muestras estudiadas se encuentran dentro de los márgenes de los valores en esta tabla presentados. Es destacable cómo estos absorbentes presentan en su mayoría, más de  $5 \text{ kPa s/m}^2$ .

Nombre	Espesor (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistividad al flujo (Pa s / m <sup>2</sup> )
k15	44	47	17649
k12	42	60	5226
k14	82	62	6628
k9	68	65	8630
k3	28	70	20598
k13	73	70	5712
k6	15	73	5662
k2	18	79	4045
k4	22	86	4710
k1	19	120	6167
k8	18	125	4798
k7	17	132	30000

Tabla 3.1.13. Valores de espesor, densidad y resistividad al flujo de algunas de las muestras ensayadas.

En la tabla 3.1.14 se observa el valor de los coeficientes propuestos por los diferentes autores. Se presentan los proporcionados por Delany-Bazley [Del70], éstos fueron obtenidos basando el estudio en lana de roca (diámetro medio de fibra de 10  $\mu m$ ), los proporcionados por Garai-Pompoli [Gar05] basándose en fibras de poliéster (diámetro medio de fibra de 36  $\mu m$ ), y los valores obtenidos en el estudio del kenaf.

Modelo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Delany&Bazley	0,057	0,754	0,087	0,732	0,189	0,595	0,098	0,700
Garai&Pompoli	0,078	0,623	0,074	0,660	0,159	0,571	0,121	0,530
Propuesta Kenaf	0,046	0,255	0,112	0,967	0,060	1,256	0,039	0,541

Tabla 3.1.14. Valores de los ocho coeficientes que se han obtenido para el kenaf, comparados con los valores obtenidos por Delany&Bazley y Pompoli&Garai.

En la tabla 3.1.15 se observa la desviación media cometida entre el valor ensayado del coeficiente de absorción en incidencia normal y los valores calculados, utilizando los coeficientes propuestos por Delany-Bazley [Del70], Pompoli-Garai [Gar05], y utilizando el modelo, en este trabajo descrito, el modelo para el kenaf.

Modelo	Desviación (%) entre los valores experimentales y los empíricos por diferentes autores
Delany&Bazley	9,87
Garai&Pompoli	9,07
Kenaf	5,63

Tabla 3.1.15. Desviación media entre los valores medidos del coeficiente de absorción en incidencia normal y los predichos por diferentes modelos.

En la figura 3.1.44 podemos observar valores del coeficiente de absorción ensayado y valores empíricos utilizando diferentes modelos y el modelo aquí expuesto. Las figuras 3.1.44 a), 3.1.44 b) y 3.1.44 c) muestran estos resultados para muestras de Kenaf de 70 kg/m<sup>3</sup> y 73mm, de 68 kg/m<sup>3</sup> y 42mm y de 65 kg/m<sup>3</sup> y 68mm, respectivamente.

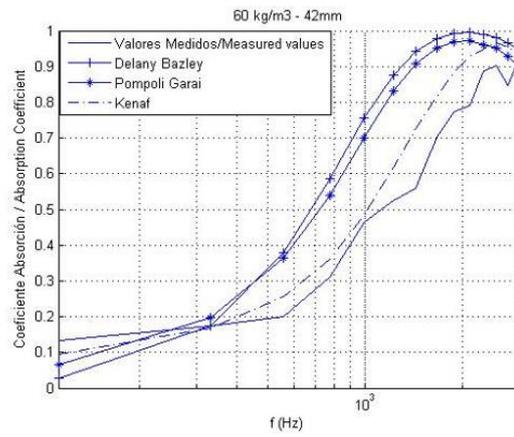


Figura 3.1.44 a)

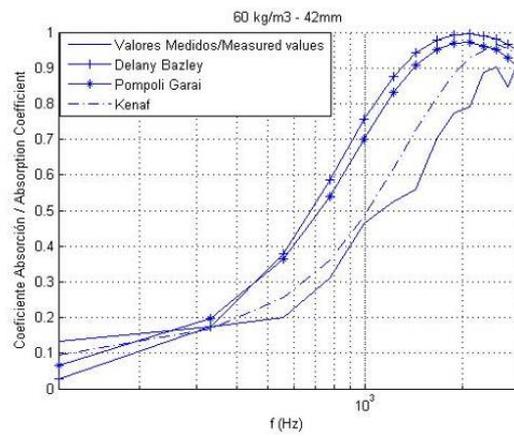


Figura 3.1.44 b)

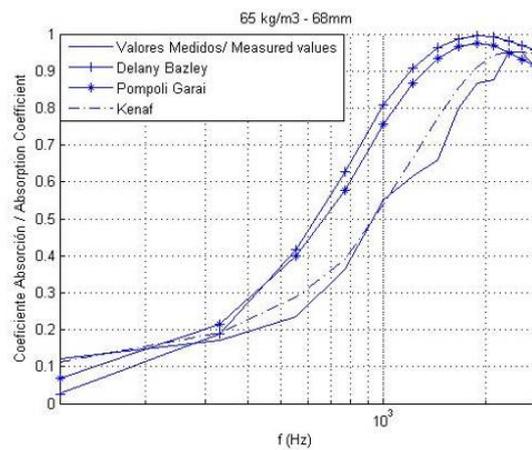


Figura 3.1.44 c)

Figura 3.1.44. Coeficiente de absorción en incidencia normal; comparación entre valores medidos y predichos por diferentes modelos.

Con el objeto de realizar una validación complementaria se ha procedido a combinar los resultados obtenidos aplicando un modelo micro-estructural, tomando como referencia los pasos seguidos por Bies&Hansen [Bie80], que nos permite obtener el valor de la resistencia al flujo. Dicho de otra forma, se ha realizado un pre-diagnóstico del modelo estructural para las muestras de kenaf estudiadas basándonos en el modelo de Bies&Hansen [Bie80].

Se he representado una correlación lineal tomando logaritmos neperianos a la ecuación reescrita con los coeficientes  $k_1$  y  $k_3$ , descrita ya en el apartado 2.1.1.1

$$\ln r = \ln k_3 + k_1 \ln \rho_m \quad (3.1.34)$$

En la tabla 3.1.16 se pueden observar los valores obtenidos de  $k_1$  y  $k_3$  para las muestras de kenaf, comparado con el otros autores. El coeficiente de correlación obtenido,  $R^2$ , es de 0,9817, para el margen de densidades de la tabla 3.1.13.

	$K_1$	$K_3$
Bies-Hansen	1.53	2.92
Pompoli-Garai	1.40	25.98
Kenaf	1.90	1.86

Tabla 3.1.16 Valores de los parámetros  $K_1$  y  $K_3$  obtenidos por Bies&Hansen (lanas minerales), Pompoli&Garai (fibras de poliéster) y para el Kenaf.

## 3.2. LÁMINAS FLOTANTES

### 3.2.1 Técnicas de medición

Como se ha descrito en el apartado 2.1.3.2 es necesario, después de haber asegurado el montaje experimental, registrar la frecuencia de resonancia de la vibración vertical fundamental de nuestro sistema masa ( $m'$ ) muelle (muestra sometida a ensayo). A partir de la curva de respuesta en frecuencia es posible validar o descartar el ensayo. En muchas ocasiones, debido a la aparición de oscilaciones indeseadas o de no haber elegido correctamente el tiempo de medida o rango de frecuencias, o por las características elásticas del material sometido a estudio puede que no sea posible detectar su rigidez mediante este método.

En la figura 3.2.1 se puede observar dos respuestas en frecuencias de un mismo ensayo, con diferentes espectros frecuenciales del analizador de frecuencias que se utiliza como registro (Symphonie).

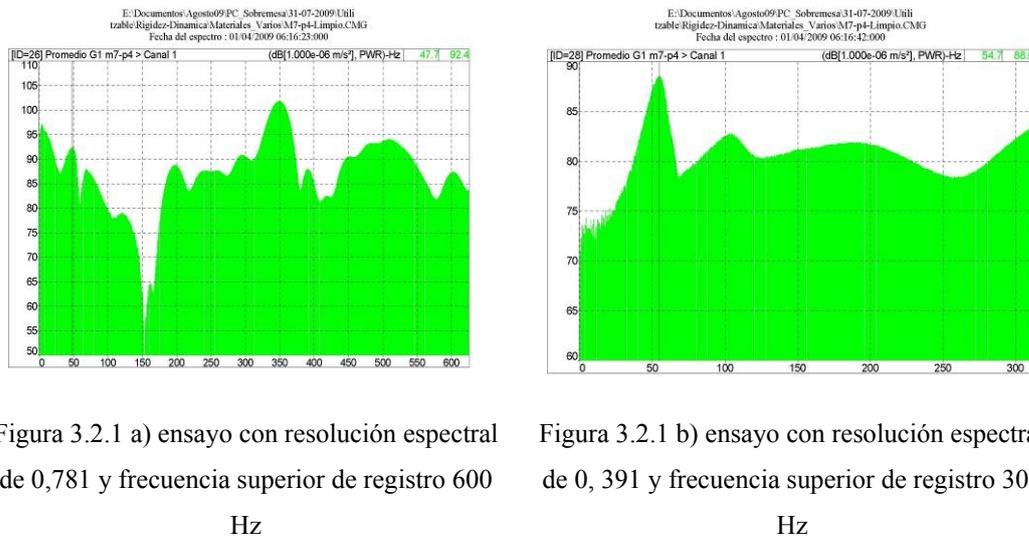


Figura 3.2.1 a) ensayo con resolución espectral de 0,781 y frecuencia superior de registro 600 Hz

Figura 3.2.1 b) ensayo con resolución espectral de 0,391 y frecuencia superior de registro 300 Hz

Figura 3.2.1. Respuesta en frecuencia de dos ensayos de rigidez dinámica aparente del mismo material, con la misma placa de carga y el mismo operario. Diferentes resoluciones espectrales

A partir de esta curva de frecuencia se obtiene el valor de la frecuencia de resonancia, (frecuencia de pico), y también es posible obtener el amortiguamiento mediante el método conocido como “Half-Power Point” [Fer95]. En este método el amortiguamiento viene descrito como:

$$\zeta = \frac{w_2 - w_1}{2w} \quad (3.2.1)$$

Siendo  $w$  la frecuencia de resonancia, y  $w_2$  y  $w_1$  las frecuencias a las cuales se produce una disminución de la mitad de energía, esto es, una disminución de 3 dB. Se puede definir el factor de calidad a partir del amortiguamiento como:

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (3.2.2)$$

Recordemos la ecuación 2.1.75:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t f_r^2 \quad (3.2.3)$$

Los únicos parámetros a obtener de forma experimental para calcular la rigidez dinámica aparente son la masa aparente por unidad de área,  $m'_t$ , y la frecuencia de resonancia,  $f_r$ . Podemos obtener la desviación que se comete en la estimación de la rigidez dinámica aparente utilizando este método de ensayo analizando la siguiente expresión:

$$\Delta s' = \frac{\partial s'}{\partial m'_t} \Delta m'_t + \frac{\partial s'}{\partial f_r} \Delta f_r \quad (3.2.4)$$

La masa por unidad de área aparente contempla diferentes términos ya que en el momento de registro del pico de resonancia, sobre la muestra de  $(200 \times 200)mm$ , tenemos la placa de carga, el acelerómetro y el martillo. De este modo podemos escribir el término de masa por unidad de área y la incertidumbre asociada a su determinación como se muestra en las expresiones 3.2.5 y 3.2.6:

$$m'_t = \frac{m_{placa} + m_{acelerómetro} + m_{martillo}}{l \times l} = \frac{m_p + m_a + m_m}{l^2} \quad (3.2.5)$$

$$\Delta m'_t = \frac{\Delta m_p}{l^2} + \frac{\Delta m_a}{l^2} + \frac{\Delta m_m}{l^2} + \frac{2(m_p + m_a + m_m)\Delta l}{l^3} \quad (3.2.6)$$

Siendo  $l$  la longitud de  $200mm$ .

El término asociado a la indeterminación de la frecuencia de resonancia viene dada por el mismo equipo de medida. Es posible programar el analizador de frecuencias para que realice el registro con diferentes precisiones. Se han utilizado las precisiones en los espectros de frecuencias dados por el mismo equipo de medida de 1,567 y 0,781, siendo estas precisiones saltos en las frecuencias de  $\Delta f_r = 2Hz$  o  $\Delta f_r = 1Hz$  respectivamente.

Se han analizado las desviaciones asociadas a la rigidez dinámica aparente estudiando el peso de cada uno de los dos términos por separado, el término asociado a la masa, primer sumando de la ecuación 3.2.4, y el término asociado a la indeterminación en la frecuencia, segundo término de la ecuación 3.2.4.

El término asociado a la masa se puede simplificar debido a la diferencia de órdenes de magnitud entre algunos de sus coeficientes. Como incertidumbre asociada a las masas del acelerómetro y del martillo se ha considerado la desviación propia del instrumento de medida de estas magnitudes, esto es 0,1 gramo,  $\Delta m_a = \Delta m_m = 0,1 \times 10^{-3} kg$ . Como incertidumbre asociada a la masa de la placa de carga se han considerado diferentes opciones,  $\Delta m_p = 0,1kg$ ,  $\Delta m_p = 0,05kg$  y  $\Delta m_p = 0,01kg$ . Estas diferencias de órdenes de magnitud multiplicados por el término de la derivada conduce a valores de 2,50 frente  $2,50 \times 10^{-3}$  o de 0,25 frente a  $2,50 \times 10^{-3}$  (MN/m<sup>3</sup>). Con esto queda justificada la siguiente simplificación de la ecuación 3.2.6:

$$\Delta m'_t \approx \frac{\Delta m_p}{l^2} + \frac{2(m_p + m_a + m_m)\Delta l}{l^3} \tag{3.2.7}$$

En la figura 3.2.2 se puede observar la evolución del término asociado a la indeterminación en la masa con la frecuencia para algunas de las masas de las placas de carga de las que se disponen. Se han representado los diferentes casos estudiados, si se tiene una indeterminación en el primer decimal de la masas de la placa de carga,  $\Delta m_p = 0,1kg$ , si la indeterminación es la mitad de esta primera,  $\Delta m_p = 0,05kg$ , o si la indeterminación se encuentra en el segundo decimal de la masa de la placa de carga en kg,  $\Delta m_p = 0,01kg$ .

Se observa que la incertidumbre asociada únicamente al término de la masa es bastante importante, no tener bien definida la masa de la placa de carga, esto es, no tener bien definido si su masa es de 8,0 kg o 8,1 kg introduce una indeterminación en el valor de la rigidez dinámica de, por ejemplo 2 MN/m<sup>3</sup> para una frecuencia de resonancia de 50 Hz. Además esta indeterminación aumenta con la masa de la placa de carga, en un rango no demasiado amplio, de 6,9 kg hasta 9,4 kg. También aumenta al aumentar el valor de la frecuencia de resonancia, al igual que el valor de la propia rigidez dinámica.

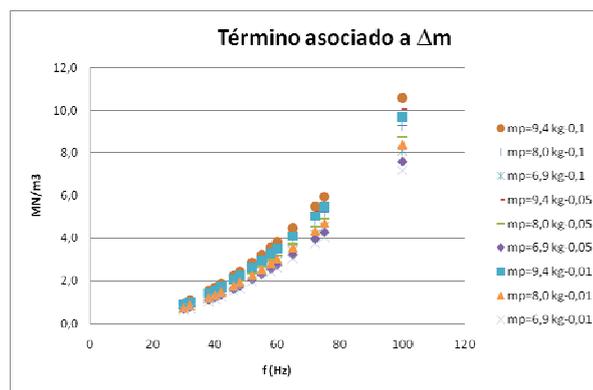


Figura 3.2.2. Evolución del término asociado a la masa de la incertidumbre en la rigidez dinámica aparente con la frecuencia de resonancia.

En la figura 3.2.3 se muestra la evolución con la frecuencia pero del término asociado con la indeterminación de la frecuencia. Se ha estudiado el caso en que la incertidumbre en la frecuencia de resonancia es de 2Hz o 1Hz. En este caso las masas representadas coinciden con el margen de masa recomendado por la Normativa correspondiente [UNE29052].

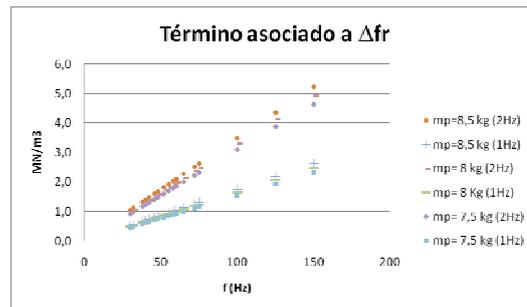


Figura 3.2.3. Evolución del término asociado a la frecuencia de resonancia de la incertidumbre en la rigidez dinámica aparente con la frecuencia de resonancia.

En la figura 3.2.3 se observa el aumento considerable del término asociado a la frecuencia de resonancia al aumentar la indeterminación de la frecuencia en tan solo una unidad. El aumento es mayor cuanto mayor sea la frecuencia de resonancia. Aunque este término depende de la masa no es significativo la influencia de ésta en la evolución del término.

Se han sumado ambos términos, el de masa y el de frecuencia para estudiar la incertidumbre total asociado al propio ensayo. Se representa la evolución del error relativo (%) para el caso de 1Hz o 2 Hz de incertidumbre en la frecuencia de resonancia y para distintas masas de placa de carga. Tanto los valores de la figura 3.2.4 a) como 3.2.4 b) se han obtenido considerando  $\Delta m_p = 0,1 \text{ kg}$ .

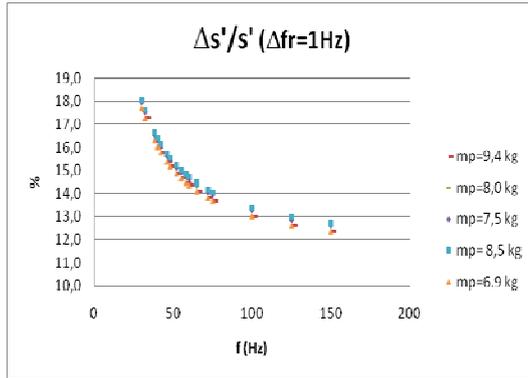


Figura 3.2.4 a) Evolución con la frecuencia del error relativo asociado a la medida de la rigidez dinámica aparente.  $\Delta f_r=1\text{Hz}$

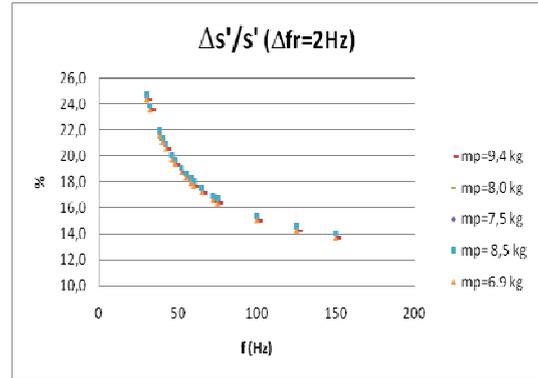


Figura 3.2.4 b) Evolución con la frecuencia del error relativo asociado a la medida de la rigidez dinámica aparente.  $\Delta f_r=2\text{Hz}$

Al estudiar el error asociado al ensayo de la rigidez dinámica aparente utilizando la técnica de medición descrita en el apartado 2.1.3.2 y desarrollado en este mismo punto con todas las contribuciones se observa que al disminuir la frecuencia de resonancia, el error relativo asociado a la medida aumenta de forma no lineal. La influencia de la masa de placa no es significativa en el margen de masa que estamos utilizando, que es el margen superior al establecido en la normativa. Sí es significativo un cambio de 1 Hz en la precisión del equipo de medida. Los valores de las figuras 3.2.4 a) y 3.2.4 b) disminuirían si se considerará  $\Delta m_p < 0,1\text{kg}$ .

### 3.2.1.1 Campaña de materiales

En este apartado se muestran algunos de los resultados de los ensayos realizados en laboratorio. Se han realizado un número elevado de ensayos para obtener la rigidez dinámica aparente de diferentes tipos de materiales, la gran mayoría de materiales son reciclados o reutilizados de diferentes industrias. Se han agrupado los resultados por campañas de ensayos con el fin de poder establecer un orden. La agrupación que se ha decidido para presentar los resultados es la siguiente: a) materiales reciclados; donde se presentan los resultados de tres campañas, campaña de reciclados 1 (reciclados varios), campaña de reciclados 2 y campaña

de reciclados 3 y b) materiales no absorbentes. Se presentan todos los valores de rigidez dinámica aparente en  $\text{MN/m}^3$  y redondeado al entero más próximo, tal y como se especifica en [UNE29052].

**a) Materiales reciclados**

Al mismo tiempo que después de la aparición del Documento Básico de Protección contra el ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación [DB-HR] la utilización de láminas flotantes pasa a ser una práctica casi necesaria para poder cumplir con los nuevos valores de aislamiento, se ha convertido en una necesidad poder reutilizar desechos de diferentes ámbitos dándole de nuevo vida útil. En este punto se muestran resultados de ensayos de rigidez dinámica aparente de diferentes materiales reciclados con el fin de valorar la posibilidad de utilizar estos como parte de suelos flotantes. En la tabla 3.2.1 se enumeran estos materiales, así como su densidad ( $\text{kg/m}^2$ ) y su espesor.

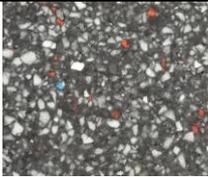
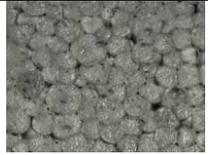
		
Material 1 1.3 $\text{kg/m}^2$ y 4.6 mm	Material 5 0.1 $\text{kg/m}^2$ y 0.5 mm	Material 7 0.3 $\text{kg/m}^2$ y 6.3 mm
		
Material 8 2.2 $\text{kg/m}^2$ y 15.1 mm	Material 9 2.9 $\text{kg/m}^2$ y 15.7 mm	Material 15 0.7 $\text{kg/m}^2$ y 8.5 mm
		
Material 16 1.6 $\text{kg/m}^2$ y 40.5 mm	Material 19 2.2 $\text{kg/m}^2$ y 11.9 mm	Material 20 2.2 $\text{kg/m}^2$ y 6.2 mm

Tabla 3.2.1 Materiales estudiados en este apartado.

Se presentan los resultados de la rigidez dinámica aparente que se ha obtenido como valor promedio de diferentes ensayos para cada una de las muestras estudiadas. También se muestran valores de factor de calidad y amortiguamiento (Tabla 3.2.2).

<b>Material Reciclado</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Q</b>	<b><math>\varepsilon</math> (%)</b>	<b>S't (MN/m<sup>3</sup>)</b>
M8	4,6	5	12	5
M20	0,5	36	9	5
M9	6,3	5	10	16
M19	15,1	6	9	16
M7	15,7	4	13	26
M1	8,5	4	14	46
M16	40,5	3	15	49
M5	11,9	6	8	68
M15	6,2	4	12	120

Tabla 3.2.2. Valores de espesor, factor de calidad, amortiguamiento y rigidez dinámica aparente de los materiales reciclados de la campaña de mediciones 1.

Como ya se ha expuesto en 2.2.2.2 es posible estimar la mejora a impacto del conjunto de un suelo base, en este caso se ha considerado un mortero de 150kg/m<sup>2</sup>, junto los materiales considerados, en este caso materiales reciclados. Los resultados para todos los materiales expuestos en la tabla 3.2.1 se muestran en la figura 3.2.5

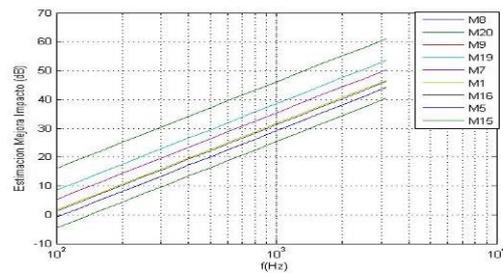


Figura 3.2.5. Estimación de la mejora a impacto de un suelo base junto los materiales reciclados expuestos en la tabla 3.2.1

A continuación se enseñan una serie de resultados de la campaña 2 de materiales reciclados. Se trata de un conjunto de 12 muestras de materiales aparentemente iguales entre sí. La base de estos materiales es la misma para todos, pero ni el porcentaje de los diferentes elementos que los componen, ni el tipo de resina y/o procedimiento de unir estos diferentes elementos es el mismo.

Estos materiales son etiquetados con la numeración des de el 12 hasta 24. Debido a que estos ensayos se engloban dentro de un proyecto de investigación sujeto a otras entidades, no es posible dar más detalles de estos materiales, en la figura 3.2.6 se muestran algunas muestras de algunos de los materiales ensayados.



Figura 3.2.6. Algunas de las muestras ensayadas.

Se han realizado las mediciones en tres fases diferentes, los primeros materiales sometidos al ensayo de rigidez dinámica aparente fueron el 12, 13, 14, 15 y 16. En una segunda fase se analizaron los materiales 17, 18, 19 y 20, y por último los materiales 21, 22, 23 y 24. Del material 21 no se muestran resultados de valores de rigidez dinámica ya que durante la realización del ensayo la muestra de este Romina del Rey Tormos

material no quedó en buen estado. En la tabla 3.2.3. se puede observar los valores de rigidez dinámica aparente obtenidos para estos materiales.

Material	Rigidez dinámica aparente (MN/m <sup>3</sup> )
12	217
13	170
14	181
15	172
16	213
17	163
18	117
19	300
20	47
22	62
23	66
24	41

Tabla 3.2.3. Valores de rigidez dinámica aparente de los materiales reciclados de la campaña 2

A partir de estos valores de rigidez dinámica aparente se obtiene una estimación a la mejora de impacto del conjunto de un suelo base, en este caso se ha considerado un mortero de 122,4kg/m<sup>2</sup>, junto el material considerado, en este caso materiales del 12 al 24. En la figura 3.2.7 se puede observar esta estimación.

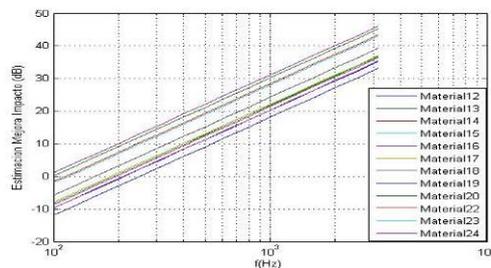


Figura 3.2.7. Estimación de la mejora a impacto de un suelo base junto los materiales reciclados campaña 2.

Se muestran ahora los resultados de los ensayos de la campaña 3. Son materiales del mismo espesor pero con densidades distintas. Estos ensayos también están englobados dentro de un proyecto de investigación junto una empresa, por lo que no es posible dar más detalles de éstos. Se ensayan 9 muestras de diferentes densidades, las muestras vienen nombradas como D60, D80, D100, D120, D150, D180, D200, D250 y D300. Las densidades aumentan en el mismo orden que han sido nombradas. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los ensayos para estos materiales:

Material	Rigidez dinámica aparente (MN/m <sup>3</sup> )
D60	2
D80	3
D100	4
D120	8
D150	18
D180	20
D200	21
D250	33
D300	30

Tabla 3.2.4. Valores de rigidez dinámica aparente de los materiales reciclados de la campaña 3.

La estimación a la mejora de impacto, con un mortero de 122,4kg/m<sup>2</sup> se observa en la figura 3.2.8.

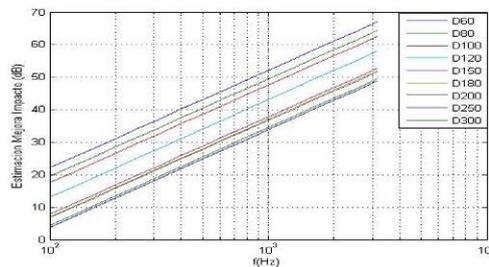


Figura 3.2.8. Estimación de la mejora a impacto de un suelo base junto los materiales reciclados campaña 3.

**b) Materiales no absorbentes**

Se muestran los resultados de los ensayos realizados de materiales no absorbentes, son cuatro placas comerciales provenientes de diferentes ámbitos y cuatro muestras de caucho. La descripción, los espesores, densidades y valores de rigidez dinámica aparente de las placas comerciales se pueden observar en la tabla 3.2.5. La estimación de la de la mejora a impacto en la figura 3.2.9.

Material	Espesor (mm)	Densidad (kg/m <sup>2</sup> )	Rigidez Dinámica Aparente (MN/m <sup>3</sup> )
Poliuretano de alta densidad (P1)	3	2.7	131
Laminado de látex con aditivos de aluminio térmico (Látex)	2	0.6	46
Laminado de Corcho (Corcho)	2	0.7	151
Poliuretano Baja Densidad (P2)	2	0.2	102

Tabla 3.2.5. Descripción, espesor, densidad y valor de la rigidez dinámica aparente de las placas no absorbentes

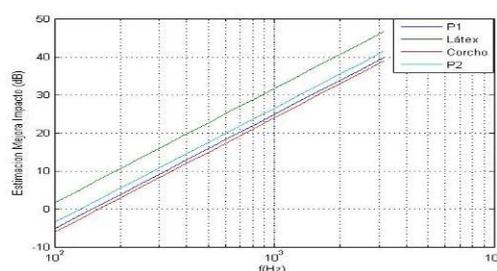


Figura 3.2.9. Estimación de la mejora a impacto de un suelo base junto los paneles no absorbentes.

Se muestran también los resultados de los ensayos realizados con cuatro cauchos. Dos de estos cauchos presentan la misma densidad y diferente espesor; 2.5mm

con un valor de rigidez dinámica aparente de  $260 \text{ MN/m}^3$  y 5mm de espesor con un valor de  $s'$  de  $566 \text{ MN/m}^3$ . Los otros dos cauchos ensayados son de 1mm y muy baja densidad ( $0.6 \text{ kg/m}^2$ ) y de 3mm y mayor densidad ( $2.6 \text{ kg/m}^2$ ) y presentan respectivamente 244 y  $230 \text{ MN/m}^3$  de valores de rigidez dinámica aparente. No se ha considerado en este caso la predicción de la mejora a impacto con estos cauchos debido al elevado valor de rigidez dinámica aparente que presentan y por ser, en este caso, el estudio más bien comparativo.

## **4. PREDICCIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO "IN SITU"**

En este capítulo se describen también las aportaciones recogidas en esta memoria, en concreto aquellas que involucran la transmisión por flancos.

En la sección 4.1 se describen aquellas aportaciones la base experimental de las cuales es la determinación experimental del índice de reducción de vibraciones, magnitud esencial para obtener la transmisión por flancos.

Existe un procedimiento de medida normalizado para obtener este parámetro Este procedimiento viene descrito en la UNE-EN 10848-1:2007 [UNE10848-1] y en el punto 2.3 se ha anunciado su importancia dentro del conocimiento del aislamiento global.

En el punto 4.1.1 se detalla el procedimiento de medida de la diferencia de niveles de velocidad promediada, magnitud de gran peso para obtener el índice de reducción de vibraciones. En el punto 4.1.2 se detalla el procedimiento de otro de los parámetros relevantes, el tiempo de reverberación estructural.

En el punto 4.1.3 se comparan los resultados del índice de reducción de vibraciones que se han obtenido a partir de mediciones in situ con los resultados que se obtienen a partir de las ecuaciones empíricas y que se han mostrado dentro del punto 2.2.2.

Por último, dentro de esta sección, en el punto 4.1.4, se realiza un estudio de la incertidumbre asociada al proceso de determinación del índice de reducción de vibraciones, asociada al propio procedimiento de ensayo o a estimaciones que se suponen para determinar algunos parámetros involucrados en su obtención.

En la sección 4.2 se describe el modelado en dos dimensiones mediante elementos finitos que se ha diseñado para obtener información de las transmisiones por flancos. Se ha simulado el proceso de medición descrito en la normativa [UNE10848-1], número de puntos de medida, posiciones de transductores, puntos de excitación, etc.

#### **4.1 MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL**

En la normativa referente al aislamiento acústico a ruido aéreo teniendo en cuenta la transmisión por flancos [UNE10848-1] [UNE10848-2], y en concreto, la norma española UNE-EN ISO 10848-1:2007 se dice que el rendimiento de los elementos de construcción se puede expresar mediante el índice de reducción de vibraciones,  $K_{ij}$ . En esta normativa se especifican los procedimientos que se deben utilizar en un laboratorio de ensayo para caracterizar la transmisión por flancos de uno o más elementos de construcción.

Por otra parte, en la normativa referente a aislamiento acústico entre recintos en edificación, sin especificar necesariamente laboratorios, [UNE12354-1] referencia este método para determinar algunas de las magnitudes que expresan las características de los elementos que serán utilizadas como parte de datos de entrada para estimar las características de la edificación. Cualquier indeterminación en la estimación de estos parámetros de entrada afectará al valor del comportamiento acústico global de toda la edificación, y éste puede ser crítico.

En esta sección se describen los protocolos de ensayo que se han utilizado para poder obtener experimentalmente el índice de reducción de vibraciones. La base experimental de éstos se basa en los procedimientos normalizados, pero se han realizado ciertas modificaciones que responden a necesidades de la situación en concreto de la medición in situ.

También en esta sección se comparan los valores del índice de reducción de vibraciones que se han obtenido de forma experimental, en base a los ensayos anteriormente descritos, con otros empíricos dados por las ecuaciones descritas en la sección 2.2 (2.2.2.3).

Por último, en esta sección se describe la incertidumbre asociada a la obtención de forma experimental del índice de reducción de vibraciones, bien por el procedimiento de ensayo utilizado para obtener las diferentes magnitudes involucradas, bien por algunas estimaciones que se utilizan.

#### 4.1.1 Medición de diferencia de velocidades

Es necesario conocer la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos  $i$  y  $j$ , cuando el elemento  $i$  es excitado, en decibelios,  $D_{v,ij}$  y la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos  $j$  y  $i$  cuando el elemento  $j$  es excitado, en decibelios,  $D_{v,ji}$ , este se puede obtener a partir de los niveles de velocidad.

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \quad (4.1.1)$$

En [UNE10848-1] se describen dos formas de excitar los elementos para poder obtener la velocidad de excitación de éstos, excitación aérea o excitación estructural. En el procedimiento de ensayo detallado a continuación y utilizado para obtener todos los resultados que se muestran en este punto se ha escogido la excitación estructural, por ser la excitación aérea en los casos que es aplicable más lenta e ineficaz.

Como excitador se ha utilizado para superficies horizontales una máquina de impactos normalizada. Ésta se dispone formando un ángulo de  $45^\circ$  con la normal de la superficie a medir. En superficies verticales se utiliza una caladora. De esta forma se asegura, en la medida de lo posible que la fuerza de excitación sea constante durante la realización de las medidas.

Para contrarrestar la posibilidad de que la fuerza de excitación no sea constante, sobre todo para superficies verticales en las que la caladora es sujeta por un operario que interviene en las mediciones, se realizan los promediados de las diferencias de los niveles de velocidad ( $D_{v,ij}$  o  $D_{v,ji}$ ) y no de los niveles de velocidad en cada elemento ( $L_i$  o  $L_j$ ). Además para cada punto de excitación se registra simultáneamente los niveles en el elemento excitado y en elemento inverso. En la figura 4.1.1 se puede observar imágenes de este procedimiento de medida.



Figura 4.1.1 Detalle de mediciones en superficie horizontal (forjado) y vertical (medianera) de los niveles de velocidad

Como transductores de registro de la vibración se utilizan acelerómetros de pulgada de Brüel&Kjaer, Type 4370, obteniendo la aceleración de vibración. Es sabido que para vibraciones armónicas en las que la velocidad puede ser descrita por su amplitud y fase (4.1.2) las diferencias de niveles de velocidad son análogas a las diferencias de los niveles de aceleración, como se puede observar en las siguientes expresiones:

$$V = V_0 e^{j\omega t} \quad (4.1.2)$$

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = j\omega V \quad (4.1.3)$$

$$D_V = L_{v2} - L_{v1} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} = 20 \log \frac{a_2}{a_1} = L_{a2} - L_{a1} \quad (4.1.4)$$

En la normativa donde se describe el procedimiento de medición en laboratorio [UNE10848-1] se detalla que en general es suficiente con tres posiciones de excitación y nueve posiciones de transductor, y tres posiciones de transductor asociados a cada posición de excitación. En el procedimiento seguido que se

refleja en esta memoria de tesis se han realizado cinco posiciones de excitación y tres posiciones de transductor asociadas a cada posición de excitación.

Existen trabajos donde se justifica este aumento de puntos de medida [Alo08] [Rey08] [Rey09] estudiando la incertidumbre asociada a la medida de niveles de diferencia de velocidades. Parte de este estudio queda reflejado en el siguiente punto 4.1.4.

Las posiciones entre transductor, excitador y límites de los elementos de ensayo seguidos en este procedimiento han sido los que se detallan en la normativa [UNE10848-1], siempre que ha sido posible debido a las dimensiones de los elementos a estudiar. Estos se detallan a continuación:

- 0,5 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayo.
- 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 de transductor y los límites del elemento a ensayo.
- 0,5 m entre cada posición del transductor.

La distancia entre posiciones de transductor y la unión sometida a ensayo en ningún momento ha superado los 3,5 m. Se han distribuido todos los puntos de medida de forma aleatoria y no simétrica y antes de cada medición nos hemos asegurado de superar en 10 dB el nivel de fondo en cada banda de frecuencias.

Existe una desigualdad de importante relevancia en la medida de diferencia de niveles de velocidad:

$$D_{v,ij} \geq 3 - 10 \lg \left( \frac{m_i f_{cj}}{m_j f_{ci}} \right) \text{dB} \quad (4.1.5)$$

Donde  $m_i$  y  $m_j$  son las densidades superficiales ( $\text{kg/m}^2$ ) de los elementos  $i$  y  $j$  respectivamente, y  $f_{ci}$ ,  $f_{cj}$  la frecuencias críticas de estos elementos.

La desigualdad (4.1.5) es lo que hemos denominado como *condición de acoplamiento débil*. El valor medido de  $K_{ij}$  puede no ser de interés en el caso en que exista un fuerte acoplamiento entre los elementos. En este caso no se cumple la desigualdad y la transmisión de potencia no podrá ser entendida por el índice de reducción de vibraciones.

#### **4.1.2 Medición del tiempo de reverberación estructural**

Los valores de las absorciones de longitud equivalentes,  $a_i$  y  $a_j$ , se determinan de acuerdo con la ecuación 2.2.13 por lo tanto es necesario conocer los tiempos de reverberación estructural,  $T_{si}$  y  $T_{sj}$ . El tiempo de reverberación estructural se define como el tiempo que se requiere para que la velocidad o nivel de aceleración en una estructura disminuya 60 dB después de que la fuente sonora estructural haya cesado. Se determina mediante excitaciones puntuales y registros puntuales de la velocidad o la aceleración. En el caso que nos ocupa, en diferentes posiciones de transductor.

Se permite según [UNE10848-1] la excitación mediante vibrador o martillo. El procedimiento seguido ha sido excitar con martillo. Se ha utilizado un martillo de Brüel&Kjaer, type 8208. Éste dispone de diferentes extremos, cada uno de una masa diferente, por lo que mediante este procedimiento nos aseguramos que queden excitadas todas las diferentes bandas de frecuencia, variando, cuando ha sido necesario, la masa del martillo.

Se han realizado, como mínimo, tres puntos de excitación en el elemento a estudio. Se han distribuido de forma aleatoria tanto impactos con martillo como transductores, cumpliendo siempre en la medida de lo posible las condiciones descritas en [UNE10848-1], con el fin de obtener estadísticamente puntos de medición con la suficiente precisión para obtener a partir de éstos por promediado aritmético el tiempo de reverberación del elemento a estudio. Las condiciones descritas por [UNE10848-1] se describen a continuación:

- 0,5 m entre posiciones de transductor y límites de ensayo.
- 1,0 m entre puntos de excitación y las posiciones de transductor.
- 0,5 m entre cada posición de transductor

En todo momento se ha cumplido que el tiempo de respuesta del detector promediador era el suficiente para poder registrar la caída.

En la figura 4.1.2 se puede observar el detalle de alguna de las mediciones.

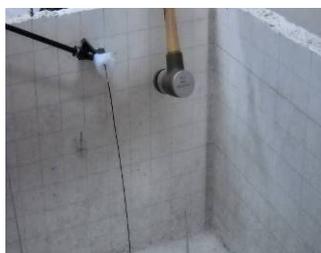


Figura 4.1.2. Medida del tiempo de reverberación estructural en una maqueta a escala de hormigón.

### **4.1.3 Comparativas con la normativa actual**

En este punto se muestran algunos de los resultados de la campaña de ensayos para el estudio de transmisiones laterales. Las magnitudes que se han ensayado han sido la diferencia de niveles de velocidad y el tiempo de reverberación estructural. En este apartado no se muestran medidas del tiempo de reverberación estructural. La determinación experimental de este parámetro se muestra en el punto 4.1.4.

En estas comparativas se presentan dos tipos de resultados. Por un lado, resultados asociados a diferentes campañas de medición en obras a punto de entregarse. Por otro, resultados en una maqueta realizada a escala con hormigón armado. Estos resultados pretenden compararse con la formulación que ofrece actualmente la normativa buscando su validez o posibles mejoras. Otros autores [Bar07] ya han

realizado comparaciones de mediciones normalizadas en laboratorio y valores que ofrecen las fórmulas empíricas.

Conociendo la masa por unidad de área de los diferentes elementos que forman la unión y las longitudes de cada uno de ellos es posible obtener de forma empírica el índice de reducción vibracional.

Se diferencian las configuraciones entre uniones en Cruz Rígida y uniones en Cruz Ligera. Se estudia también el caso de elementos rígidos con inserción de capas flexible. También se ha diferenciado entre uniones en T Rígida y uniones en T Ligera, tal y como se distingue en la normativa [UNE12354-1].

En concreto, para el caso de uniones ligeras se ha comparado con las ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de uniones de paredes ligeras de doble hoja con elementos homogéneos, al ser estos los casos que han sido estudiados. La normativa diferencia entre elementos homogéneos rígidos y elementos ligeros.

Para cada tipo de unión han sido detalladas las características de los elementos estructurales que se han considerado relevantes.

#### **a) Unión en Cruz Rígida**

Se presentan los resultados de ensayos in situ de un edificio en construcción para una unión en cruz entre medianeras y forjados. Para la realización de estos ensayos in situ se ha utilizado, para asegurar una excitación uniforme, una máquina de impactos normalizada para excitar forjados y una caladora para excitar medianeras. Los registros de excitación se han realizado con un analizador de frecuencias de doble canal, 2144 de Brüel&Kjaer y como transductores se han utilizados dos acelerómetros 4370 también de Brüel&Kjaer. También se presentan los resultados de las configuraciones en cruz de una maqueta de hormigón.

La descripción de los elementos que forman la configuración se detalla a continuación y en la figura 4.1.2 se puede observar un esquema de la misma:

- Medianeras; 15mm de yeso + LH7 con absorbente + LH7+15mm de yeso,  $m=166,2\text{kg/m}^2$ .

- Forjado; Bovedilla de hormigón de 25cm y 372 kg/m<sup>2</sup>, con suelo flotante de poliuretano, 151 kg/m<sup>2</sup>. Se considera para las comparaciones con las ecuaciones empíricas m= 372 kg/m<sup>2</sup>.

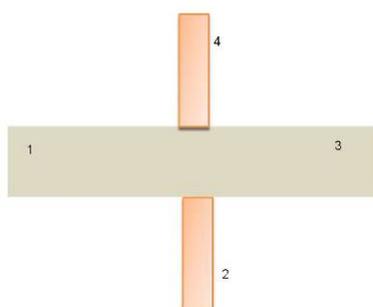


Figura 4.1.2. Configuración rígida de doble ladrillo estudiada in situ.

En la figura 4.1.3 se pueden observar los resultados de las mediciones de las diferencias de niveles de velocidad para los diferentes caminos de transmisión estudiados.

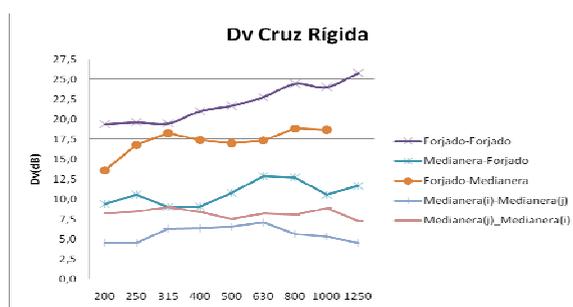


Figura 4.1.3 Evolución de la diferencia de niveles de velocidad con la frecuencia, para los diferentes caminos estudiados de la configuración en Cruz Rígida.

La figura 4.1.3 muestra los valores de las diferencias de niveles de velocidad y no de los índices de reducción de vibraciones. Podemos observar la débil influencia, en esta configuración rígida, con la frecuencia dentro del rango representado,

desde 250Hz hasta 1250Hz, rango en el cual la normativa permite calcular un valor global como la media aritmética.

En esta campaña de ensayos se ha obtenido a partir de los valores del índice de reducción de vibraciones para cada banda de frecuencias, el valor global tal y como se especifica en [UNE10848-1]. Se ha comparado este valor con el valor descrito por las expresiones empíricas que se dan en [UNE12354-1] referentes a uniones rígidas y con las ecuaciones empíricas para elementos homogéneos con inserciones de elementos flexibles.

Aunque cabe diferenciar entre elemento flexible insertado con elemento homogéneo y suelo flotante [Reya09], no se conocen expresiones empíricas que describan el comportamiento con suelo flotante, sino que el procedimiento a seguir para obtener una estimación en este caso es la estimación del índice de reducción de vibraciones,  $K_{ij}$ , rígido con una contribución adicional a la mejora al aislamiento debido al suelo flotante.

Las masas por unidad de área ( $\text{kg/m}^2$ ) para realizar la estimación según las expresiones empíricas han sido obtenidas a partir del catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación [DB-HR]. Las expresiones (2.2.37) y (2.2.38) son estas fórmulas empíricas para los diferentes caminos de uniones rígidas, descritas en el apartado 2.2.2.3 y que aquí reproducimos como expresiones (4.1.6) y (4.1.7). Las expresiones (4.1.8), (4.1.9) y (4.1.10) (reproducciones de las expresiones 2.2.41, 2.2.42 y 2.2.43) son las expresiones para elementos homogéneos con capas intermedias flexibles.

$$K_{13} = \left( K_{\text{forjado}-\text{medianera}} = K_{\text{medianera}-\text{forjado}} \right) = 8,7 + 5,7 \times M^2 \text{ (dB)} \quad (4.1.6)$$

$$K_{14} = \left( K_{\text{forjado}-\text{forjado}} \right) = 8,7 + 17,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ (dB)} = K_{\text{medianera}-\text{medianera}} \quad (4.1.7)$$

$$K_{13} = \left( K_{\text{forjado}-\text{medianera}} = K_{\text{medianera}-\text{forjado}} \right) = 5,7 + 5,7 \times M^2 + 10 \lg \left( \frac{f}{500} \right) \text{ (dB)} \quad (4.1.8)$$

$$K_{14} = (K_{forjado-forjado}) = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 + 2 \times 10 \times \lg\left(\frac{f}{500}\right) (dB) \quad (4.1.9)$$

$$K_{medianera-medianera} = 3,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 (dB); 0 \leq K \leq -4 \quad (4.1.10)$$

También se comparan los resultados experimentales globales con las ecuaciones que se deducen del estudio realizado por CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment) para configuraciones con ladrillos dobles, ecuaciones de la (2.2.48) a la (2.2.55).

La figura 4.1.4 muestra la comparación de los valores globales experimentales y empíricos de los diferentes caminos de transmisión estudiados.

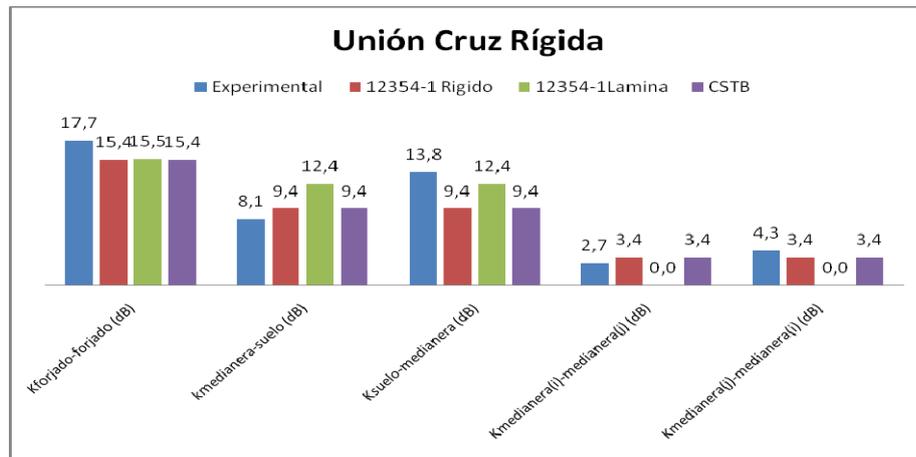


Figura 4.1.4. Comparación de los valores globales de los diferentes caminos de transmisión experimentales y empíricos.

Las diferencias entre valores globales empíricos y experimentales serán comentadas al final de este apartado, con una visión global de los cuatro casos diferenciados (Cruz, T, Rígido y Ligero).

Comentar ahora las diferencias que se pueden observar en la figura 4.1.4 entre  $K_{medianera-suelo}$  y  $K_{suelo-medianera}$  y entre  $K_{medianera-medianera}$  camino ij y ji. En el primer

caso existe una diferencia de 5 dB aproximadamente. Estos caminos, al ser caminos inversos, la normativa correspondiente da las mismas expresiones empíricas, suponiendo que la transmisión de energía es prácticamente idéntica en ambos sentidos. Es menor la diferencia entre medianera(i)-medianera(j) y medianera(j)-medianera(i).

A continuación se describen algunas características relevantes para la estimación del índice de reducción vibracional de la maqueta a escala de hormigón utilizada para este estudio. Se han realizado ensayos de las diferencias de niveles de velocidad y del tiempo de reverberación estructural, de medianeras (ejes a y b de la figura 4.1.6) y forjados.

La longitud de las medianeras son  $l_a=975\text{mm}$  y  $l_b=675\text{mm}$  y sus densidades superficiales de  $120\text{ kg/m}^2$  en ambos casos. El forjado presenta una longitud de  $600\text{mm}$  y  $240\text{ kg/m}^2$  de densidad superficial. Para asegurar una excitación uniforme se ha utilizado una caladora para obtener la diferencia de niveles de velocidad y para la obtención del tiempo de reverberación estructural se ha utilizado el martillo de Brüel&Kjaer 8208. Se ha registrado la excitación con acelerómetros de Brüel&Kjaer 4370 y un analizador de frecuencias de doble canal de 01dB, plataforma symphonie.

En la figura 4.1. 5 se puede observar un plano general de la maqueta estudiada. En la figura 4.1.6 se puede observar detalles de la unión en Cruz de la maqueta de hormigón. En la figura 4.1.7 algunos detalles de las mediciones.



Figura 4.1.5. Vistas generales de la maqueta de hormigón.



Figura 4.1.6. Detalle de la configuración en Cruz de la maqueta de hormigón.



Figura 4.1.7. Detalle de alguna de las mediciones de los niveles de velocidad.

Se presentan resultados de 3 transmisiones distintas: estudio de la transmisión forjado-medianera ( $K_{12}$ ), transmisión entre medianeras ( $K_{13}$ ) y medianera-medianera ( $K_{13t}$ ). Los esquemas de las distintas configuraciones se pueden observar en la figura 4.1.8.

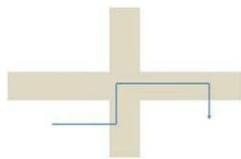


Figura 4.1.8 a)  $K_{12}$

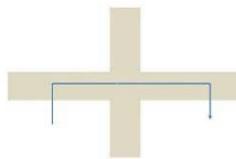


Figura 4.1.8 b)  $K_{13}$

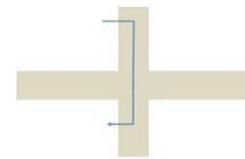


Figura 4.1.8 c)  $K_{13t}$

Figura 4.1.8. Diferentes transmisiones estudiadas en la maqueta de hormigón con la configuración Cruz Rígida.

Predicción del aislamiento acústico "in situ"

Los valores de la diferencia de niveles de velocidad experimentales se han comparado con el límite que marca la ecuación de acoplamiento débil. Para la configuración 1-2, medianera-forjado, esta comparación se puede observar en la figura 4.1.9, el nivel de diferencia de niveles de velocidad supera en todas las frecuencias el límite establecido por la ecuación 4.1.5.

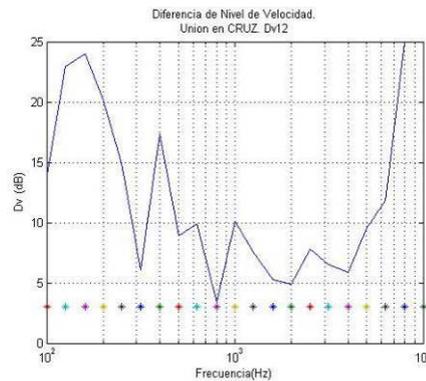


Figura 4.1.9. Diferencia de niveles de velocidad experimentales en la transmisión 12 (medianera-forjado)

A partir de estos valores se puede obtener el índice de reducción vibracional.

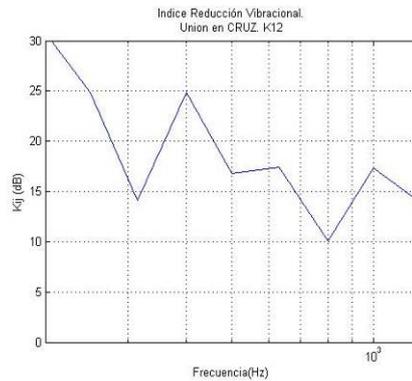
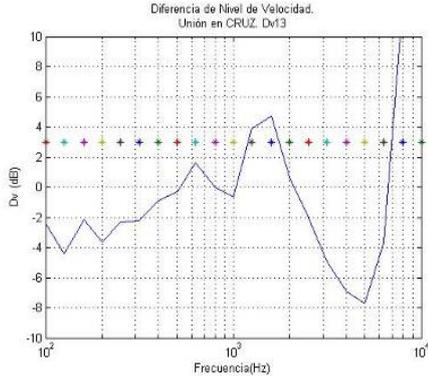
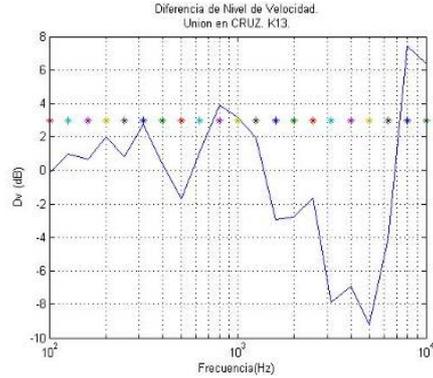


Figura 4.1.10 .K<sub>12</sub> para la configuración Cruz Rígida en la maqueta de hormigón.

Se presenta para las configuraciones K<sub>13</sub> y K<sub>13t</sub> la diferencia de niveles de velocidad experimentales comparándolas con el límite que establece si el acoplamiento entre elementos es lo suficientemente débil para poder estudiar la transmisión de energía por flancos mediante el índice de reducción de vibraciones.



4.1.11 a) Diferencia de niveles de velocidad para la transmisión 13.



4.1.11 b) Diferencia de niveles de velocidad para la transmisión 13t.

Son pocas las frecuencias que superan el límite establecido por la ecuación 4.1.5 para las dos configuraciones anteriores. Se ha decidido obtener el índice de reducción de vibraciones global (o medio) solo con los valores que superan el límite de acoplamiento débil. Este valor se compara por el que se obtiene mediante las ecuaciones empíricas que se expresan en [UNE12354-1] para uniones rígidas.

Las expresiones empíricas que describen las tres configuraciones estudiadas en este apartado se reproducen en las expresiones (4.1.11) y (4.1.12) y en la figura 4.1.12 se comparan los valores experimentales con los valores según las ecuaciones empíricas del índice de reducción vibracional para las diferentes configuraciones de uniones en Cruz estudiadas mediante esta maqueta de hormigón.

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 \times M^2 (dB) \tag{4.1.11}$$

$$K_{13} = K_{13t} = 8,7 + 17,1 \times M + 5,7 \times M^2 (dB) \tag{4.1.12}$$

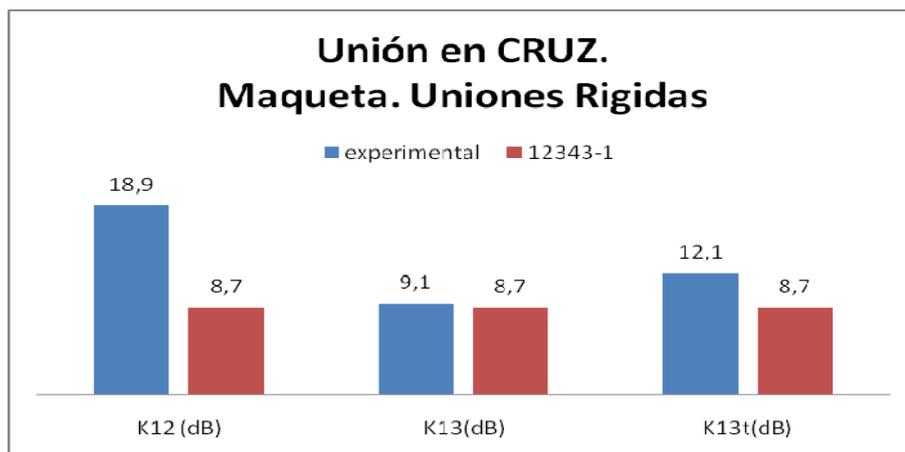


Figura 4.1.12 Comparación de los valores globales de los diferentes caminos de transmisión experimentales y empíricos, para la configuración de Cruz Rígido en la maqueta de hormigón.

En la figura 4.1.12 se observa una diferencia de 3 dB entre el valor de  $K_{13}$  y  $K_{13t}$  experimentales. Ambos caminos son representados empíricamente con la misma expresión a partir del modelo descrito en la normativa. Esta diferencia coincide con la tolerancia del mismo modelo. Destacar el valor elevado de poco más de 18 dB en el camino de transmisión 1-2.

#### b) Unión en T Rígida

En este apartado también se muestran resultados de uniones en T de la maqueta de hormigón que se ha descrito en el apartado 4.1.1.4 a). Se muestran también resultados de ensayos in situ en edificaciones de reciente construcción.

Un detalle de la unión en T de la maqueta se muestra en la figura 4.1.13.



Figura 4.1.13. Detalle de la unión en T de la maqueta de hormigón.

Se presentan los resultados para esta configuración de forjado-medianera ( $K_{12}$ ) y forjado-forjado ( $K_{13}$ ). En ambos casos se presentan los valores de la diferencia de niveles de velocidad ensayados para todo el rango de frecuencias de registro del analizador y se compara en las mismas gráficas estos valores dependientes de la frecuencia con el límite establecido por la ecuación 4.1.5. Se presentan también los mismos valores pero filtrados, estos es, tan solo los que superan el valor establecido por dicha ecuación y en el rango de frecuencias desde 200Hz hasta 1250Hz, figuras 4.1.15 y 4.1.16.

A partir de estos valores se obtiene el valor del índice de reducción vibracional (figura 4.1.17 a) y 4.1.17 b)) para las configuraciones  $K_{12}$  y  $K_{13}$  respectivamente.

En la figura 4.1.14 se observa un esquema de las dos configuraciones en T.



Figura 4.1.14 a) Esquema de la configuración  $K_{12}$  unión en T

Figura 4.1.14 b) Esquema de la configuración  $K_{13}$  unión en T

Predicción del aislamiento acústico "in situ"

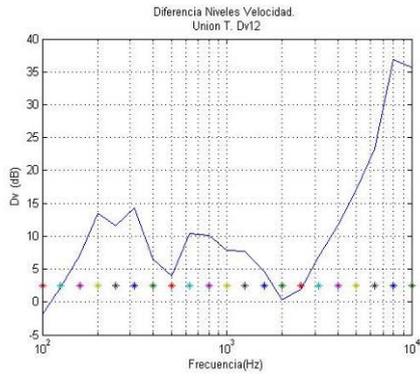


Figura 4.1.15 a) Diferencia de niveles de velocidad medidos y valor límite establecido por la ecuación 4.1.5 para la configuración  $K_{12}$  de unión en T.

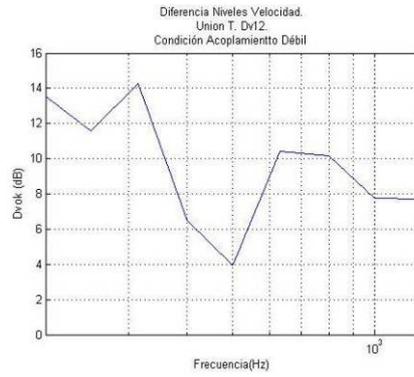


Figura 4.1.15 b) Diferencia de niveles de velocidad medidos que superan el valor establecido por la ecuación 4.1.5 para la configuración  $K_{12}$  de unión en T.

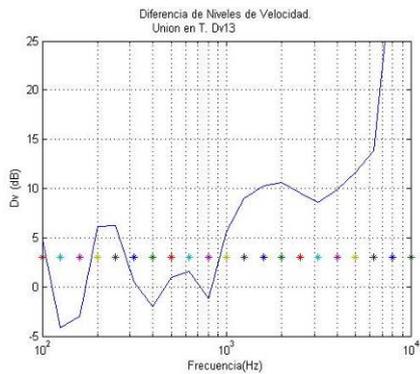


Figura 4.1.16 a) Diferencia de niveles de velocidad medidos y valor límite establecido por la ecuación 4.1.5 para la configuración  $K_{13}$  de unión en T.

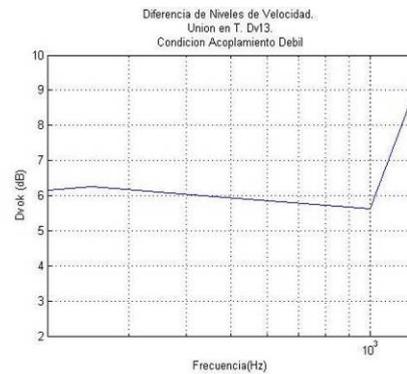


Figura 4.1.16 b) Diferencia de niveles de velocidad medidos que superan el valor establecido por la ecuación 4.1.5 para la configuración  $K_{13}$  de unión en T.

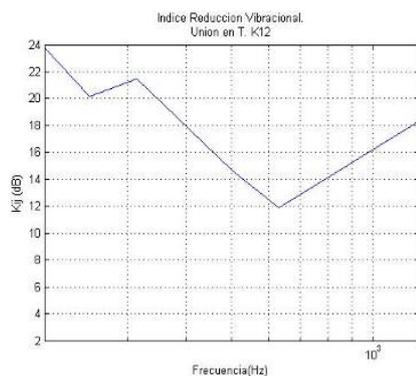


Figura 4.1.17 a)

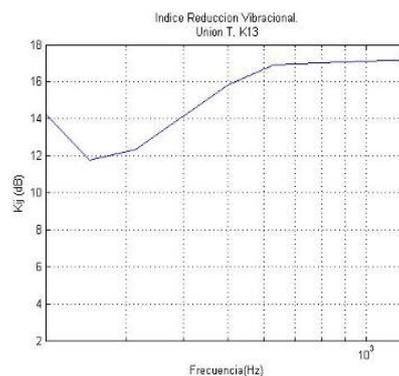


Figura 4.1.17 b)

Figura 4.1.17. Valor del índice de reducción vibracional experimental para unión T Rígida, configuración 12 (a) y 13 (b) de la maqueta de hormigón.

A partir de los valores de la figura 4.1.17, se obtiene un valor global del índice de reducción vibracional, como valor promedio de estos valores, éste es comparado por el valor que se obtiene a partir de las ecuaciones empíricas de la 12354-1 [UNE12354-1].

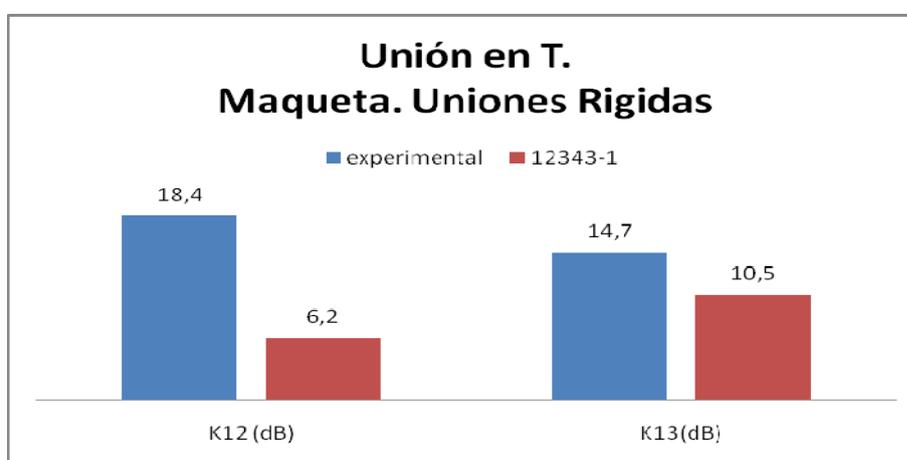


Figura 4.1.18. Valores globales del índice de reducción vibracional de las diferentes configuraciones estudiadas de T Rígida de la maqueta de hormigón, experimentales y empíricas.

Se muestran ahora los resultados de mediciones de configuraciones en T rígida realizadas in situ en una edificación. Se presentan resultados de dos

configuraciones. La primera sin suelo flotante y la segunda presenta suelo flotante en uno de sus elementos. La masa por unidad de superficie de los elementos a estudio,  $\text{kg/m}^2$ , se ha obtenido a partir del catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación [DB-HR] tal y como se ha hecho con los resultados de la configuración Cruz rígida.

De las dos configuraciones estudiadas se presentan valores globales del índice de reducción vibracional. Estos se comparan con los valores obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas descritas en 12354-1 [UNE12354-1]. En este caso, no ha sido posible comparar con las expresiones que se derivan del estudio realizado por CSTB, ya que ninguna de las dos configuraciones estudiadas presenta coincidencia.

Se presenta en la figura 4.1.19 un esquema de la primera configuración estudiada, unión continua rígida en T de elemento homogéneo doble con elemento homogéneo simple.

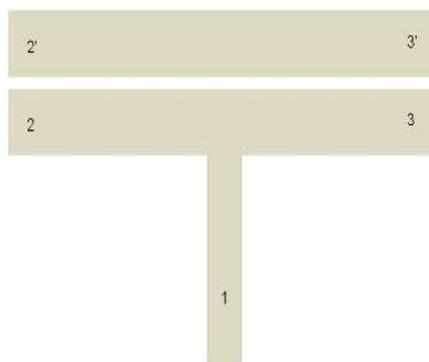


Figura 4.1.19. Esquema de la configuración T Rígida estudiada in situ.

Se observa en el esquema de la configuración de la unión T rígida que en el elemento doble se ha diferenciado entre los dos elementos simples que lo forman. En este caso se ha estudiado el camino 1-2 y 1-2', así como los caminos 1-3 y 1-3'. La masa por unidad de área del elemento simple es de  $100 \text{ kg/m}^2$ . Para los caminos 1-2 y 1-3 se ha considerado la masa por unidad de área del otro elemento que forma la unión de  $83,1 \text{ kg/m}^2$ , considerando que en estos caminos en la

transmisión de potencia acústica solo interviene uno de los dos elementos simples que forman el elemento doble.

La masa considerada para los caminos 1-2' y 1-3' ha sido de 166,2 kg/m<sup>2</sup>. Es la misma ecuación empírica la que describe los cuatro caminos

$$K_{empirico}(12 - 12' - 13 - 13') = 5,7 + 5,7 \times M^2 (dB) \quad (4.1.13)$$

En la figura 4.1.20 se puede observar el valor del índice de reducción vibracional experimental en función de la frecuencia de los caminos 1-2 y 1-3 (figura 4.1.20 a)), así como 1-2' y 1-3' (figura 4.1.20 b)). Esto son caminos simétricos a los que se supone el mismo comportamiento frente a la distribución de energía a través de ellos. Por lo tanto son descritos por las mismas ecuaciones empíricas, y tienen como resultado con un mismo valor del índice de reducción vibracional.

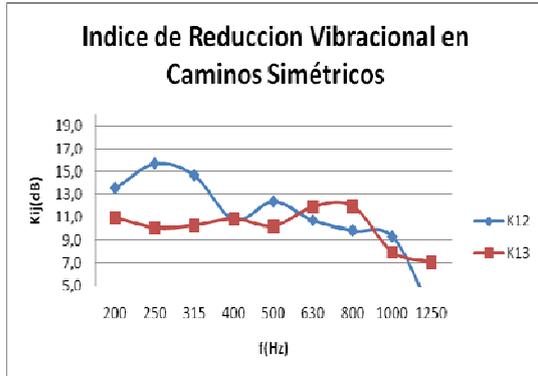


Figura 4.1.20 a) Valores de K<sub>12</sub> y K<sub>13</sub> para el esquema de la figura 4.1.26, en función de la frecuencia

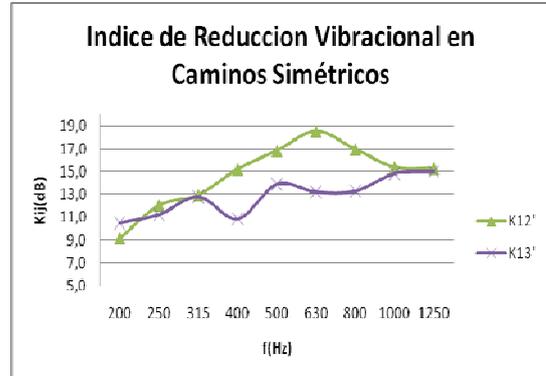


Figura 4.1.20 b) Valores de K<sub>12'</sub> y K<sub>13'</sub> para el esquema de la figura 4.1.26, en función de la frecuencia

En las figuras anteriores vemos una dependencia de los valores experimentales con la frecuencia, así como se observan diferencias notables, sobre todo en la figura 4.1.20 b), entre los caminos 1-2' y 1-3'. El comportamiento de caminos simétricos que se deduce del modelo descrito en la 12354-1 [UNE12354-1],

parece presentar desviaciones experimentalmente. Aunque el mismo modelo, dentro de sus limitaciones explica el comportamiento que observamos en la figura 4.1.20, el modelo descrito supone elementos en los que la dependencia con el índice de reducción vibracional con la frecuencia es similar. El modelo presenta desviaciones en aquellos casos en los que la dependencia con la frecuencia es notable.

En la figura 4.1.21 se observan los valores del índice de reducción de vibraciones experimentales para los caminos 1-2 y 1-2' (figura 4.1.21 a) y 1-3 y 1-3' (figura 4.1.21 b)). Caminos considerando la partición de doble hoja como masa simple (1-2 y 1-3) o masa doble (1-2' y 1-3'). En la figura 4.1.22 se comparan valores globales experimentales y valores globales empíricos, para las cuatro transmisiones estudiadas.

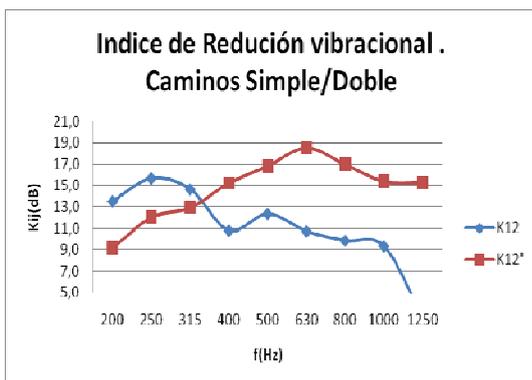


Figura 4.1.21 a) Valores de  $K_{12}$  y  $K_{12'}$  para el esquema de la figura 4.1.26, en función de la frecuencia

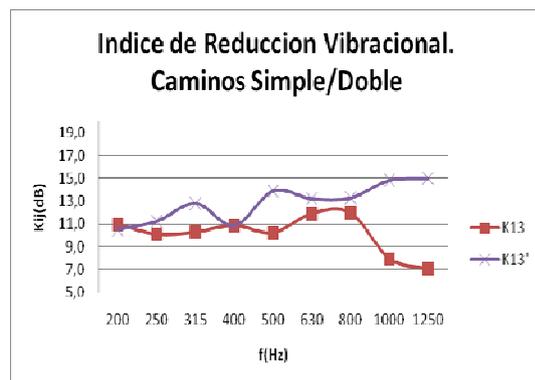


Figura 4.1.21 b) Valores de  $K_{13}$  y  $K_{13'}$  para el esquema de la figura 4.1.26, en función de la frecuencia

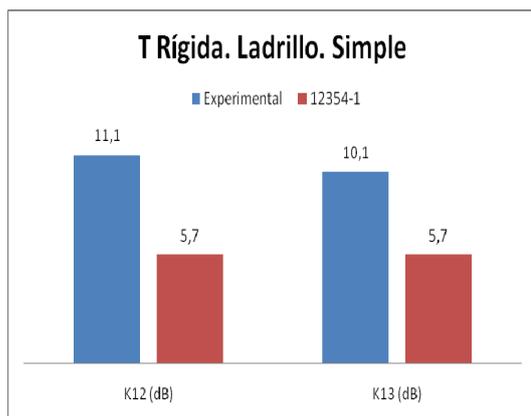


Figura 4.1.22 a) Elemento doble considerado como masa simple

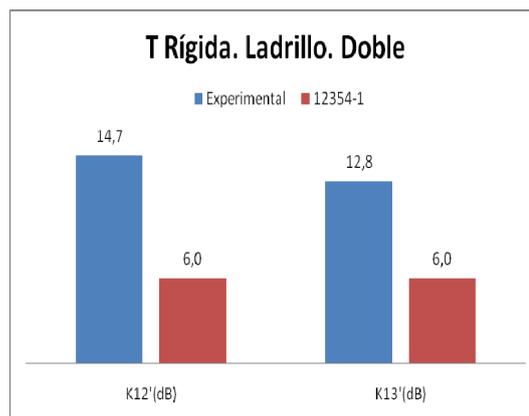


Figura 4.1.22 b) Elemento doble considerado como masa doble

Figura 4.1.22 Valores Globales experimentales y empíricos para el esquema de Unión T Rígida de la figura 4.1.19

En el modelo que se describe en 12354-1 [UNE12354-1] concretamente en uno de los anexos de esta normativa, especifica las diferentes caras de los elementos constructivos para obtener el índice de reducción de vibraciones en el caso de expresarlo a partir de las diferencias de niveles de velocidad. Para el estudio del camino i-j considera la cara no excitada del elemento i y la cara radiante del elemento estructural j. Con esto, los caminos descritos por la normativa serían para las configuraciones estudiadas 1-2' y 1-3', considerando la masa total de los dos elementos que forman el elemento constructivo doble.

Se observa en la figura 4.1.22 b) que las ecuaciones empíricas proporcionadas no se ajustan a los valores experimentales en estos caminos, así como tampoco en los caminos 1-2 y 1-3.

Para terminar este punto de resumen de las configuraciones en T rígida se presentan los resultados de otra unión rígida en T de elemento homogéneo doble con elemento homogéneo simple pero con revestimiento. Algunas especificaciones y las ecuaciones empíricas, tanto de elementos rígidos como de elementos rígidos con inserción de elemento flotante, que la describen, se muestran a continuación.

- Elemento simple: forjado con suelo flotante y pavimento de 30 cm, la masa de carga del forjado base de 350 kg/m<sup>2</sup>
- Elemento doble: panel enlucido por una de sus caras y ladrillo de gran formato LGF7, m=230 kg/m<sup>2</sup>

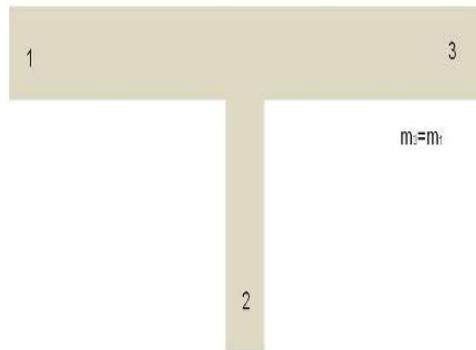


Figura 4.1.23

Las fórmulas empíricas para uniones rígidas como la del esquema de la figura 4.1.23 son las siguientes:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 (dB) \quad (4.1.14)$$

$$K_{12} = K_{21} = 5,7 + 5,7 \times M^2 (dB) \quad (4.1.15)$$

Las fórmulas empíricas para uniones con elementos flexibles de unión en T son :

$$K_{13} = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 + 2\Delta_1 (dB) \quad (4.1.16)$$

$$K_{12} = K_{21} = 5,7 + 5,7 \times M^2 + \Delta_1 (dB) \quad (4.1.17)$$

Los valores globales del índice de reducción vibracional para esta configuración, experimentales y empíricos, se muestran en la figura 4.1.24.

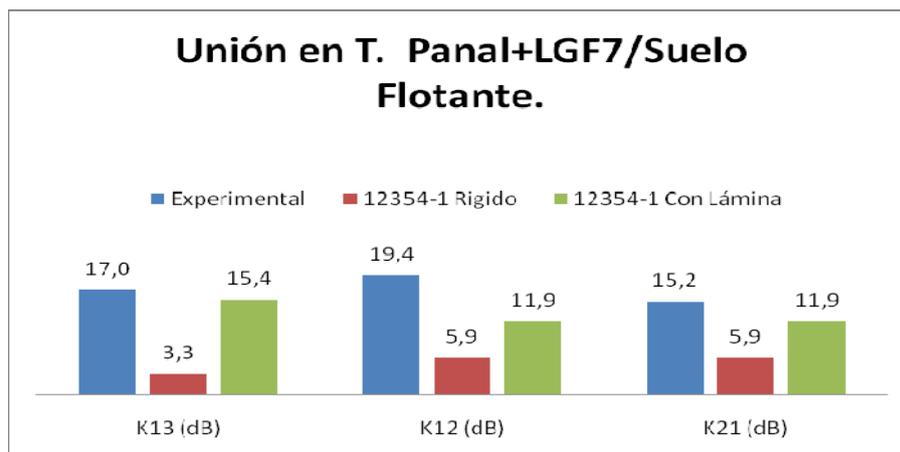


Figura 4.1.24 Valores Globales experimentales y empíricos para el esquema de Unión T Rígida de la figura 4.1.23

### c) Unión en Cruz Ligera

Se tiene la siguiente configuración en cruz:

- Medianeras de tabiquería seca de doble placa de yeso laminado (13+15) a cada lado y en un perfil de 63 mm, lana de roca en el interior. En el momento de las medidas, los tabiques están colocados sobre la capa de mortero a falta de colocar el acabado.
- Forjado de canto 30 cm con suelo flotante compuesto por una lámina de impacto de 5 mm de espesor y 5 cm de capa de mortero.

Se trata de una configuración de pared ligera de doble hoja y un forjado homogéneo pesado. En la figura 4.1.25 se puede observar un esquema de la configuración estudiada. Se enumeran a continuación algunos de los datos relevantes para el cálculos del índice de reducción vibracional;  $l_{ij}=l_{común}=5,5m$ ,  $S_{forjado}=20,8m^2$ ,  $S_{medianera}=15,0m^2$ ,  $m_{forjado}/m_{medianera}>3$ .

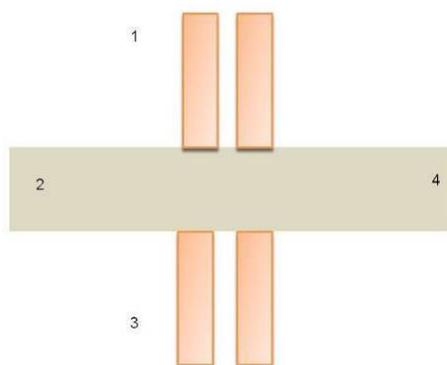


Figura 4.1.25. Esquema de la configuración de elementos ligeros de doble hoja con elemento homogéneo estudiada.

Se realizan ensayos en medianeras y forjados de la segunda y tercera planta de un edificio en fase avanzada de construcción. Las magnitudes ensayadas son del tiempo de reverberación estructural y los niveles de aceleración. Los equipos de medida ya han sido descritos en este punto cuando se han descrito los ensayos in situ, y las medidas han sido realizadas siguiendo el procedimiento descrito en 4.1.1.1 y 4.1.1.2 excepto en el caso de la evaluación del índice de reducción vibracional entre forjado y forjado.

En este caso no se han realizado mediciones de niveles de velocidad (aceleración) en ambos sentidos,  $i_j$ - $j_i$ , para después realizar el promediado. Se ha considerado la aproximación descrita en [Mar06] donde la diferencia entre valores de la diferencia de niveles de velocidad en un sentido y otro no son muy dispares. Esto conduce a lo que en el mismo trabajo denominan principio de reciprocidad y supone la igualdad  $K_{ij}=K_{ji}$ .

Los resultados de los ensayos del tiempo de reverberación estructural no han sido utilizados en los cálculos para obtener el índice de reducción de vibraciones ya que los valores de  $T_s$  experimentales en función de la frecuencia presentaban resultados incoherentes, sobre todo en el caso de las medianeras. En la figura 4.1.26 se pueden observar algunos ejemplos.



Figura 4.1.26 a)

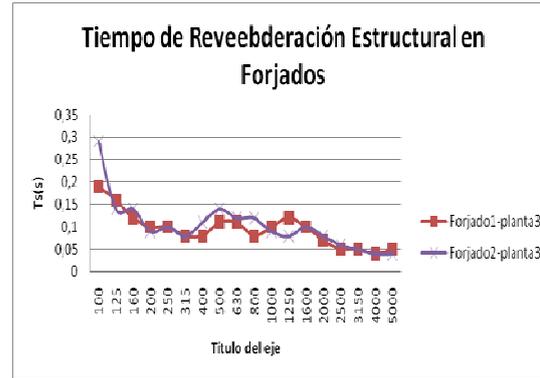


Figura 4.1.26 b)

Figura 4.1.26 Valores experimentales del tiempo de reverberación estructural en función de la frecuencia para medianeras (a) y forjados (b).

Se han estimado los valores de  $T_s$  a partir de diferentes propuestas que se dan en el procedimiento descrito en [UNE12354-1]. En el caso de las medianeras no ha sido necesario estimar el valor del tiempo de reverberación estructural, ya que se ha eliminado la dependencia de las longitudes de absorción equivalente con éste parámetro, aproximándolas a  $S/l_0$  con  $l_0=1m$ . Esta aproximación es válida tan solo bajo ciertas condiciones. Una de ellas es tener elementos ligeros de doble hoja, como el caso que nos ocupa en este apartado. En el caso de forjados la estimación ha sido en base a la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{tot}} \tag{4.1.18}$$

siendo  $\eta_{tot}$  el factor de pérdidas total. Este factor de pérdidas representa las contribuciones del factor de pérdidas interno del material,  $\eta_{int}$ , las pérdidas debidas a la radiación y las pérdidas debidas a las condiciones de contorno a las cuales está sometido el material por su situación estructural. Es posible aproximar el factor de pérdidas total considerando despreciable las pérdidas por radiación y un valor del factor de pérdidas interno de 0,01. Además esta aproximación solo es

válida para elementos con una densidad superficial,  $m'$ , en  $\text{kg/m}^2$ , por debajo de los  $800 \text{ kg/m}^2$ .

$$\eta_{tot} \approx 0,01 + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (4.1.19)$$

Se presentan resultados de valores globales del índice de reducción vibracional obtenidos como el promedio desde 200Hz hasta 1250 Hz, tal como se indica en [UNE10848-1]. Se comparan los valores obtenidos a partir de los ensayos y los valores a partir de las ecuaciones empíricas de la normativa pertinente [UNE12354-1]. Las ecuaciones 4.1.20 y 4.1.21 son las que se proporcionan en esta normativa. En la figura 4.1.27 se observan los resultados experimentales para forjado-forjado y forjado-medianera en el segundo y tercer piso, se comparan con los resultados empíricos.

$$K_{forjado-medianera} = 10 + 10 \times |M| - 3,3 \log\left(\frac{f}{500}\right) (dB) \quad (4.1.20)$$

$$K_{forjado-forjado} = 10 + 20 \times M - 3,3 \log\left(\frac{f}{500}\right) (dB) - \text{mínimo } 10dB \quad (4.1.21)$$

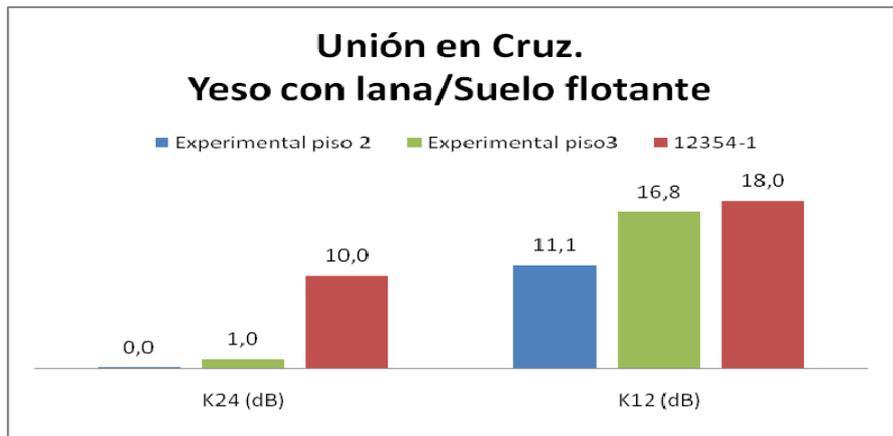


Figura 4.1.27 Valores Globales experimentales y empíricos para el esquema de Unión Cruz Ligera de la figura 4.1.25

Se presentan a continuación dos configuraciones de doble placa de yeso, la descripción y un esquema de las mismas se detallan a continuación.

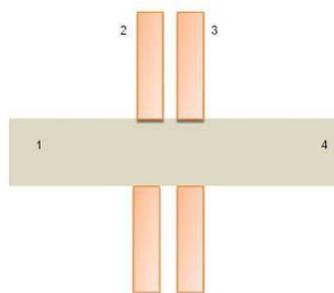


Figura 4.1.28 a)

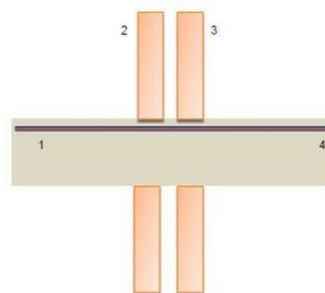


Figura 4.1.28 b)

Figura 4.1.28. Configuraciones en Cruz de dobles capas de yeso con elementos homogéneos.

Doble capa de yeso y un material de amortiguación de alta densidad, lana mineral dentro de la cavidad de 250 mm de espesor. Suelo flotante con 50 mm de mortero sobre forjado descubierto, figura 4.1.28 a).

Doble capa de yeso y un material de amortiguación de alta densidad, lana mineral dentro de la cavidad, de 250 mm de espesor. Suelo flotante con 50mm de mortero sobre piso laminado, figura 4.1.28 b).

Los caminos estudiados han sido 1-4; forjado-forjado, 1-3; forjado-medianera y 2-4; medianera-forjado. Para obtener los resultados entre forjado-medianera y medianera-forjado se ha supuesto el principio de reciprocidad descrito en [Mar06], y se ha calculado cada posibilidad de camino por separado, registrando las diferencias de niveles de velocidad solo en una dirección en cada caso. En esta campaña de ensayos, se ha obtenido a partir de las diferentes medidas del índice de reducción vibracional de cada camino el valor global tal y como se especifica en [UNE10848-1].

Una vez más se ha comparado este valor con el valor predicho por las expresiones empíricas que se dan en [UNE12354-1]. Las expresiones 4.1.22 y 4.1.23 son estas fórmulas empíricas para los diferentes caminos y la figura 4.1.29 muestra los valores medios medidos y los valores empíricos para las configuraciones a) y b).

$$K_{\text{forjado-forjado}} = 3,0 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ (dB)} \quad (4.1.22)$$

$$K_{\text{forjado-medianera}} = K_{\text{medianera-forjado}} = 10 + 10 \times |M| - 3,3 \log\left(\frac{f}{500}\right) \text{ (dB)} \quad (4.1.23)$$

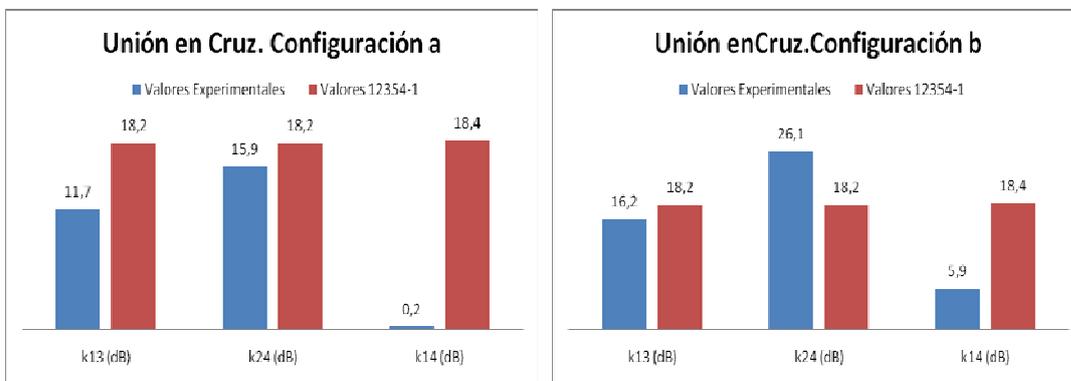


Figura 4.1.29 a)

Figura 4.1.29 b)

Figura 4.1.29. Valores globales experimentales y según ecuaciones empíricas para los diferentes caminos estudiados de la configuración a) y b).

#### d) Unión en T Ligera

Se presenta en la figura 4.1.30 un esquema de la configuración estudiada: unión continua rígida en T de elemento entramado autoportante simple con elemento homogéneo simple con revestimiento (techo). También se adjunta una breve descripción de los elementos que la componen y ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de dicha configuración. Se comparan los resultados de estas ecuaciones con los valores globales experimentales (figura 4.1.31).

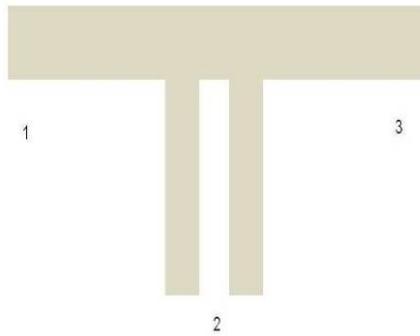


Figura 4.1.30 Esquema y características de unión T Ligera

Elemento simple: forjado (techo) con suelo flotante y pavimento, 30 cm, la masa de carga del forjado base de  $m=350 \text{ kg/m}^2$ . Elemento autoportante: entramado simple,  $m=25 \text{ kg/m}^2$ .

Predicción de fórmulas empíricas:

$$K_{13} = 3,0 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ (dB)} \tag{4.1.24}$$

$$K_{12} = K_{21} = 10,0 + 10,0 \times |M| - 3,3 \log\left(\frac{f}{500}\right) \text{ (dB)} \tag{4.1.25}$$

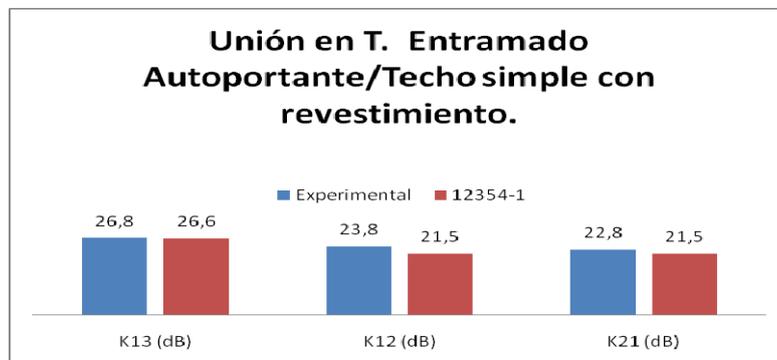


Figura 4.1.31. Valores globales experimentales y según ecuaciones empíricas para los diferentes caminos estudiados de la configuración que del esquema de la figura 4.1.37.

Una vez comparadas todas las transmisiones estudiadas in situ de las diferentes configuraciones con los valores que para cada caso en particular nos ofrecen las ecuaciones empíricas de la Norma UNE EN 12354-1:2000 realizamos los comentarios sobre estas comparaciones.

En el caso de la configuración en cruz rígida se han realizado ensayos in situ en un edificio y sobre una maqueta de ensayo de hormigón. Los ensayos han sido realizados, en todo caso, siguiendo en la medida de lo posible el procedimiento que se describe en la Norma 10848-1:2007, aunque sabemos que este procedimiento se refiere a la situación normalizada de laboratorio. Como se puede observar en las figuras 4.1.4 y 4.1.12 tanto en el caso del edificio real como de la maqueta de ensayo los valores del índice de reducción vibracional son superiores a los valores que se obtienen a partir de las ecuaciones empíricas. Esta diferencia es bastante más notable en el caso de la maqueta, aunque ésta nos ha servido para poder estudiar de forma controlada cada una de las magnitudes que afectan al cálculo del índice de reducción de vibraciones. A partir de ella se han obtenido algunas conclusiones, como por ejemplo, que las posibles limitaciones que presente el procedimiento de medida debido a las condiciones de contorno son más fuertes en la unión de ambos elementos constructivos que en los límites de éstos, como se podrá observar en el siguiente capítulo.

Para el estudio de la unión en T rígida, las figuras 4.1.18 y 4.1.22 nos muestran los resultados para la misma maqueta de hormigón y para una unión de una edificación, respectivamente. Una vez más, al igual que en el caso de la unión en cruz, los valores del índice de reducción que se obtienen a partir de los ensayos son superiores a los que ofrecen las ecuaciones empíricas.

En el caso del estudio de la maqueta, tanto la configuración en cruz como en T, la mayor diferencia entre ensayos y valores empíricos se obtiene en la transmisión en la que las masas por unidad de área implicadas son distintas. En el caso del estudio de edificaciones las diferencias entre valores ensayados y empíricos es bastante menor en el caso de la configuración en cruz.

En cuanto a configuraciones ligeras, en el caso de la unión en cruz, en la figura 4.1.27 se observa una diferencia de 10dB entre los ensayos y los valores empíricos, para el caso de la transmisión forjado-forjado. Destacar que en este caso la ecuación empírica que representa esta transmisión marca un mínimo de 10dB (expresión 4.1.21). En el resto de transmisiones estudiadas en esta configuración las diferencias no son tan notables, siendo mayores los valores del índice de reducción de vibraciones que se obtiene a partir de las predicciones empíricas.

Por último se ha estudiado un techo homogéneo con elemento autoportante para representar la unión en T ligera. En este caso los valores que se obtienen a partir de ensayos y los que se obtienen a partir de ecuaciones empíricas son muy semejantes para todas las transmisiones estudiadas, figura 4.1.31.

#### 4.1.4 Incertidumbre en la medida

Para facilitar el seguimiento de este punto se ha decidido reproducir las expresiones (2.2.12) y (2.2.13), expresiones que describen el índice de reducción de vibraciones:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \text{ (dB)} \quad (4.1.26)$$

Y la ecuación que describe el área de absorción equivalente,

$$a = \frac{2.2 \cdot \pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (4.1.27)$$

Se puede observar que el valor del índice de reducción vibracional depende de cuatro parámetros en función de la configuración que se estudie:

- la diferencia de niveles de velocidad entre los elementos de la unión.
- la longitud común de la unión entre los elementos.
- las áreas de las superficies de los elementos de la unión
- el tiempo de reverberación estructural de los elementos

De estas cuatro magnitudes, tan solo la diferencia de niveles de velocidad y el tiempo de reverberación estructural son obtenidos a partir del seguimiento de un protocolo de mediciones, más o menos complejo y laborioso.

El primer sumando de la expresión (4.1.26) es el de mayor relevancia en la determinación del índice de reducción de vibraciones, siendo el segundo sumando una corrección que depende de las propiedades de los elementos a estudiar. De este segundo término, observando la ecuación, los parámetros influyen de la siguiente manera:

$$10 \log l_{ij} \quad ; \quad -10 \lg \sqrt{S} \quad ; \quad 10 \lg \sqrt{T_s}$$

Por lo tanto, en este punto, para estudiar la incertidumbre en la obtención del índice de reducción vibracional se describirá por separado, la incertidumbre asociada a la medición de la diferencia de niveles de velocidad y la incertidumbre asociada a la medición o estimación del tiempo de reverberación estructural.

Como hemos anticipado, el promedio de la diferencia de niveles de velocidad es el parámetro de mayor relevancia en la determinación de la transmisión por flancos. En la figura 4.1.32 se observan cuatro casos de los muchos estudiados para la realización de esta memoria de tesis doctoral, donde se compara para cuatro configuraciones distintas los valores de las diferencias de niveles promediadas, que es el primer sumando de la expresión (4.1.26), con los valores que se obtienen al sumar el segundo término, es decir, con los valores del índice de reducción de vibraciones.

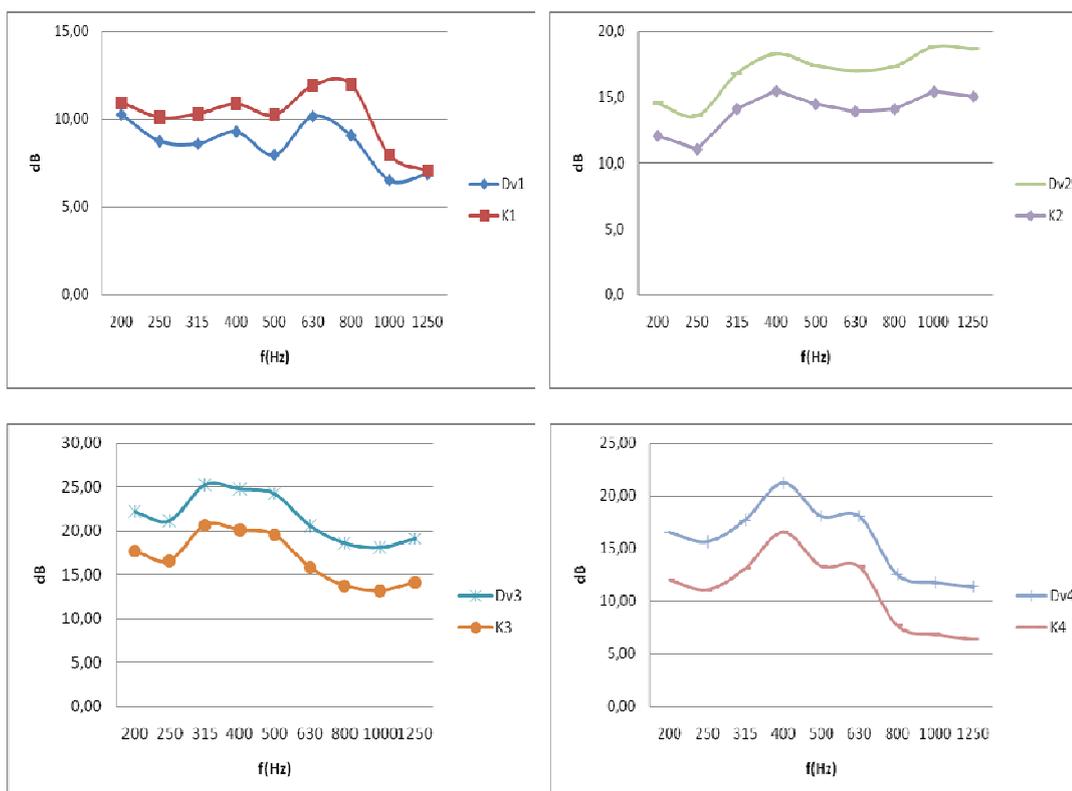


Figura 4.1.32 Diferencia de niveles de velocidad promediados y valores del índice de reducción vibracional asociados para cuatro configuraciones distintas

En este apartado se describen dos análisis de la incertidumbre asociada a la medición de la diferencia de niveles de velocidad. Se pretende obtener un valor representativo de la distribución de energía entre los dos elementos a estudio midiendo esta magnitud. Para ello se toman registros de la vibración en diferentes puntos. Así pues, el primero de los análisis [Rey08] estudia los intervalos de confianza asociados al número de mediciones, desde un punto de vista meramente estadístico, considerando los niveles de velocidad como poblaciones y estudiando sus medias y varianzas muestrales.

Para cada valor de la frecuencia tenemos dos muestras, que corresponden a las dos direcciones, (con  $a$  y  $b$  denotamos las direcciones  $i$  y  $j$  respectivamente),  $D_{j,f}^a$  y  $D_{j,f}^b$ ,  $j=1,2,\dots,n$ , siendo  $n$  el tamaño de la muestra.

Predicción del aislamiento acústico "in situ"

Las medias muestrales de estas poblaciones se calculan como:

$$D_f^a = \frac{\sum_{j=1}^n D_{j,f}^a}{n}, D_f^b = \frac{\sum_{j=1}^n D_{j,f}^b}{n} \quad (4.1.28)$$

Y las varianzas:

$$(S_{n-1,f}^a)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (D_{k,f}^a - D_f^a)^2}{n-1} \quad (S_{n-1,f}^b)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (D_{k,f}^b - D_f^b)^2}{n-1} \quad (4.1.29)$$

Se consideran como incertidumbre de las medidas, los valores

$$S_f^a = \frac{S_{n-1,f}^a}{\sqrt{n}} \quad S_f^b = \frac{S_{n-1,f}^b}{\sqrt{n}} \quad (4.1.30)$$

Calculamos, para cada frecuencia  $f$ , el valor medio debido a las dos direcciones, tal y como se indica en la normativa correspondiente:

$$D_f = \frac{D_f^a + D_f^b}{2} \quad (4.1.31)$$

Este valor es combinación lineal de dos variables, por lo que la varianza correspondiente será:

$$(S_f)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 (S_f^a)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 (S_f^b)^2 \tag{4.1.32}$$

Es decir, una medida de la incertidumbre para cada valor  $D_f$ , vendrá dado por:

$$S_f = \frac{\sqrt{(S_f^a)^2 + (S_f^b)^2}}{2} \tag{4.1.33}$$

Se presentan valores de las medias de las diferencias de niveles de velocidad según normativa y de las incertidumbres asociadas a estas medidas ( $D_v \pm \Delta D_v$ ) o lo que es lo mismo, ( $D_f \pm S_f$ ), si se realizan muestras de 3, 5 y 7 pares de registros. Estas mediciones han sido realizadas entre los laboratorios de acústica y física de la Escuela Superior Politécnica de Gandía.

La configuración 1-3 se refiere al camino forjado-forjado, las configuraciones 2-3 y 2'-1 representan las transmisiones medianera-forjado, entre los diferentes laboratorios (acústica-física y física-acústica respectivamente). En las figuras 4.1.33, 4.1.34 y 4.1.35 se pueden observar los valores medios y las incertidumbres asociadas para 3, 5 o 7 pares de puntos de registro.

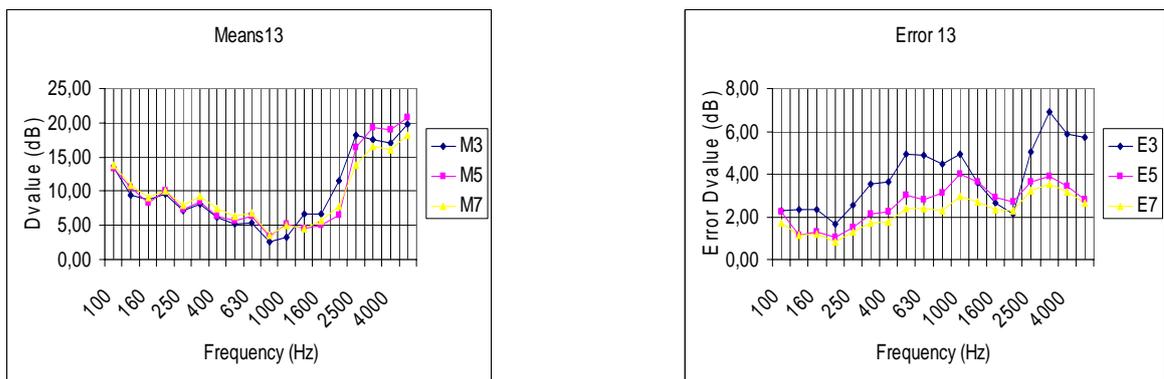


Figura 4.1.33 Valores de las diferencias de niveles de velocidad obtenidas para la configuración forjado-forjado si se realizan, 3, 5 o 7 pares de registros, con el error asociado a estas mediciones.

Predicción del aislamiento acústico "in situ"

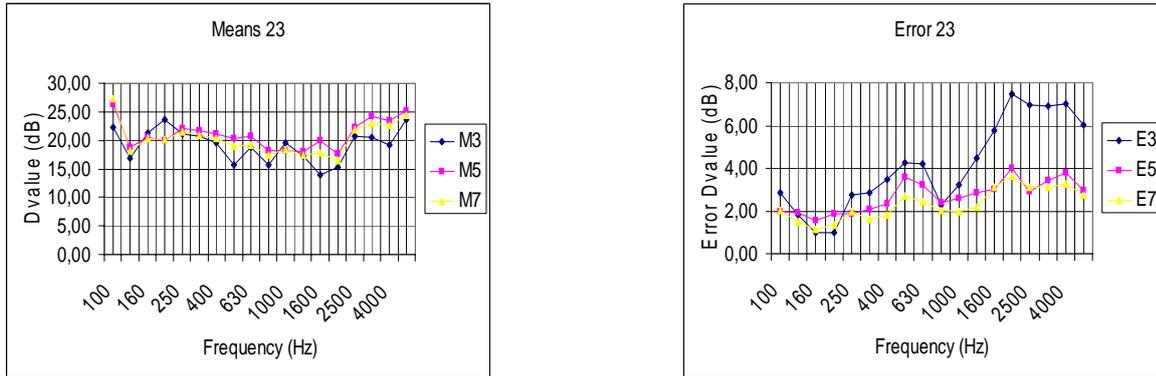


Figura 4.1.34 Valores de las diferencias de niveles de velocidad obtenidas para la configuración medianera-forjado en laboratorio de física, si se realizan, 3 ,5 o 7 pares de registros, con el error asociado a estas mediciones.

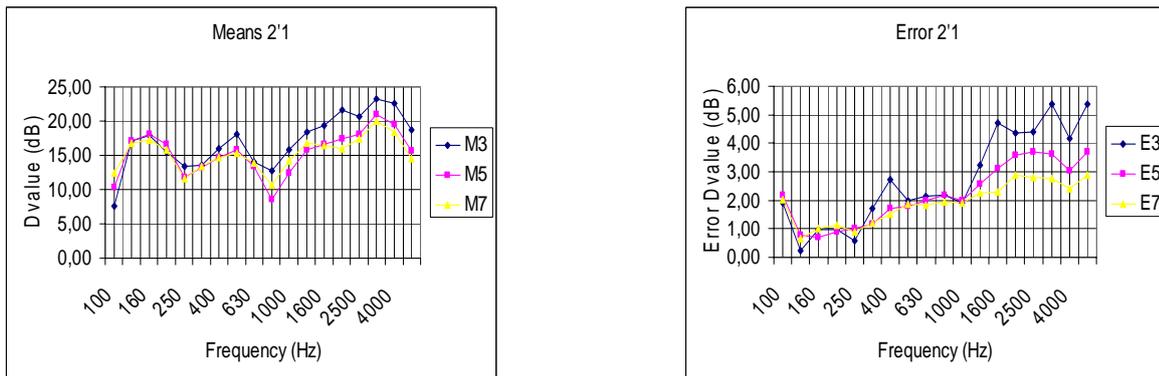


Figura 4.1.35 Valores de las diferencias de niveles de velocidad obtenidas para la configuración medianera-forjado en laboratorio de acústica, si se realizan, 3 ,5 o 7 pares de registros, con el error asociado a estas mediciones.

Como se puede observar, hay una clara tendencia a la disminución del error en función del número de muestras, aunque esta disminución no es homogénea, siendo más sensible a unas frecuencias que a otras.

Se ha estudiado también el valor global del índice de reducción vibracional. Gracias a la teoría de errores y suponiendo el segundo término de la expresión (4.1.26) constante, podemos identificar el error relativo medio del índice de reducción vibracional como el error relativo medio de la diferencia de velocidades:

$$\frac{\Delta K_{ij}}{K_{ij}} = \frac{\Delta D_{v,ij}}{D_{v,ij}} \quad (4.1.34)$$

Se presentan los resultados de estas estimaciones para las configuraciones 2-3 y 2'-1, tanto en el caso de 3, 5 y 7 pares de puntos de registro.

Número pares de medida	$\frac{\Delta D_{v,ij}}{D_{v,ij}}$	
	Configuración 23	Configuración 2'1
3	3,2 dB	2,3 dB
5	2,5 dB	2,0 dB
7	2,0 dB	1,6 dB

Tabla 4.1.1- Errores relativos medios de valores globales. Para las configuraciones 23 y 2'1.

Se puede observar en la tabla 4.1.1 que tan solo en uno de los casos el error medio relativo del valor global apenas supera los 3 dB.

También se ha estudiado la influencia de la elección de la muestra en el valor de la incertidumbre de la diferencia de niveles de velocidad. En construcciones reales, existen diversas posibilidades de puntos de medidas, todos ellos válidos según normativa, siempre y cuando se mantengan las distancias y se realice la distribución adecuada. Se presentan valores de valores medios e incertidumbres

de la diferencia de niveles de velocidad si se consideran para un mismo caso de estudio (configuración y dirección) diferentes puntos de muestreo, en las figuras 4.1.36 a 4.1.38, para el caso de poblaciones de 3 y 5 pares de muestras. En cada uno de los casos se estudia la influencia en el valor medio como en la desviación cometida al escoger diferentes muestras de medidas.

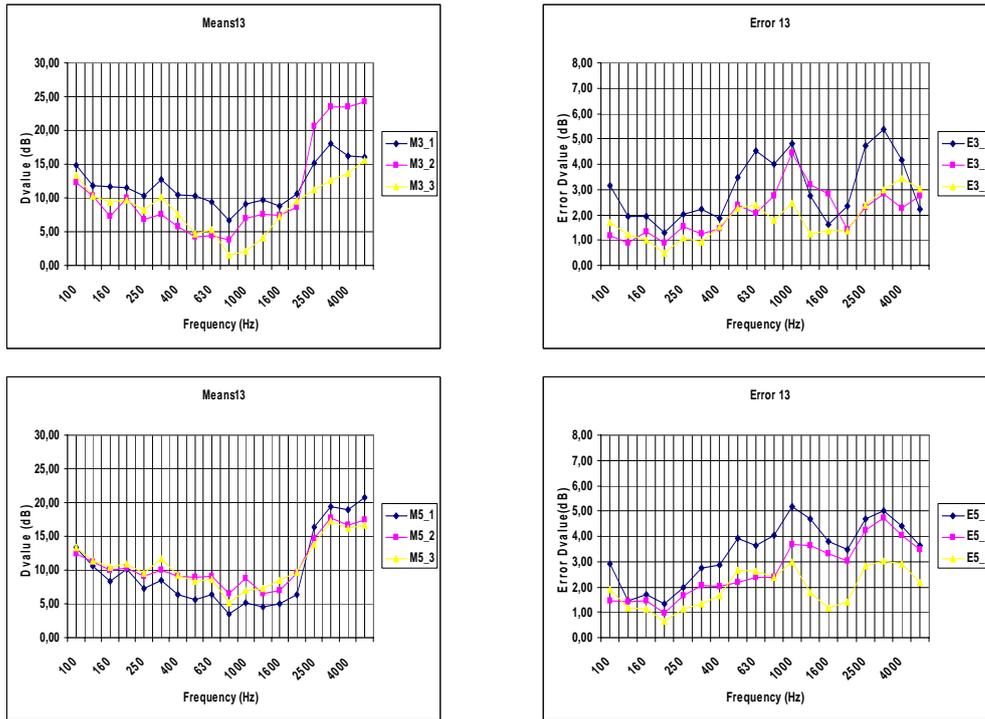


Figura 4.1.36. Valores de las diferencias de niveles de velocidad obtenidas y el error asociado para la configuración medianera-medianera, si se realizan 3 o 5 pares de mediciones (gráficas superior y inferior respectivamente) y si se escogen diferentes poblaciones.

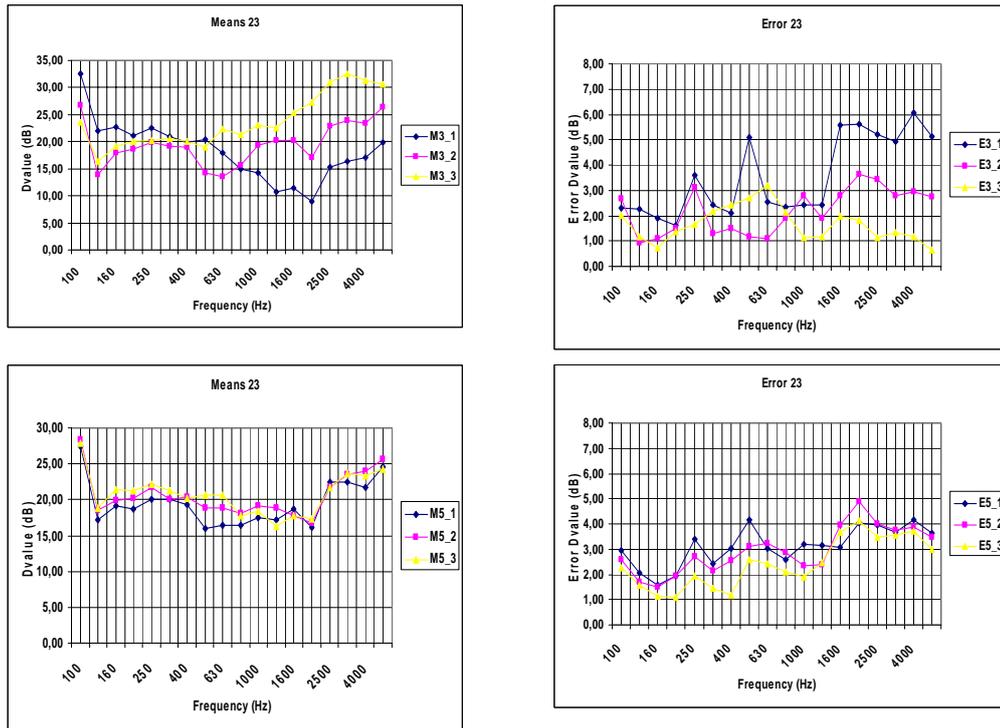


Figura 4.1.37 Valores de las diferencias del nivel de velocidad obtenidas y el error asociado para la configuración medianera-forjado, si se realizan 3 o 5 pares de mediciones (gráficas superior y inferior respectivamente) y si se eligen diferentes poblaciones de puntos de medida.

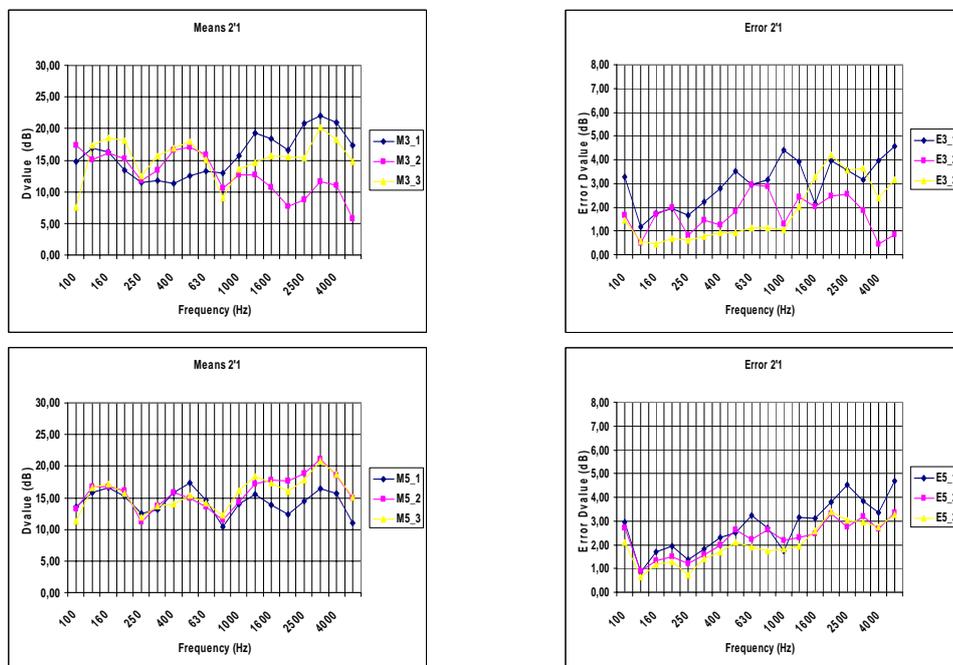


Figura 4.1.38 Valores de las diferencias de nivel de velocidad obtenidas para la configuración medianera-forjado, si se realizan 3 o 5 pares de mediciones (gráficas superior y inferior respectivamente) y si se eligen diferentes poblaciones de puntos de medida.

Como se puede observar, la agrupación por pares de 3 y 5 puntos no asegura la reducción del error por completo. Las diferentes agrupaciones de puntos de ensayo, han dado desviaciones diferentes, si bien parece que en el caso de los pares de 5 mediciones la desviación presenta menos altibajos en su distribución.

En el segundo análisis sobre la influencia de la indeterminación del primer término de la ecuación (4.1.26) se estudia la influencia del número de puntos escogidos para la medida, desde el punto de vista de la exactitud como método de ensayo, estudiando los datos desde la filosofía de the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [Rey09]. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, publicada por la Organización Internacional de Normalización, proporciona una metodología para el análisis y medición de la incertidumbre en la medición, que quedará reflejada en la presentación de informes, y que puede aplicarse en la mayoría de los campos de las mediciones de la física. Mediante el método GUM hablamos de incertidumbre en la medida, y cabe distinguir entre la base de la ISO 5725-1:1997 [ISO5725] que es la precisión en la medida. Una descripción breve del método GUM se puede observar en la tabla 4.1.2

	<b>GUM</b> <b>Incertidumbre</b>
Magnitud	Debe poder ser medida directamente
Para el tratamiento de datos	No hay diseño experimental estadístico
El modelo se basa	$Y = f(X_1 X_2 \dots X_n)$
La variabilidad de la magnitud	Incertidumbre Estándar Combinada: $u_c^2(y)$
Intervalo de confianza	$y \pm U_p$

Tabla 4.1.2 Método GUM

El primer paso es identificar la variable a estudio y su relación con las cantidades de entrada ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ). El siguiente paso es identificar todas las fuentes de incertidumbre, cada una de estas fuentes puede afectar a nuestra variable de forma diferente, por eso se definen unos "pesos",  $c_i$ , asociados a cada componente de entrada y que se definen como la derivada parcial de la variable respecto a la cantidad de entrada  $X_i$ . La incertidumbre estándar combinada se calcula:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(X_i)} \quad (4.1.35)$$

Mediante el método GUM se puede dar un alto nivel de confianza, multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura,  $k$ .  $U = k u_c(y)$ . Si  $k = 2$ , el intervalo de confianza es del 95%.

Como variables de entrada,  $X_i$  se han considerado las magnitudes medidas directamente con acelerómetro, las velocidades. De este modo son 4 las variables de entrada: Velocidad en  $i$  excitando en  $i$ , velocidad en  $j$  excitando en  $i$ , velocidad en  $i$  excitando en  $j$ , velocidad en  $j$  excitando en  $j$ . ( $i, j$  representan los diferentes elementos de transmisión, por ejemplo, medianera y forjado).

Considerando estas 4 variables de entrada la incertidumbre asociada a la medida es muy grande, tanto para 3, 5 como 7 pares de puntos de medida, por lo tanto, corroboramos la necesidad de medir simultáneamente la velocidad en ambos elementos de unión. Considerando que se miden simultáneamente dos de las cuatro variables descritas anteriormente (por ejemplo, velocidad en  $i$  excitando en  $i$  y velocidad en  $j$  excitando en  $i$ ) y que la normativa habla de pares de puntos de medida. Se considera oportuno tomar como variables de entrada las diferencias de velocidades. Con esto serian dos las  $X_i$ : (Velocidad en  $j$  – Velocidad en  $i$ ) excitando en  $i$ , (Velocidad en  $i$  – Velocidad en  $j$ ) excitando en  $j$ .

La diferencia en el valor de la incertidumbre considerando 4 valores de entrada o 2 valores de entrada (medición simultánea), para 5 pares de puntos de medida se puede observar en la figura 4.1.39.

Predicción del aislamiento acústico "in situ"

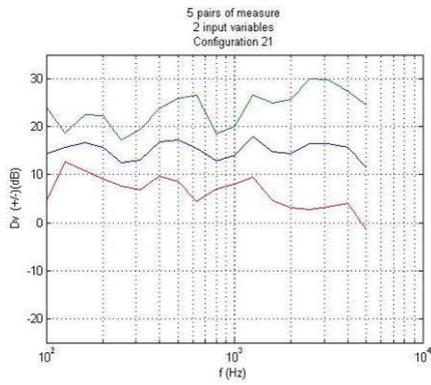


Figura 4.1.39 a)

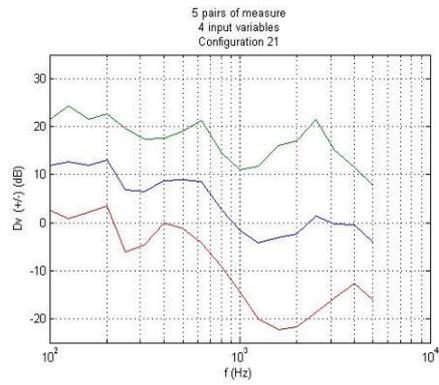


Figura 4.1.39 b)

Figura 4.1.39 Intervalo de confianza en las medidas de las diferencias de niveles de velocidad si se consideran 2 (4.1.39.a) o 4 (4.1.39.b) los valores de entrada, para 5 pares de puntos de medida.

Los resultados para 3, 5 o 7 pares de puntos de medida y 2 variables de entrada se observan en las siguientes figuras:

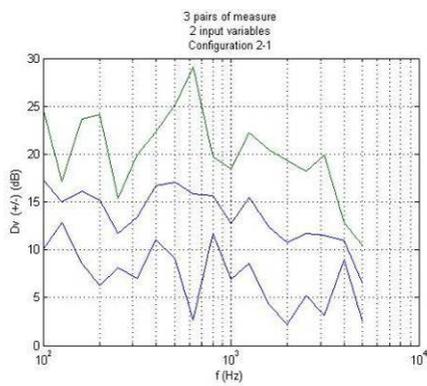


Figura 4.1.40 aa)

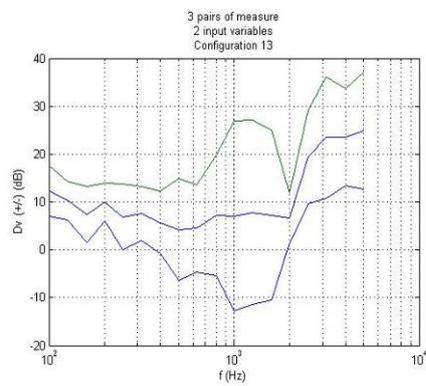


Figura 4.1.40 ab)

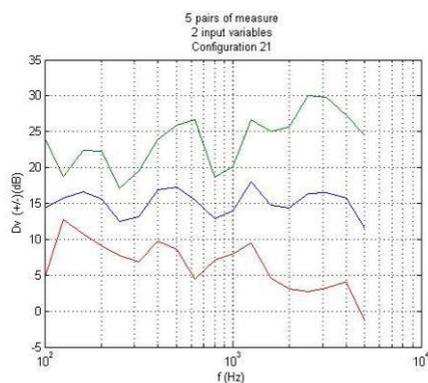


Figura 4.1.40 ba)

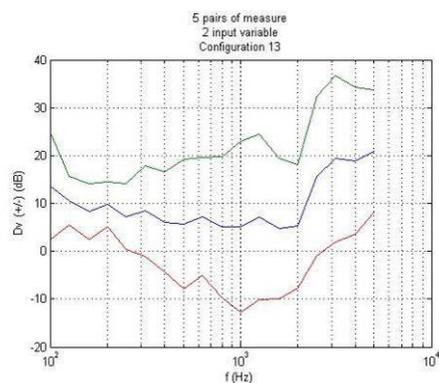


Figura 4.1.40 bb)

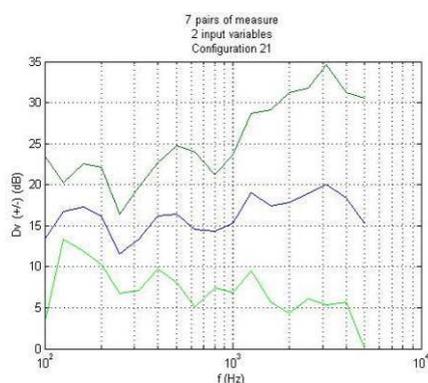


Figura 4.1.40 ca)

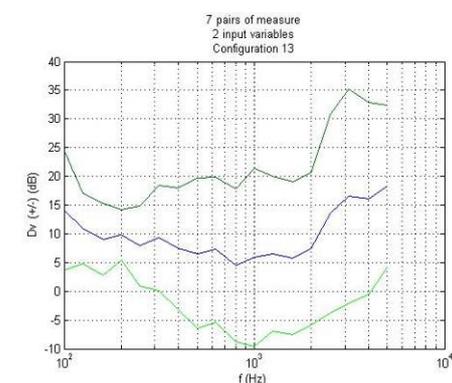


Figura 4.1.40 cb)

Figura 4.1.40 Intervalos de confianza en las diferencias de niveles de velocidades para 3 (figuras aa) y ab)), 5 (figuras ba) y bb)) y 7 (figuras ca) y cb)) pares de puntos de medida, para 2 configuraciones distintas.

Estudiando desde dos puntos de vista distintos la indeterminación en la medida de la diferencia de niveles de velocidad, que afectará a la indeterminación en el índice de reducción de vibraciones, parece que, como es lógico, al aumentar el número de pares de puntos de medida se reduce el error asociado a la medida (figuras 4.1.33, 4.1.34 y 4.1.35). Sin embargo esta reducción no es gradual, reduciéndose bastante en los valores extremos del espectro en frecuencias y menos, en las bandas centrales.

Estudiando las medidas desde el punto de vista del método GUM no se observa una reducción del intervalo de confianza (mejora de la incertidumbre) al pasar de 3 a 5 o 7 pares de medida. Esto se puede observar en las figuras 4.1.40 donde se muestran los valores de la diferencia de velocidades y su intervalo de confianza

para dos de las configuraciones estudiadas. Si se observa una reducción en el valor de la incertidumbre si como variables de entrada reducimos el valor de 4 a 2, figura 4.1.39.

La influencia del segundo término de la ecuación (4.1.26) vendrá determinada, como se ha detallado anteriormente, por la longitud común de la unión entre los dos elementos, las superficies de éstos y el tiempo de reverberación estructural. En el apartado 4.1.2 se ha detallado el procedimiento de medida para el tiempo de reverberación estructural siguiendo en la medida de lo posible lo descrito en [UNE10848-1].

En muchos casos, para la obtención del índice de reducción vibracional se permite utilizar un tiempo de reverberación estructural estimado. Esto es posible para los dos modelos que se describen en [UNE12343-1], tanto el modelo detallado como el modelo simplificado. Para el modelo detallado se prefieren mediciones normalizadas de laboratorio como datos de entrada. Sin embargo, también permite otras alternativas de obtener esta información, como a partir de datos teóricos, estimaciones empíricas o a partir de resultados de mediciones in situ. Para el modelo simplificado, en los casos en que el índice de reducción vibraciones presenta una variación con la frecuencia, entre 200 y 1250Hz (sobretudo elementos dobles y elementos ligeros), permite no realizar ensayos de  $T_s$  y tomar la longitud del área equivalente como el área del elemento, o tomar como buena aproximación el valor que se tiene a 500Hz.

Se ha querido estudiar esta última aproximación. En la figura 4.1.41 podemos ver los tiempos de reverberación estructurales para elementos dobles, figura 4.1.41 a), o para elementos ligeros , 4.1.41 b), a 500Hz o como promedio de los valores entre 200Hz y 1250Hz.

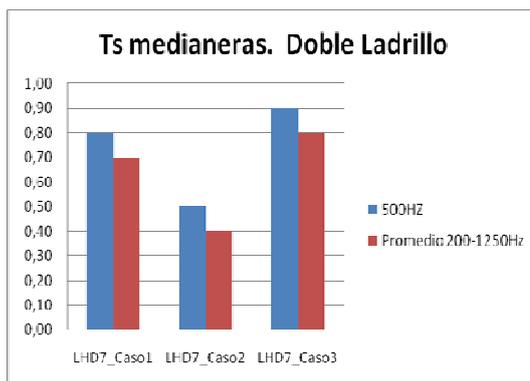


Figura 4.1.41 a)

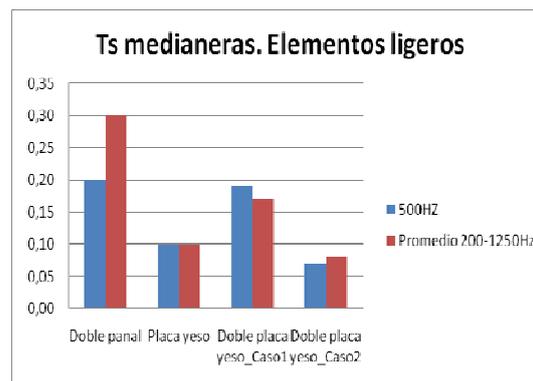


Figura 4.1.41 b)

Figura 4.1.41 Tiempo de Reverberación Estructural (s) para elementos dobles o ligeros, comparación del promedio medido y de la aproximación a 500Hz.

De la figura 4.1.41 se puede concluir que la aproximación de tomar el valor de entrada de  $T_s$  como el valor a 500Hz, al menos para elementos dobles y elementos ligeros, es una buena estimación, ya que la mayor diferencia que se ha encontrado es de 0,1s (desviación del 10%).

Además de ser necesario conocer el valor de  $T_s$  para todas las frecuencias centrales desde 200 hasta 1250Hz para poder obtener el segundo término de la expresión del índice de reducción vibracional, existe un cociente de interés en la estimación del aislamiento acústico en los edificios, este es  $\frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}}$ , siendo  $T_{s,situ}$  el tiempo de reverberación estructural medido in situ y  $T_{s,lab}$  el tiempo de reverberación estructural normalizado y obtenido en laboratorio. Este cociente es necesario para las correcciones de algunas magnitudes in situ que se obtienen a partir del valor que presentan en laboratorio. Tan solo en los elementos que se enumeran a continuación  $T_{s,situ}$  puede considerarse como  $T_{s,lab}$  con un término corrector de 0dB:

- elementos ligeros de doble hoja.
- elementos con un factor de pérdidas interno mayor que 0,03.
- elementos muchos más ligeros que los elementos que lo rodean (por un factor de al menos 3).

- elementos que no estén firmemente conectados a los elementos estructurales circundantes.

Para el resto de construcciones, en uno de los Anexos de [UNE12354-1] se dan expresiones y estimaciones para obtener el tiempo de reverberación estructural de un elemento. En general, este se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{total}} \quad (4.1.36)$$

Siendo  $f$  la frecuencia central de la banda considerada y  $\eta_{total}$  el factor de pérdidas total. Este tiene en cuenta el factor de pérdidas interno del material,  $\eta_{int}$ , las pérdidas por radiación y las pérdidas debidas a la condiciones de conectividad del elemento.

Dice el mismo anexo, que el factor de pérdidas internas para los elementos constructivos homogéneos habituales es aproximadamente de 0,01, que las pérdidas por radiación generalmente pueden despreciarse, y que el término asociado a las condiciones de fijación depende de cada caso en particular.

Éste último término se obtiene a partir del coeficiente de absorción para ondas de flexión ( $\alpha_k$ ; coeficiente de absorción para ondas de flexión en el perímetro  $k$ ), que según la normativa se puede obtener en situación de campo (in situ) a partir del índice de reducción vibracional. Se llega así a un camino con difícil salida, ya que necesitamos conocer el tiempo de reverberación estructural in situ para obtener el índice de reducción de vibraciones, y es necesario el índice de reducción de vibraciones para obtener el tiempo de reverberación estructural. En el caso de no realizar mediciones de  $T_s$ , es posible estimar éste a partir del índice de reducción de vibraciones.

Para la situación en laboratorio, se da una expresión para estimar el factor de pérdidas total, y a partir de éste, según la expresión (4.1.36) el tiempo de reverberación estructural. La expresión es la siguiente:

$$\eta_{int,lab} \approx \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \tag{4.1.37}$$

Esta expresión es válida para elementos estructurales con una densidad superficial por debajo de 800 kg/m<sup>2</sup>.

Se ha estudiado, para el caso de la maqueta de hormigón descrita en el punto 4.1.3 la estimación del tiempo de reverberación estructural con la expresión (4.1.36) tanto para forjados como para medianeras. En la figura 4.1.42 podemos observar, en el caso de medianeras, los valores del tiempo de reverberación estructural, en segundos, medido in situ, tal y como se ha descrito en 4.1.2 y estimado según la ecuación (4.1.36), considerando un valor de factor de pérdidas interno de 0,01, tal y como se permite en la normativa, y de 0,002. Lo mismo pero para forjados se aprecia en la figura 4.1.43.

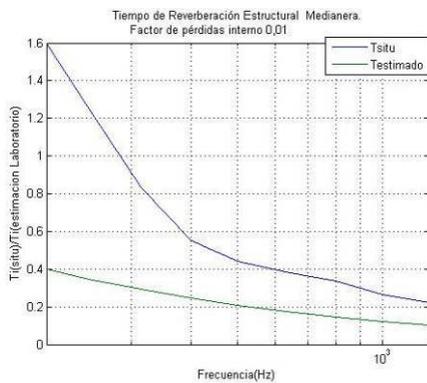


Figura 4.1.42 a)

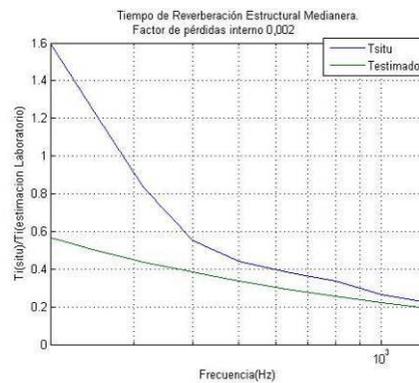


Figura 4.1.42 b)

Figura 4.1.42 Tiempo de Reverberación estructural para medianera de la maqueta de hormigón, medido in situ y estimado, considerando para este caso factor de pérdidas de 0,01 (a) y 0,002 (b).

Predicción del aislamiento acústico "in situ"

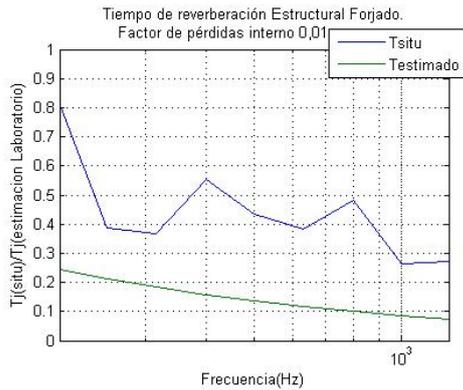


Figura 4.1.43 a)

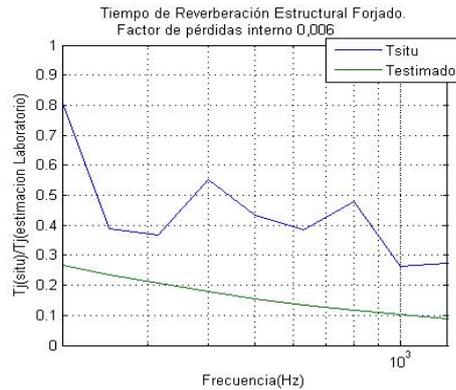


Figura 4.1.43 b)

Figura 4.1.43 Tiempo de Reverberación estructural para forjados de la maqueta de hormigón, medido in situ y estimado, considerando en este caso factor de pérdidas de 0,01 (a) y 0,006 (b)

Se observa que el considerar el factor de pérdidas de 0,01 y la expresión (4.1.36) siempre se estima a la baja el valor del tiempo de reverberación estructural, siendo esta diferencia bastante importante a bajas frecuencias (diferencias de hasta un 75% para el caso de las medianeras estudiadas). En el caso de forjados, figura 4.1.43, esta diferencia no disminuye al aumentar la frecuencia. Se ha estudiado la influencia de la diferencia entre  $T_{situ}$  y  $T_{estimado}$  al disminuir el valor del factor de pérdidas interno. En algunos casos (figura 4.1.42 b) parece que podemos acercarnos con la estimación al valor real medido.

Se ha estudiado también la influencia con el valor global del índice de reducción vibracional. Gracias a la teoría de errores y suponiendo, en este caso, el primer término de la expresión (4.1.26) constante, podemos identificar el error relativo medio del índice de reducción vibracional como el error relativo medio que se comete en la indeterminación del tiempo de reverberación estructural:

$$\frac{\Delta K_{ij}}{K_{ij}} = \frac{\Delta T_{s,ij}}{T_{s,ij}} \tag{4.1.38}$$

Se presentan a continuación los resultados de estas estimaciones para el caso de medianeras y forjado.

Número pares de medida	$\frac{\Delta T_{s,ij}}{T_{s,ij}}$	
	$\eta_{\text{interno}}=0.01$	$\eta_{\text{interno}}<0.01$ (0,006 forjado y 0,002 medianera)
Forjado	0,15 dB	0,14 dB
Medianera	0,10 dB	0,07 dB

Tabla 4.1.3 Errores relativos medios de valores globales. Para forjados y medianeras.

Comparando la tabla 4.3 con la tabla 4.2, una vez más queda reflejado la importancia de la diferencia de niveles de velocidad en la determinación del índice de reducción de vibraciones. Recordar que en la tabla 4.1 no se observan desviaciones mayores de 3dB, +/- 3dB que es la tolerancia del método descrito en la misma normativa.

## 4.2 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LAS TRANSMISIONES LATERALES

Actualmente ya no se cuestiona la importancia del conocimiento del efecto de las transmisiones laterales en el aislamiento acústico global en un diseño completo de cualquier unidad de uso [Albar8]. Es más, se fomenta el uso de métodos reconocidos como base para la predicción previa del efecto de un flanco y su repercusión en el conjunto del diseño.

Como ya se ha descrito en el apartado 2.4 mediante el método de los elementos finitos, un sistema continuo se divide en una serie de porciones finitas delimitadas por nodos, cuyos grados de libertad constituyen las incógnitas del problema. La exactitud de los resultados dependerá del número de elementos utilizados en el mallado.

Para realizar este trabajo las uniones se han mallado con elementos planos de ocho nodos, con dos grados de libertad por nodo: desplazamientos en X e Y, modelado 2D. El número medio de elementos por modelo de unión es de 10000.

Recordemos la ecuación del movimiento armónico a resolver, que reproducimos en esta sección por facilitar la lectura del mismo:

$$\{F(t)\} = [M] \left\{ \frac{d^2 y}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dy}{dt} \right\} + [K] \{y\} \quad (4.2.1)$$

Donde  $\{F(t)\}$  es la fuerza de excitación armónica,  $[M]$  es la matriz de masa,  $[C]$  es la matriz de amortiguamiento y  $[K]$  es la matriz de rigidez [Zie93].

Se ha modelado una unión en Cruz y una unión en T. Para el estudio de las transmisiones laterales en ambas configuraciones se han simulado las condiciones de ensayo en laboratorio que se describen en [UNE10848-1]. En el punto 4.2.1.1 se describe este estudio para el caso de uniones rígidas y en el punto 4.2.1.2 se describe el estudio realizado con bandas elásticas.

Se han comparado, al igual que en el apartado de ensayos in situ, los resultados de las simulaciones con las predicciones de las expresiones empíricas, apartado 4.2.1.3.

## **4.2.1 MODELADO EN 2D**

### **4.2.1.1 Modelado 2D de uniones rígidas**

La expresión a resolver y que define el problema es la expresión 4.2.1. La figura 4.2.1 representa, tanto para unión en Cruz (figura 4.2.1 a)) como para unión en T (figura 4.2.1 b)), el esquema del modelado en dos dimensiones.

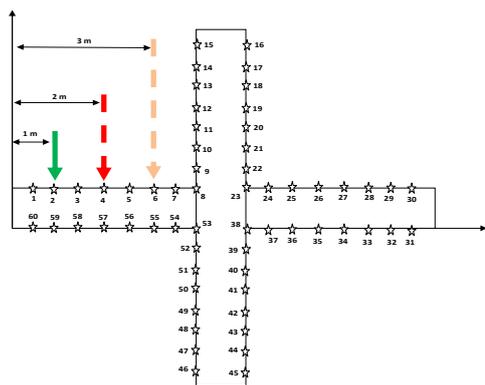


Figura 4.2.1 a) Unión en Cruz

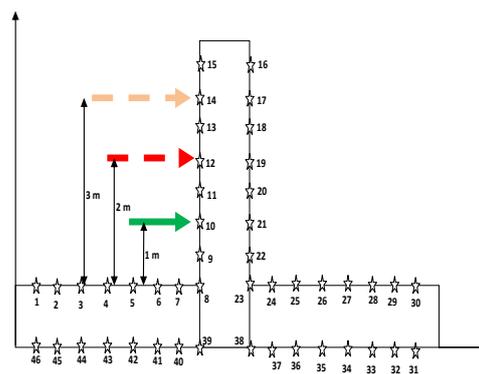


Figura 4.2.1 b) Unión en T

Figura 4.2.1 Modelo para unión rígida de elementos homogéneos

Se han simulado las condiciones de la norma [UNE10848-1], respecto a la colocación de fuentes de excitación, transductores de registro y respecto al tamaño de las muestras. Se han simulado materiales de  $2400 \text{ kg/m}^3$  de densidad,  $32 \cdot 10^9 \text{ Pa}$  de módulo de Young y 0,22 de coeficiente de Poisson. Los espesores simulados son de 10, 20 y 30 cm y el factor de pérdidas interno de 0,01.

Como se muestra en la figura 4.2.1, se aplica una fuerza constante en el margen de frecuencias considerado de 1N en las posiciones marcadas con las flechas y se obtiene, mediante la simulación en elementos finitos, las velocidades en puntos marcados con estrellas en las figuras.

Entre fuerzas se ha dejado 1 m y entre puntos de registro, 0,5 m, siguiendo el espíritu de la norma. A partir de las simulaciones, se obtiene el valor de las velocidades en diferentes posiciones  $i,j$ . A partir de estos datos, se obtiene el promedio según la norma y se obtiene la diferencia de niveles de velocidad promedio.

Para la obtención del tiempo de reverberación estructural, se ha seguido la expresión (4.1.36).

Se presentan resultados del índice de reducción vibracional para las configuraciones siguientes de uniones en cruz; forjado emisión-medianera recepción ( $K_{12R}$ ) y forjado emisión-forjado recepción ( $K_{13}$ ). Se ha estudiado el caso en que la relación entre las masas de los diferentes elementos es 1 ( $M=0$ )

y el caso en que ambas masas son distintas ( $M < 0$ ). En todos los casos estudiados se ha realizado una primera validación de la diferencia de niveles de velocidad obtenida, con base a la ecuación 4.1.5. Esta diferencia de niveles de velocidad se obtiene directamente del modelo 2D de elementos finitos. Se calcula para cada una de las cargas. Se ha observado que la condición 4.1.5 no se cumple para algunas frecuencias y algunas configuraciones a C1 (carga a 0,5 m del extremo) y en algunos casos solo se cumple a algunas frecuencias para C3 (carga a 1m de la unión).

En la figura 4.2.2 y 4.2.3 se observan las diferencias de niveles de velocidad para C1 y C3 de las configuraciones 1-2R y 1-3, respectivamente. En ambos casos la desigualdad 4.1.5 nos da como valor límite de la diferencia de niveles de velocidad 2,4dB.

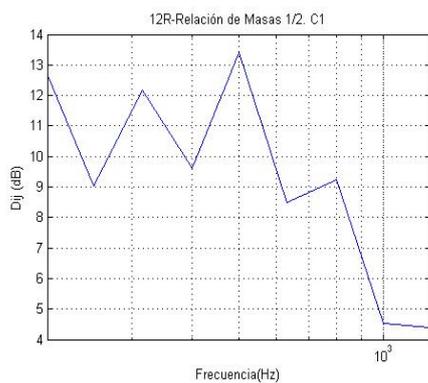


Figura 4.2.2 a) Carga en C1; a 0,5m del extremo del elemento constructivo

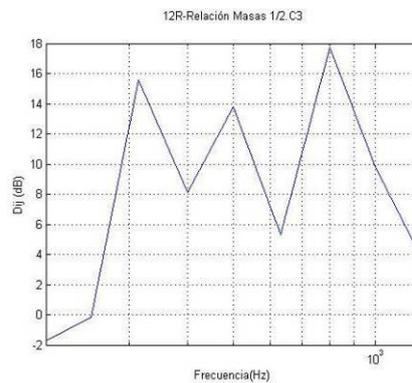


Figura 4.2.2 b) Carga en C3; a 1m de la unión entre elementos constructivos

Figura 4.2.2 Diferencia de niveles de velocidad para la configuración forjado emisión- medianera recepción, configuración en cruz, si la carga está en C1(a) o en C3(b).

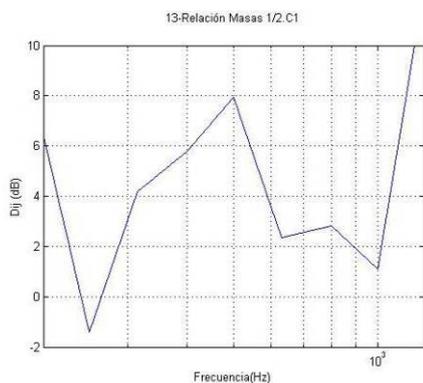


Figura 4.2.3 a) Carga en C1; a 0,5m del extremo del elemento constructivo

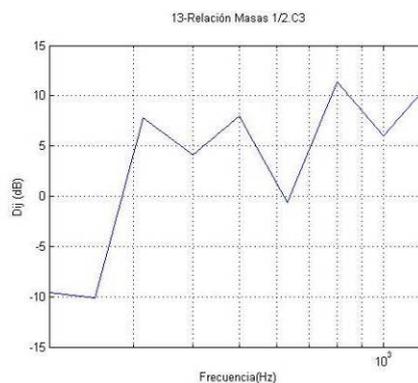


Figura 4.2.3 b) Carga en C3; a 1m de la unión entre elementos constructivos

Figura 4.2.3 Diferencia de niveles de velocidad para la configuración forjado emisión-forjado recepción, configuración en cruz, si la carga está en C1(a) o en C3(b).

En las figuras 4.2.4 a) y b) se pueden observar los valores de los índices de reducción de vibraciones que se han obtenido de las simulaciones desde 200Hz hasta 1250Hz para las configuraciones 1-2R (forjado-medianera) y 1-3 (forjado-forjado), respectivamente. En ambos casos las masas por unidad de área de los dos elementos constructivos involucrados es la misma y se presentan los resultados para masas superficiales de  $240 \text{ kg/m}^2$ ,  $480 \text{ kg/m}^2$  y  $720 \text{ kg/m}^2$ . Recordemos que la expresión que hemos utilizado para estimar el tiempo de reverberación estructural (4.1.36) solo es válida para elementos con masas superficiales menores a  $800 \text{ kg/m}^2$ .

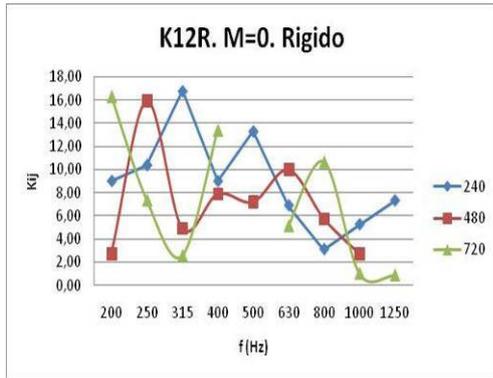


Figura 4.2.4 a) índice de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-medianera

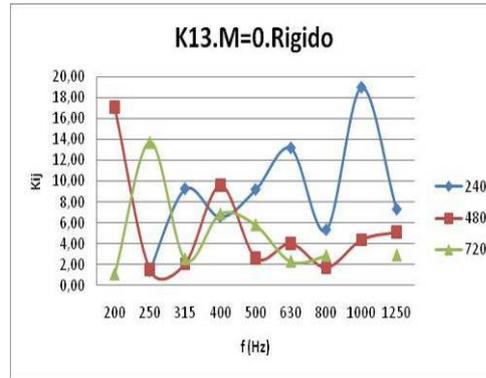


Figura 4.2.4 b) índice de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-forjado

Figura 4.2.4 Índices de reducción de vibraciones (dB) para configuración en cruz simulados para diferentes caminos y para masas superficiales de 240 kg/m<sup>2</sup>, 480 kg/m<sup>2</sup> y 720 kg/m<sup>2</sup>

En la figura 4.2.5 se puede observar el índice de reducción de vibraciones que se obtiene mediante el modelo de elementos finitos en este punto descrito simulando las condiciones de ensayo descritas en [UNE10848-1] de la configuración forjado-medianera. En este caso la relación entre las masas superficiales de los dos elementos involucrados es de 0,5, esto es,  $M < 0$ .

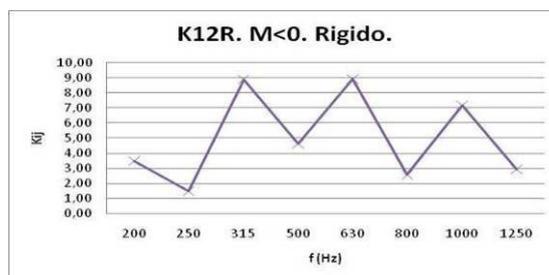


Figura 4.2.5 Índice de reducción de vibraciones (dB) para la configuración en cruz de forjado-medianera y relación entre masas superficiales 1/2.

Se ha seguido el mismo esquema de presentación de resultados en el caso de la configuración en T. Los caminos estudiados también son forjado emisión-

medianera recepción (12R) y forjado-forjado (13). En la figura 4.2.6 se presenta el valor del índice de reducción de vibraciones simulado para el camino 12R y relaciones de masas la unidad. En la figura 4.2.7 se presentan los valores de los índices de reducción de vibraciones para los caminos 12R y 13, y relación entre masas de los diferentes elementos constructivos  $\frac{1}{2}$ .

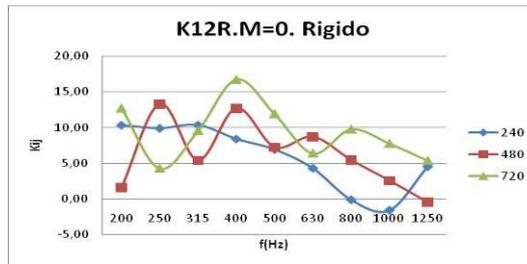


Figura 4.2.6 Índice de reducción de vibraciones (dB) para la configuración en T de forjado-medianera y masas superficiales 240kg/m<sup>2</sup>, 480 kg/m<sup>2</sup> y 720 kg/m<sup>2</sup>

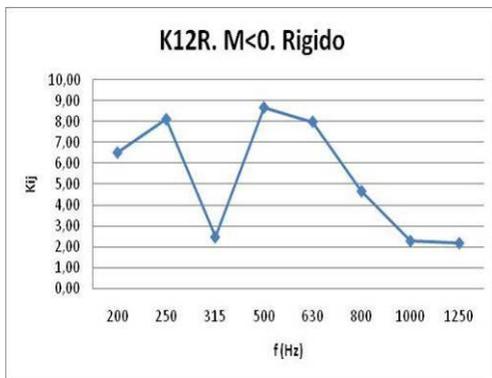


Figura 4.2.7 a) índice de reducción de vibraciones (dB) para la configuración en T forjado-medianera

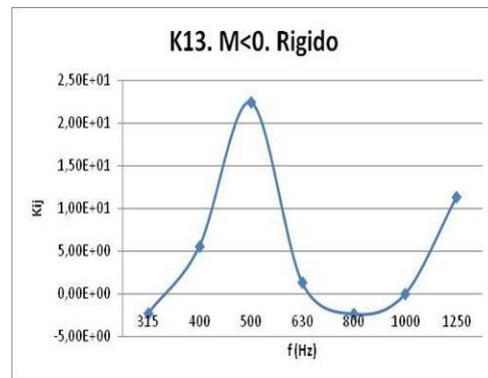


Figura 4.2.4 b) índice de reducción de vibraciones (dB) para la configuración en T forjado-forjado

Figura 4.2.7 Índice de reducción de vibraciones (dB) para diferentes configuraciones de uniones rígidas en T y relación entre masas  $\frac{1}{2}$ .

En este apartado podemos ver la evolución con la frecuencia de los valores de los índices de reducción de vibraciones simulados a partir de elementos finitos, para un modelo en dos dimensiones donde se han simulado el procedimiento de ensayo descrito [UNE10848-1], en el caso de uniones rígidas tanto en Cruz como en T. También se ha obtenido un valor de este índice de reducción de vibraciones global, como media aritmética de los valores que se obtienen entre 250Hz y 1250Hz, éstos se presentarán en el apartado 4.2.1.3.

Una primera observación, que ya ha sido comentada en este capítulo, es la que se deduce de los valores de los niveles de la diferencia de velocidades. Para que tenga sentido el estudio de la transmisión a partir del índice de reducción de vibraciones, el acoplamiento entre los diferentes elementos no puede ser muy fuerte, esto matemáticamente es representado por la desigualdad (4.1.5). Existe un valor límite que debe de ser superado, y que depende de la relación de masas superficiales y de las frecuencias críticas de los materiales que conforman los elementos.

En las figuras 4.2.2 y 4.2.3 se puede observar que, aun estando dentro de lo establecido en el protocolo de medición en cuanto a distancias permitidas se refiere, esto es la excitación a 0,5 metros del límite de ensayo y a 1 metro de la unión entre elementos, los niveles de las diferencias de velocidad no siempre superan el límite establecido. Comparando las figuras 4.2.2 y 4.2.3 a) y b) concluimos es mucho más crítico la excitación cerca de la unión entre elementos que la excitación cerca del extremo de alguno de los elementos.

En todos los casos simulados, tanto si  $M=0$  (masas superficiales de los elementos involucrados en la transmisión idénticas), o  $M<0$ , (relación entre masas de 0,5), se observa una variación del valor del índice de reducción de vibraciones con la frecuencia. Según se describe en [UNE12354-1], esto ocurre en elementos ligeros, o elementos dobles. Sin embargo, no es este nuestro caso, ya que el material simulado es hormigón.

Por lo tanto, las desviaciones con la frecuencia pueden ser atribuidas, bien a la estimación del tiempo de reverberación estructural con un factor de pérdidas constante de 0,01, o a limitaciones del propio modelo en 2 dimensiones.

#### 4.2.1.2 Modelado 2D de uniones con bandas elásticas

La aparición del Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) [DB-HR] hace que tengamos que plantearnos mejoras en las soluciones constructivas adoptadas hasta la fecha en las construcciones. Uno de los cambios más importantes se produce en la necesidad de instalar láminas elásticas. Estas láminas elásticas junto el material de compresión conformarán el suelo flotante. Con esta nueva aportación se pretende la reducción del nivel de ruido de impactos y disminuir las pérdidas por flancos a través de los elementos laterales, con lo cual es importante poder valorar la eficiencia de estas láminas en este sentido.

Al igual que se ha hecho con el estudio de elementos rígidos se ha simulado las condiciones de la norma UNE-EN ISO 10848-1:2007 [UNE10848-1], respecto a la colocación de fuentes de excitación y transductores de medida y respecto al tamaño de las muestras. Se han simulado materiales de  $2400 \text{ kg/m}^3$  de densidad,  $32 \cdot 10^9 \text{ Pa}$  de módulo de Young y 0,22 de coeficiente de Poisson. Los espesores simulados son de 10, 20 y 30 cm y el factor de pérdidas interno de 0,01. Respecto a la lámina elástica, se ha escogido una lámina que cumpla con la relación entre módulo de Young y espesor que se da en la expresión (4.2.2), y un factor de pérdidas de 0,2.

$$\frac{E}{e} \approx 100 \frac{MN}{m^3} \quad (4.2.2)$$

donde E es el módulo de Young ( $\text{N/m}^2$ ) y e es el espesor (m) del elemento flexible insertado.

Los esquemas de las configuraciones del modelo en Cruz y en T son los mismos que aparecen en la figura 4.2.1, aunque en este caso, se ha insertado una banda elástica, tal y como se puede observar en la figura 4.2.8.

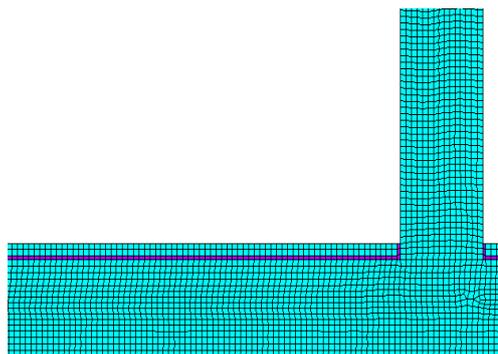


Figura 4.2.8.Unión mallada con la lámina para el estudio mediante elementos finitos.

En este caso se está simulando la influencia del suelo flotante y no de un elemento en la junta. Sin embargo, cualquier cambio que se considere debe atravesar esa lámina, que está sometida a una masa de carga que puede ser un mortero de compresión, un parquet, etc. Recordar que el procedimiento descrito en [UNE12354-1] y las ecuaciones empíricas que allí se dan, han sido descritos en el punto 2.2.2.3, y son para elementos homogéneos en los que se ha insertado un elemento flexible.

El primer paso en el tratamiento de datos obtenidos a partir de la simulación con la banda elástica ha sido comparar con la misma configuración rígida. Esta comparación para alguno de los caminos de transmisión de la unión en T se puede observar en la figura 4.2.9. En concreto se pueden ver lo que ya hemos denominado en anteriores apartados como caminos simétricos, medianera-forjado (1-4), figura 4.2.9 a) y forjado-medianera (4-1), figura 4.2.9 b). Se presentan los resultados para todo el espectro de frecuencias simulado y a diferentes densidades superficiales.

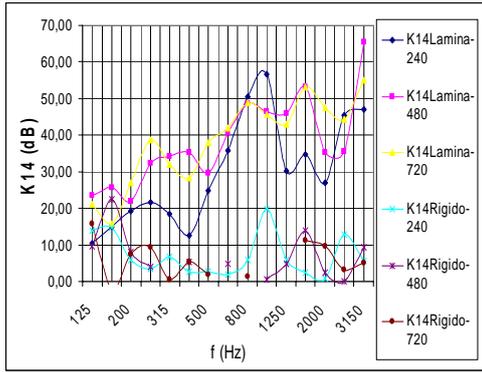


Figura 4.2.9 a)

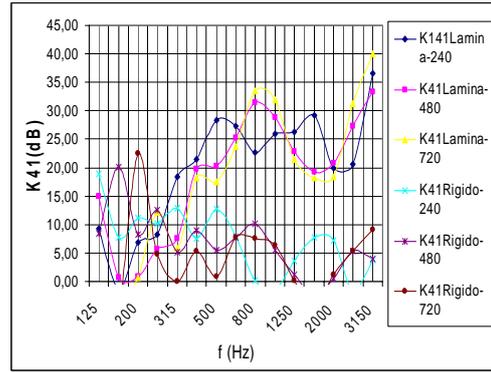


Figura 4.2.9 b)

Figura 4.2.9 Comparación entre índices de reducción vibracional obtenidos a partir de simulación entre configuraciones rígidas y configuraciones con bandas elásticas

Se presentan a continuación los valores tanto para configuración en T, figura 4.2.10, como para configuración en Cruz, figura 4.2.11, de los índices de reducción vibracional que se obtienen a partir de las simulaciones mediante elementos finitos con bandas elásticas. Los caminos de transmisión estudiados han sido los mismos que en el caso del estudio de uniones rígidas, forjado-medianera, 1-2R, y forjado-forjado, 1-3. Se presentan los resultados para relación de masas entre los diferentes elementos idénticas ( $M=0$ ), y diferentes masas superficiales ( $240 \text{ kg/m}^2$ ,  $480 \text{ kg/m}^2$  y  $720 \text{ kg/m}^2$ ). Se compara con la predicción de las ecuaciones empíricas, aunque esta comparación se verá con más detalle en el punto 4.2.1.3.

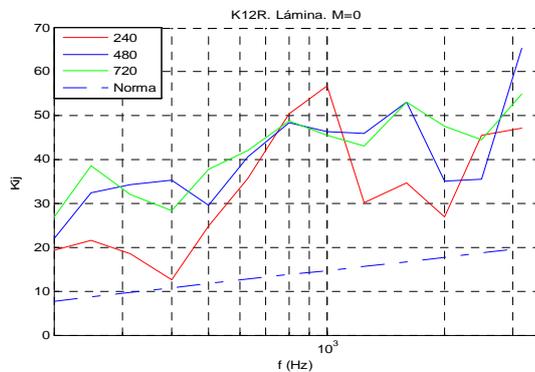


Figura 4.2.10 .Valores del índice de reducción vibracional K12R para el caso de suelo flotante y  $M=0$ . Unión en T.

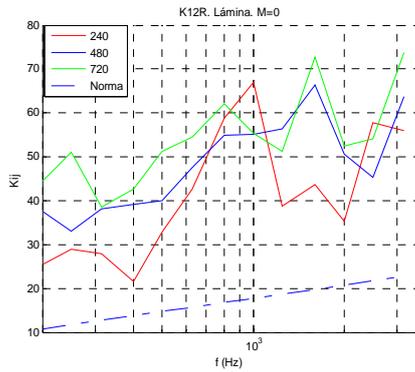


Figura 4.2.11 a)

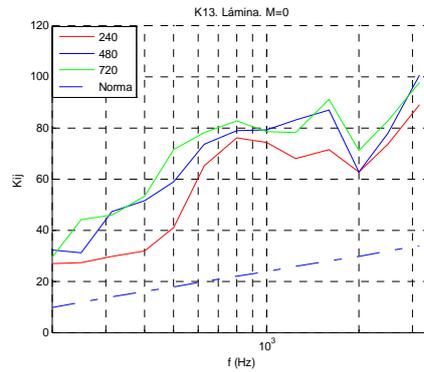


Figura 4.2.11 b)

Figura 4.2.11. Valores del índice de reducción vibracional K12R y K13 para el caso de suelo flotante y  $M=0$ . Unión en Cruz.

Observamos de los resultados de las simulaciones que las desviaciones con la frecuencia del valor del índice de reducción de vibraciones parecen suavizarse, sobre todo entre 250Hz y 1250Hz. Lo que sí se puede observar con claridad es la tendencia del aumento del valor del índice de reducción de vibraciones con la frecuencia al insertar la banda elástica.

#### 4.2.1.3 Comparativa con normativa actual

En este apartado se muestran algunos de los resultados que se han obtenido a partir de las simulaciones mediante el modelo en 2 dimensiones de elementos finitos y que se ha descrito en los puntos anteriores, 4.2.1.1 y 4.2.1.2.

Se diferencian las configuraciones entre uniones en Cruz Rígida y T Rígidas, ya que los elementos constructivos simulados son elementos homogéneos no ligeros. En concreto se han simulado materiales de  $2400 \text{ kg/m}^3$  de densidad,  $32 \cdot 10^9 \text{ Pa}$  de módulo de Young y 0,22 de coeficiente de Poisson, con espesores de 10, 20 y 30 cm. Con esto se tienen densidades superficiales de  $240 \text{ kg/m}^2$ ,  $480 \text{ kg/m}^2$  y  $720 \text{ kg/m}^2$ . Se ha considerado un factor de pérdidas interno de 0,01.

También se presentan comparativas con la normativa actual de configuraciones en Cruz y T con capas intermedias flexibles, las características de los elementos simulados son las mismas que en el caso de configuraciones rígidas, pero además se ha añadido una lámina elástica. Se ha escogido una lámina que cumpla con la relación entre módulo de Young y espesor que se da en la expresión (2.2.44), y un factor de pérdidas de 0,2.

Se ha obtenido a partir de los valores del índice de reducción de vibraciones en función de la frecuencia del apartado 4.2.1.1 y 4.2.1.2 un valor global, como media aritmética del valor que presenta en cada frecuencia central de cada banda. Se ha comparado este valor con el valor descrito por las expresiones empíricas que se dan en [UNE12354-1] referentes a uniones rígidas y con las ecuaciones empíricas para elementos homogéneos con inserciones de elementos flexibles.

Aunque cabe diferenciar entre elemento flexible insertado en elemento homogéneo y suelo flotante [Reyd09], no se conocen expresiones empíricas que describan el comportamiento con suelo flotante, sino que el procedimiento a seguir para obtener una estimación en este caso es la estimación del índice de reducción de vibraciones rígido con una contribución adicional a la mejora al aislamiento debido a la lámina.

#### **a) Uniones en Cruz**

Las expresiones (4.1.6) y (4.1.7) son las expresiones empíricas para los diferentes caminos de uniones rígidas de la configuración homogénea en cruz. Las expresiones (4.1.8), (4.1.9) y (4.1.10) son las expresiones para elementos homogéneos con capas intermedias flexibles.

En la figura 4.2.12, 4.2.13 y 4.2.14 se observan los índices de reducción vibracional que se obtienen a partir de las simulaciones y los valores que predicen las fórmulas empíricas que se derivan del modelo descrito en [UNE12354-1]. Las transmisiones representadas son para unión cruz rígida, transmisión forjado-medianera superior, figura 4.2.12, transmisión forjado-medianera inferior, figura

4.2.13 y transmisión forjado-forjado, figura 4.2.14. En los tres casos las densidades superficiales de los elementos implicados era idéntica y se ha estudiado para tres casos diferentes, 240 kg/m<sup>2</sup>, 480 kg/m<sup>2</sup> y 720 kg/m<sup>2</sup>.

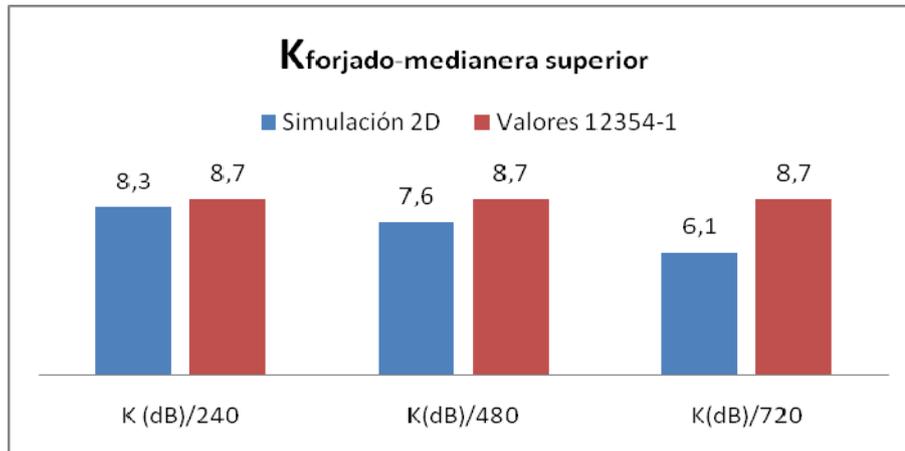


Figura 4.2.12 Indices de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-medianera superior de Cruz rígido. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

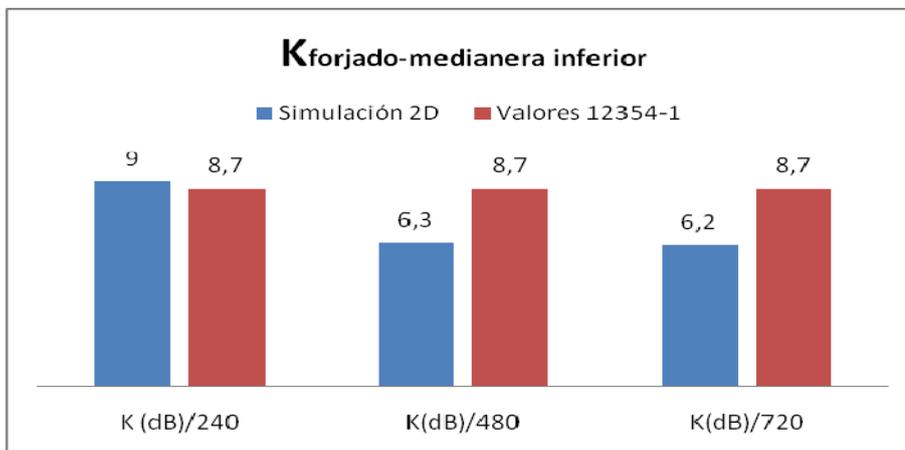


Figura 4.2.13 Indices de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-medianera inferior de Cruz rígido. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

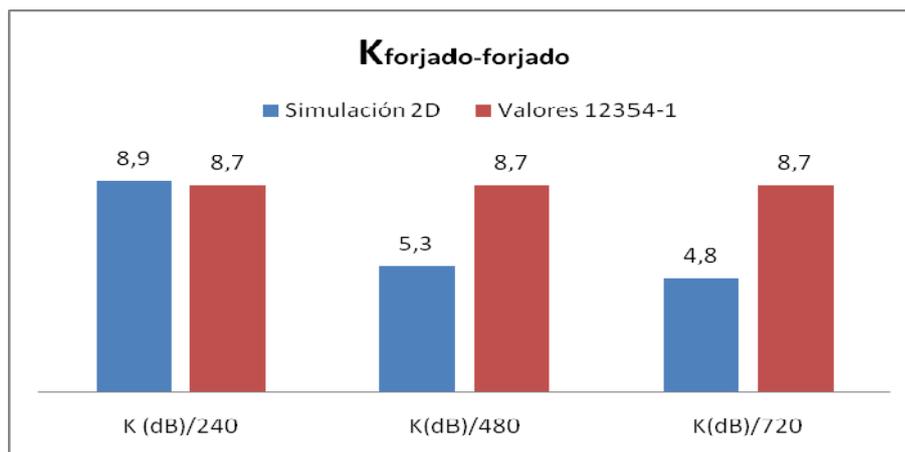


Figura 4.2.14 Índices de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-forjado de Cruz rígido. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

En las siguientes figuras, 4.2.15, 4.2.16 y 4.2.17 se observa los índices de reducción vibracional de diferentes transmisiones de unión en Cruz con láminas flexibles.

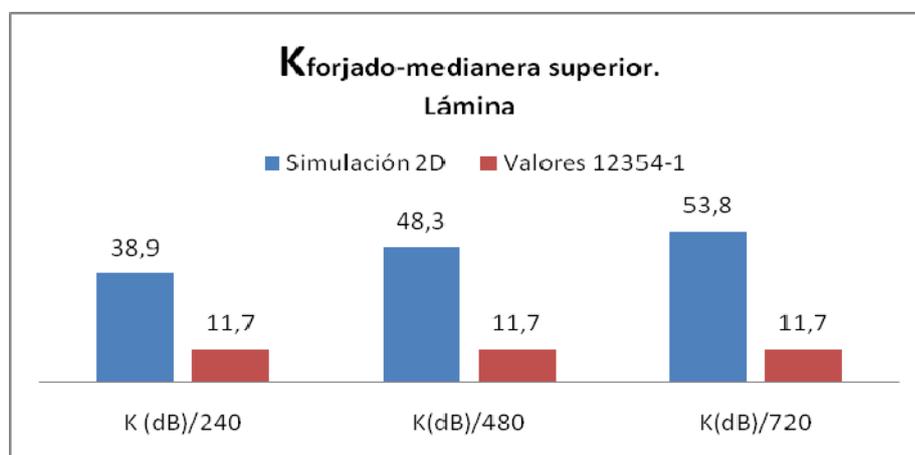


Figura 4.2.15 Índices de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-medianera superior de Cruz con Lámina. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

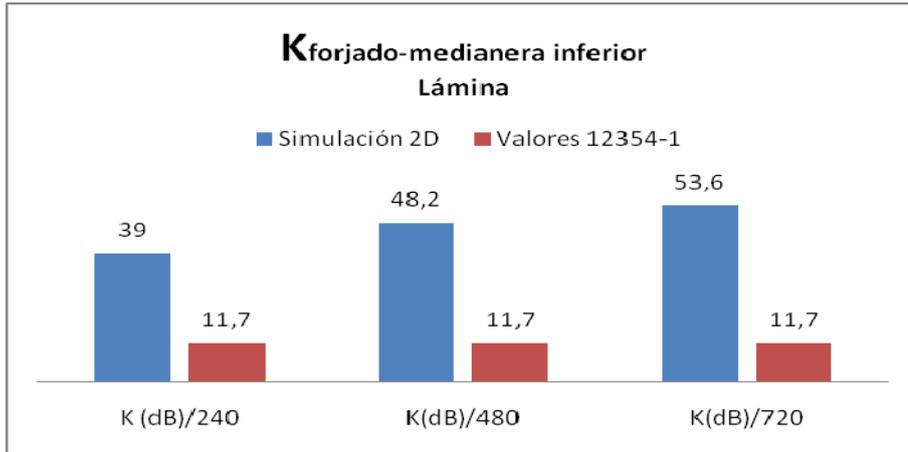


Figura 4.2.16 Índices de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-medianera inferior de Cruz con lámina. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

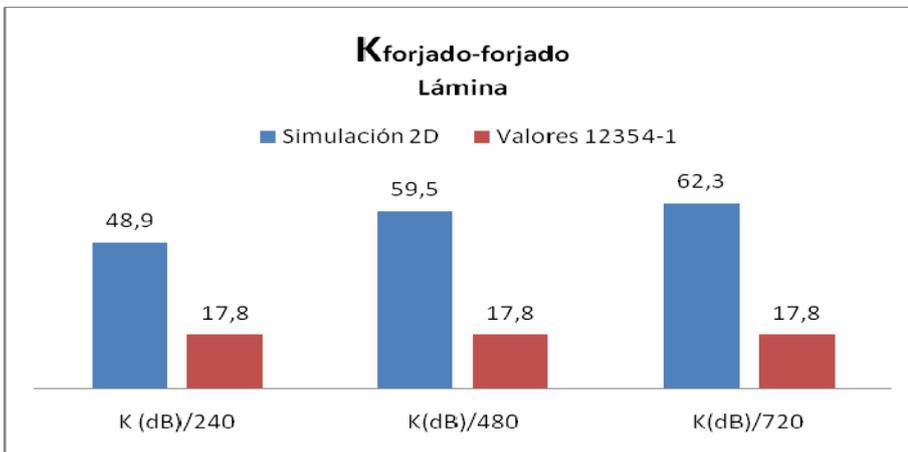


Figura 4.2.17 Índices de reducción de vibraciones (dB) para la configuración forjado-forjado de Cruz con lámina. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

Destacar de las figuras desde la 4.2.15 hasta la 4.2.17 la diferencia entre los resultados a partir de las simulaciones y las ecuaciones empíricas de las configuraciones rígidas y las configuraciones con láminas. En este segundo caso, aunque al estudiar la evolución del índice de reducción de vibraciones con la frecuencia, la tendencia de los valores simulados es claramente la misma que los valores a partir de ecuaciones empíricas, esto es, aumentar con la frecuencia (figuras 4.2.10 y 4.2.11), existe un desplazamiento de los valores simulados

importante hacia valores mayores del índice de reducción vibracional, de hasta, en algunos casos, 40 dB.

### b) Uniones en T

La ecuación empírica que nos da el valor del índice de reducción vibracional para la unión rígida en T que hemos estudiado, forjado-medianera y medianera-forjado, es la expresión (4.1.12), y la misma configuración pero con lámina formando el suelo flotante viene representada empíricamente por la expresión (4.1.16).

Las figuras 4.2.18 y 4.2.19, muestran respectivamente los valores globales de uniones en T rígidas y uniones en T con lámina, de las transmisiones entre forjado-medianera (figuras a)) y medianera-forjado (figuras b)). En este caso la relación entre las diferentes masas superficiales que forman la unión también es la unidad y también se muestran resultados de 240 kg/m<sup>2</sup>, 480 kg/m<sup>2</sup> y 720 kg/m<sup>2</sup>.

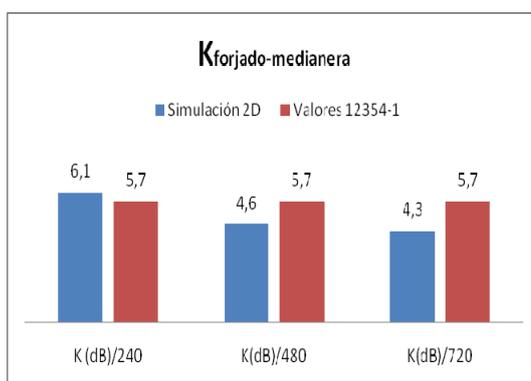


Figura 4.2.18.a) Transmisión forjado-medianera. Unión T Rígida

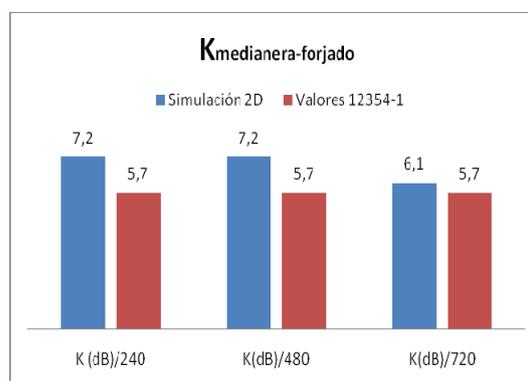


Figura 4.2.18. b) Transmisión medianera-forjado. Unión T Rígida

Figura 4.2.18 Indices de reducción de vibraciones (dB) para diferentes configuraciones rígidas en T. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

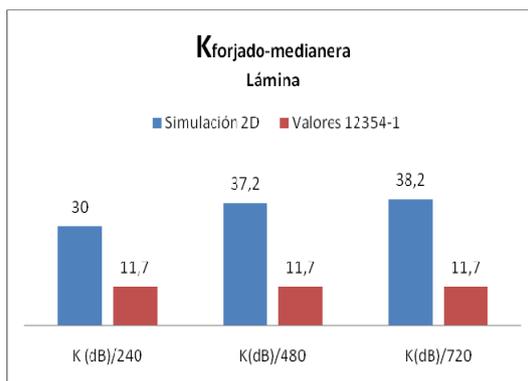


Figura 4.2.19.a) Transmisión forjado-medianera. Unión T con Lámina

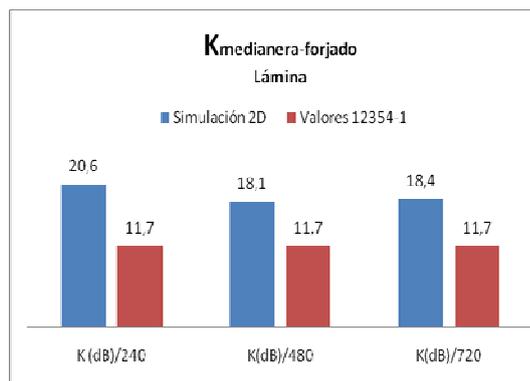


Figura 4.2.19.b) Transmisión medianera-forjado. Unión T con Lámina

Figura 4.2.19 Índices de reducción de vibraciones (dB) para diferentes configuraciones en T con lámina. Valores obtenidos a partir de la simulación de elementos finitos 2D y a partir de las ecuaciones empíricas.

También en el caso de uniones con T, las configuraciones con láminas insertadas presentan mayores desviaciones frente a los valores que se obtienen a partir de las ecuaciones empíricas, aunque, en el caso de uniones en Cruz con lámina, estas diferencias son mayores.

Destacar que las mayores diferencias se presentan, en la mayoría de los casos, para densidades superficiales de los elementos constructivos de  $720 \text{ kg/m}^2$ . Este valor de es el que más se acerca al límite de  $800 \text{ kg/m}^2$  a partir del cual una de las estimaciones que se han utilizado en la simulación del modelo en dos dimensiones por elementos finitos, la estimación del tiempo de reverberación estructural, deja de ser válida.

### 4.3. PROPUESTAS DE FORMULACIÓN

En esta sección, a partir del análisis de los valores del índice de reducción de vibraciones que se han obtenido tanto a partir de mediciones in situ como a partir de simulaciones, se intenta obtener nuevos coeficientes que describan las ecuaciones empíricas.

Para las configuraciones rígidas, se ha estudiado el caso en el que  $M=0$  para obtener el valor de la constante que se ajuste mejor, si es posible, a los datos que se han obtenido.

Para las configuraciones con elementos elásticos, la evolución con la frecuencia de los valores del índice de reducción de vibraciones ha hecho que nos planteemos un nuevo ajuste. En este ajuste se ha estudiado la evolución del índice de reducción de vibraciones con el  $\log(f)$ . Los resultados se presentan en el segundo punto de esta sección.

#### 4.3.1 Nuevas fórmulas para uniones rígidas

Si recordamos las ecuaciones empíricas que se describen en la norma UNE-EN 12354-1:2000 y que se refieren a uniones rígidas (tanto las ecuaciones que describen transmisiones de configuración en T o transmisiones de configuración en Cruz) estas presentan un valor constante que va acompañado de unos coeficientes que marcan la dependencia con la relación entre masas de los diferentes elementos constructivos. Esta dependencia con la masa viene marcada a partir de  $M$ . Retomamos la expresión 2.2.36:

$$M = \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \quad (4.3.1)$$

donde:

$m'_i$  es la densidad superficial ( $\text{kg/m}^2$ ) del elemento  $i$  en la transmisión  $ij$ .

$m'_{\perp i}$  es la densidad superficial ( $\text{kg/m}^2$ ) del otro elemento, perpendicular al  $i$ , y que forma la unión.

En este punto, con la finalidad de obtener unas ecuaciones empíricas que se ajusten mejor a los valores del índice de reducción de vibraciones ensayado se ha eliminado la dependencia con  $M$  estudiando solo los casos en los que la relación entre  $m'_i$  y  $m'_{\perp i}$  es la unidad. De esta forma se intenta asegurar el valor de la

constante. El valor de ésta, para las ecuaciones empíricas que nos ofrece la citada normativa [UNE12354-1], es de 8,7 para las uniones en cruz, y de 5,7 para las uniones en T. En ambos casos expresiones referidas solamente a uniones rígidas.

A partir de los valores del índice de reducción vibracional que se han obtenido mediante ensayos en edificaciones in situ y a partir de los valores que se han obtenido del modelado en dos dimensiones de uniones y procedimiento de medida que se describe en [UNE10848-1] para el caso de  $M=0$  y uniones rígidas, se obtienen los valores de las constantes y las desviaciones que se observan en la tabla 4.3.1.

Tipo de Unión	Constante (dB)	Desviación (dB)
Cruz	8,4	2,1
T	8,6	2,3

Tabla 4.3.1 Valores de la constante de las ecuaciones empíricas que describen el valor del índice de reducción vibracional de uniones rígidas. Valores medios y desviación asociada.

Los valores medios de las constantes que aparecen en la tabla 4.3.1 presentan desviaciones elevadas, aunque reflejan de manera satisfactoria alguna de las conclusiones que se han obtenido en el punto 4.1.4 al comparar los valores de índices de reducción vibracional empíricos con los valores experimentales.

Para la configuración en cruz, la diferencia entre valores empíricos y experimentales en los casos en los que se cumple que  $M=0$  es de aproximadamente 2 dB. La constante que se obtiene a partir de los datos experimentales presenta prácticamente el mismo valor, 8,4 dB frente a 8,7 dB de las ecuaciones empíricas.

Para la configuración en T, se han observado diferencias entre valores experimentales y empíricos superiores a los 6 dB, siendo los valores experimentales siempre superiores. También es superior la constante. Las ecuaciones empíricas para unión en T rígida nos ofrecen una constante de 5,7 dB

frente la que se obtiene a partir de los ensayos que presenta un valor de 8,6 dB. En este caso, incluso, el valor empírico de la constante está fuera del rango de la constante experimental y su desviación.

#### 4.3.2 Nuevas fórmulas para uniones con elementos elásticos

Las expresiones empíricas que la normativa [UNE12354-1] proporciona para el estudio de transmisiones, en Cruz o en T, de elementos con capas intermedias flexibles han sido reproducidas en el punto 4.1.3. En ellas se puede observar la correlación del índice de reducción de vibraciones con las características elásticas del material flexible y de la frecuencia. Esta correlación viene marcada por  $\Delta$ .  $\Delta$  depende de característica elástica del material flexible, así como el módulo de Young.

Siguiendo el esquema de trabajo del caso anterior para uniones rígidas, hemos considerado los resultados de las simulaciones del modelo en dos dimensiones y los resultados de las simulaciones in situ para intentar encontrar ecuaciones empíricas que se ajusten mejor a los resultados, que se han obtenido a lo largo de la realización de este trabajo de tesis.

En el caso de la simulación del modelado en dos dimensiones se está simulando la influencia de un suelo flotante y no de un elemento en la junta. Sin embargo, cualquier transmisión que se considere debe atravesar la lámina, que está sometida a una masa de carga que puede ser un mortero de compresión, un parquet, etc. Por tanto se propone un ajuste, tomando como variable  $\log(f)$ , de la forma que se muestra en la expresión 4.3.2.

(4.3.2)

$$K_{ij} = A \log(f) + B$$

Para obtener un ajuste previo a la transmisión entre diferentes elementos constructivos en el caso de tener instalado un suelo flotante, se ha considerado las simulaciones que cumplían  $M=0$ , esto es, masas de los elementos

implicados con una relación de la unidad, para eliminar cualquier posible dependencia con M.

En la figura 4.3.1 se observa el ajuste que se ha obtenido para las simulaciones de la unión en Cruz y la transmisión forjado-medianera.

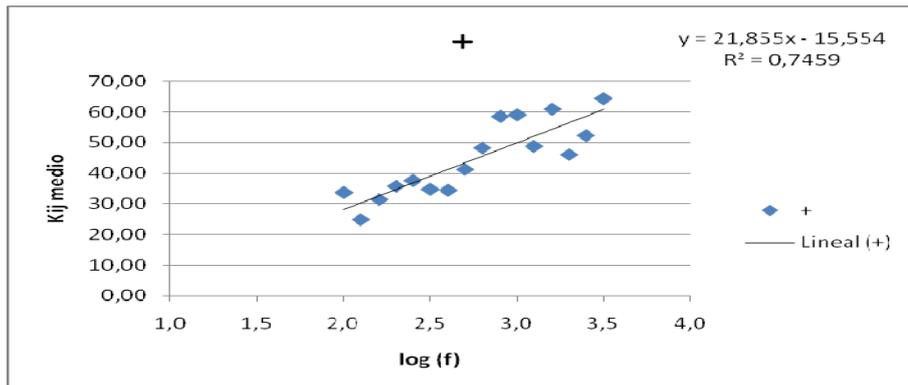


Figura 4.3.1 Ajuste de los valores de  $K_{ij}$  obtenidos para la simulación en dos dimensiones y el caso con lámina+mortero (suelo flotante). Unión en Cruz.

En la figura 4.3.2 se observa el ajuste que se ha obtenido para las simulaciones de la unión en T y la transmisión forjado-medianera.

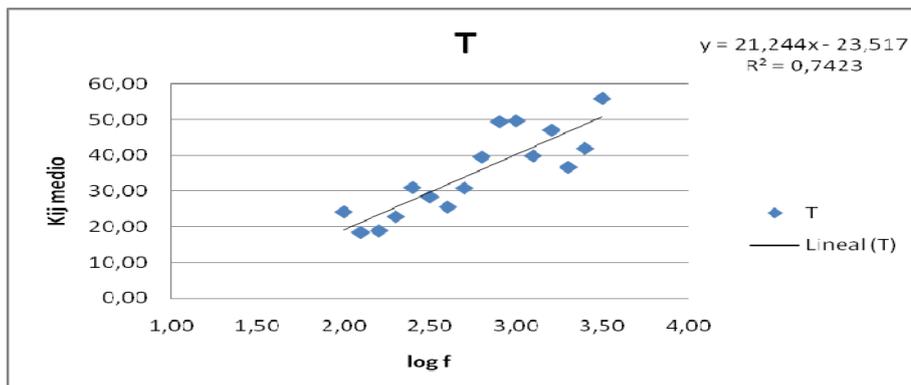


Figura 4.3.2 Ajuste de los valores de  $K_{ij}$  obtenidos para la simulación en dos dimensiones y el caso con lámina+mortero (suelo flotante). Unión en T.

Se han intentado ajustar los resultados que se han obtenido de las mediciones in situ para configuraciones con elementos flexibles a un ajuste como el que representa la expresión 4.3.2. Para comprobar si el comportamiento descrito

por las ecuaciones empíricas se puede aproximar a un ajuste de este tipo, se ha representado, en algunas ecuaciones empíricas en concreto, el valor de  $K_{ij}$  que nos da la expresión empírica en función del logaritmo de la frecuencia. En la figura 4.3.4 se pueden observar algunos de los resultados para la transmisión en la que es necesario pasar dos veces por el elemento flexible insertado, (transmisión 1-3). En la figura 4.3.5 se observa el ajuste en el caso de que en la transmisión solo sea necesario el paso a través de uno de los elementos flexibles (transmisiones 1-2). En la figura 4.3.3 se observa el esquema de estas transmisiones, tanto de unión en Cruz como en T.

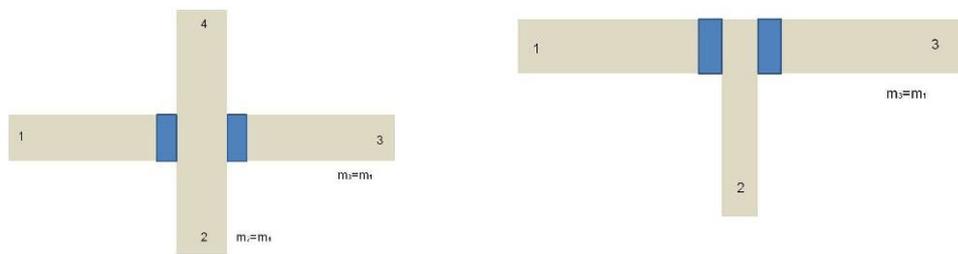


Figura 4.3.3 Esquemas de las transmisiones 13 y 12 tanto de la configuración en Cruz como en T cuando hay elementos flexibles insertados.

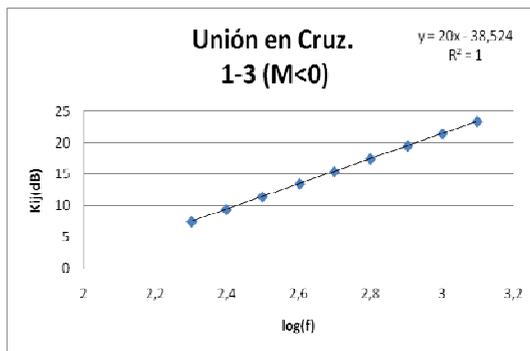


Figura 4.3.4 a) Ajuste con  $\log(f)$  de la expresión empírica 2.2.43. Unión en Cruz con elementos flexibles insertados.  $M=0,18$ .

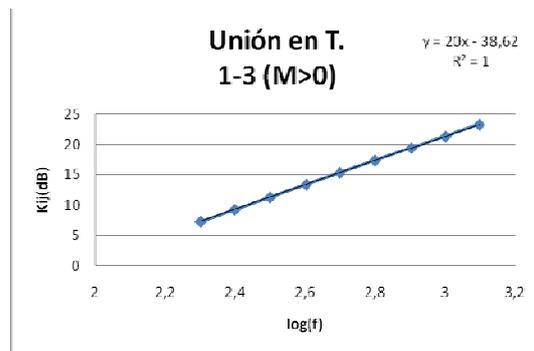


Figura 4.3.4 b) Ajuste con  $\log(f)$  de la expresión empírica 2.2.43. Unión en T con elementos flexibles insertados.  $M=-0,34$ .

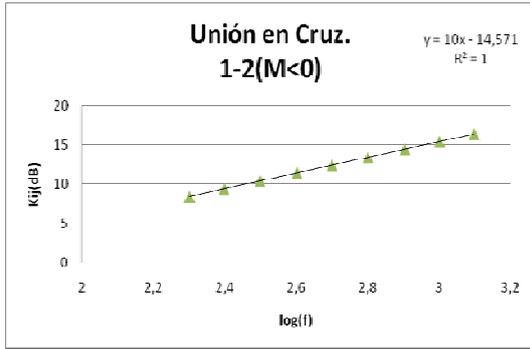


Figura 4.3.5 a) Ajuste con log(f) de la expresión empírica 2.2.41. Unión en Cruz con elementos flexibles insertados. M=0,18.

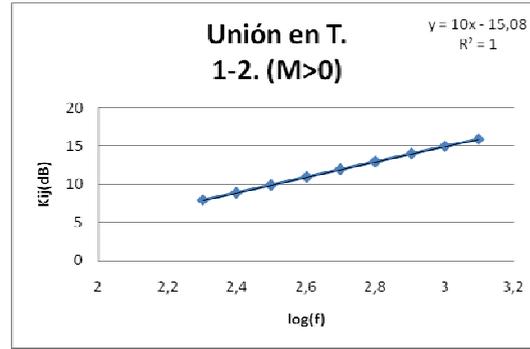


Figura 4.3.5 b) Ajuste con log(f) de la expresión empírica 2.2.41. Unión en T con elementos flexibles insertados. M=-0,34.

Cabe destacar de los ajustes que se pueden observar en las diferentes figuras 4.3.4 y 4.3.5, no la correlación del ajuste con un valor de la unidad, ya que las expresiones a partir de las que se realiza el ajuste son expresiones empíricas, sino el término que acompaña a log (f). Este término tanto en el caso de uniones en Cruz como en T con inserción de elementos flexibles presenta un valor de 20 si la transmisión es 1-3, y un valor de 10 si la transmisión es 1-2. Estos coeficientes no solo son independientes del tipo de unión, sino también de la relación entre las masa implicadas en la transmisión, ya que se obtiene la misma pendiente del ajuste para diferentes valores de M.

Ha sido un poco más laborioso poder obtener información de los ensayos in situ con láminas flotantes que en el caso de las simulaciones en dos dimensiones. En el modelado de diferentes configuraciones, transmisiones y suelo flotante se controlan los diferentes parámetros; puntos de medida, puntos de excitación, espesores, densidades, incluso características elásticas de la lámina que forma el suelo flotante, ya que el diseño del modelado ha sido un diseño propio. No ocurre lo mismo en el caso de ensayos in situ en edificación. En este caso, muchas de las magnitudes relevantes no solo no son controladas, sino que además pueden ser desconocidas.

Para comprobar si en la configuración sometida a ensayo en una edificación existe lámina flexible es suficiente con representar los resultados que se han obtenido del

índice de reducción de vibraciones a partir de los ensayos in situ en función del  $\log(f)$ . Veamos en la figura 4.3.6 algunos ejemplos.

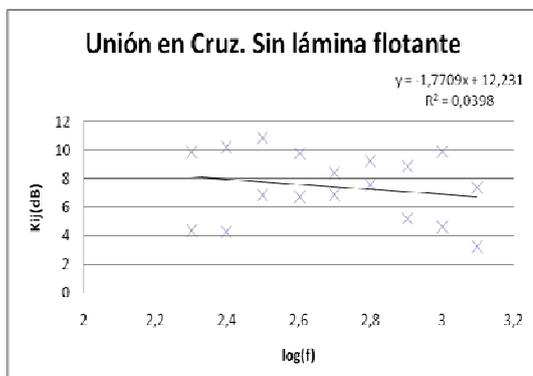


Figura 4.3.6 a)

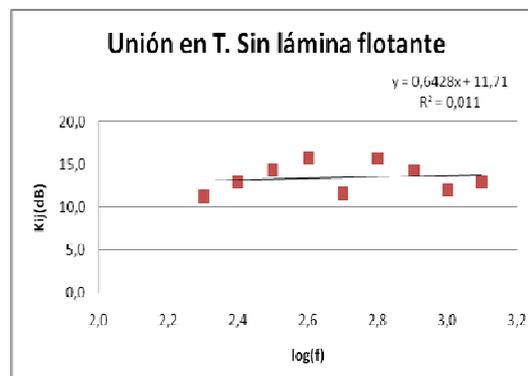


Figura 4.3.6 b)

Figura 4.3.6 Ajustes de los índices de reducción vibracional in situ de configuraciones en Cruz (a) o en T (b) en ausencia de elemento flexible o suelo flotante.

En la figura 4.3.6 se representan los ajustes de dos transmisiones estudiadas tanto en la unión en Cruz como en la unión en T. Se puede observar, no solo un bajo valor de la correlación, sino también un bajo valor de la pendiente de la recta del ajuste. En los dos casos representados no se había instalado ningún elemento flexible entre los diferentes elementos constructivos.

Veamos ahora ajustes, de configuraciones en Cruz y configuraciones en T de transmisiones 1-3 y 1-2 (esquema de la figura 4.3.3) de los índices de reducción de vibraciones ensayados en configuraciones dónde si se ha instalado suelo flotante.

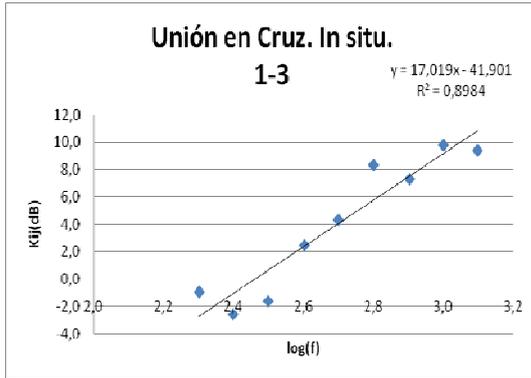


Figura 4.3.7 a) Ajuste con log(f) de valores de Kij a partir de mediciones in situ. Unión en Cruz con elementos flexibles insertados.

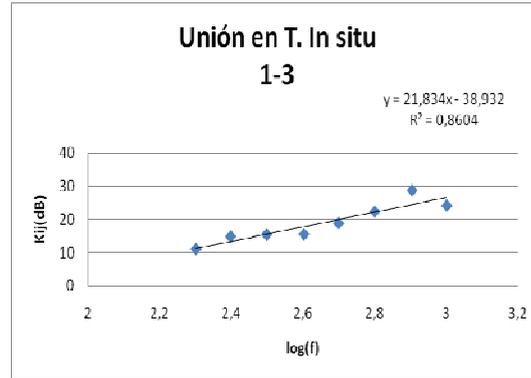


Figura 4.3.7 b) Ajuste con log(f) de valores de Kij a partir de mediciones in situ. Unión en T con elementos flexibles insertados.

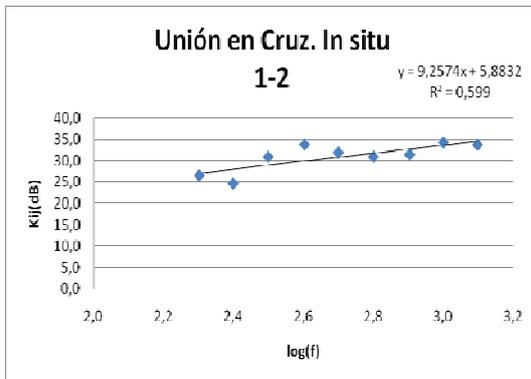


Figura 4.3.8 a) Ajuste con log(f) de valores de Kij a partir de mediciones in situ. Unión en Cruz con elementos flexibles insertados.

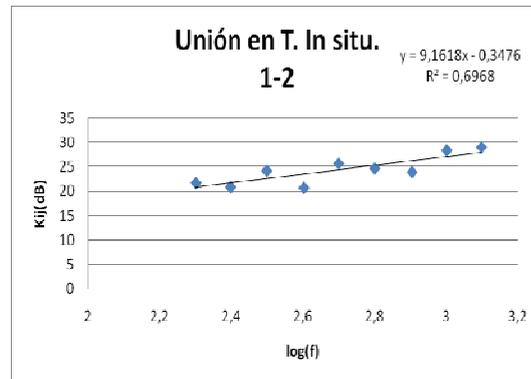


Figura 4.3.8 b) Ajuste con log(f) de valores de Kij a partir de mediciones in situ. Unión en T con elementos flexibles insertados.

En las figuras 4.3.7 y 4.3.8 se observan valores de correlaciones superiores a los ajustes representados en la figura 4.3.6. Estos valores son más próximos a la unidad en los ajustes representados en la figura 4.3.7, ajustes que representan la transmisión 1-3. También se puede observar que en el caso de la transmisión 1-3, las pendientes de las rectas de ajuste se acercan a las pendientes que se obtienen a partir de las ecuaciones empíricas que describen esta transmisión, esto es, presentan un valor en torno a 20. Lo mismo ocurre con los ajustes de las mediciones in situ de la transmisión 1-2. En este caso los valores de la pendiente están en torno a 10.

#### **4.4. OBTENCIÓN DE LÍMITES DE MEDIDA EN UNA CÁMARA DE TRANSMISIÓN**

En este apartado se muestra un estudio de las cámaras acústicas situadas en el Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile, en el Campus Miraflores en Valdivia, Chile. Todos los ensayos experimentales han sido realizados durante el mes de Agosto de 2009 disfrutando de una estancia de investigación.

En ese momento, las cámaras acústicas no estaban del todo terminadas pero sí se permitió realizar ensayos de los parámetros necesarios para el estudio de las transmisiones laterales. El diseño de la cámara está pensado para poder hacer uso como cámara reverberante y como cámara de transmisión. En este punto nos centramos en esta segunda aplicación, es decir, como cámara de transmisión.

Los ensayos que se pueden realizar en esta cámara debido a la distribución que presenta son: ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo según la norma UNE-EN ISO 140-3:1995 [UNE140-3] y ensayos de la mejora a ruido de impactos según la norma UNE-EN ISO 140-8:1998 [UNE140-8]. Ambas normas se refieren a mediciones en laboratorio donde hay que asegurar que las magnitudes acústicas ensayadas se refieren solamente a los elementos constructivos ensayados y no se ven afectadas por las condiciones de contorno. Para esto, no deben existir las transmisiones indirectas, o al menos, estas se deben intentar minimizar. Los valores que se obtienen de estos ensayos serán utilizados como valores de entrada en los modelos predictivos descritos en el punto 2.2.2.

En la norma UNE EN ISO 140-1:1998 [UNE140-1] se determinan los requisitos de las instalaciones de laboratorio para cumplir esta condición. A continuación se resumen estos requisitos:

- Volumen mínimo de las cámaras  $50\text{m}^3$
- Diferencia de volúmenes entre las cámaras de al menos un 10%

- Las proporciones entre las dimensiones de las cámaras deben de ser tal que las frecuencias modales a bajas frecuencias están tan separadas uniformemente como sea posible.
- Ante la presencia de ondas estacionarias en las cámaras se debe instalar elementos difusores.
- El tiempo de reverberación en cada cámara debe cumplir la siguiente expresión:

$$1 \leq T_R \leq 2 \left( \frac{V}{50} \right)^{2/3} \quad (4.4.1)$$

Donde V es el volumen de la cámara en m<sup>3</sup>.

- Las transmisiones indirectas, deben de ser despreciables comparadas con el sonido transmitido a través de la probeta sometida a ensayo.
- Hay que valorar la influencia del factor de pérdidas interno,  $\eta$ , de la estructura que rodea la muestra. Si la muestra a ensayar es ligera,  $m < 150 \text{kg/m}^2$ , no hay requisito especial a cumplir. Para el ensayo de estructuras más pesadas, existe un factor de pérdidas interno mínimo,  $\eta_{\min}$ , para poder realizar el ensayo:

$$\eta_{\min} = 0,01 + \frac{0,3}{\sqrt{f}} \quad (4.4.2)$$

La normativa UNE EN ISO 140-3: 1995 [UNE140-3] referencia a la UNE EN ISO 140-1: 1997 para la disposición de las cámaras en el ensayo de aislamiento a ruido aéreo. En la figura 4.4.1 se puede observar un esquema de esta disposición y de los caminos de transmisión en las condiciones de ensayo.

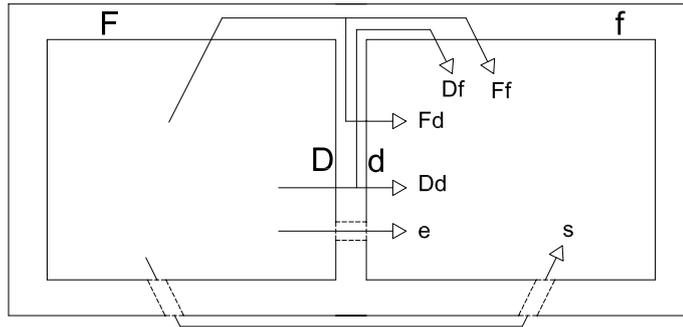


Figura 4.4.1 Caminos de transmisión en una instalación de ensayo del aislamiento a ruido aéreo.

La disposición de las cámaras y el esquema de los diferentes caminos de transmisión indirectos para los ensayos de mejora a ruido de impactos se observan en la figura 4.4.2. Según se indica en [UNE140-8] la cámara superior se designa como cámara emisora y la inferior como cámara receptora. Están separadas por un forjado normalizado en el cual será instalado el revestimiento bajo ensayo.

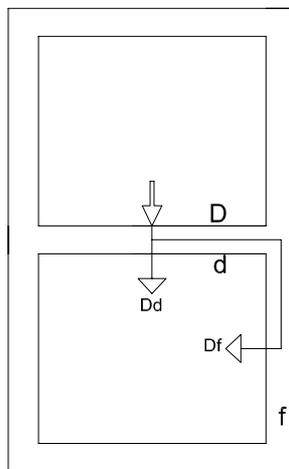


Figura 4.4.2 Caminos de transmisión en una instalación de ensayo de la reducción a ruido de impactos.

Es necesario conocer el valor de  $R'_{max}$  que es el índice de reducción acústica máximo que puede ensayarse en un laboratorio, sin que éste se vea afectado significativamente por transmisiones indirectas. La expresión para obtener el índice de reducción sonora ha sido descrita en la sección 2.2. Recordemos que el

índice de reducción acústica depende de los índices de reducción de las transmisiones directas e indirectas y que para obtener estas últimas es necesario conocer los índices de reducción vibracional de diferentes flancos. Por lo tanto, siguiendo el método descrito en la norma UNE EN ISO 10848-1:2007 [UNR10848-1] se ha obtenido el índice de reducción de vibraciones de dos de las transmisiones por flancos de la cámara, suponiendo simetría para obtener todas las transmisiones por flancos necesarias.

En la figura 4.4.3 se muestran algunas imágenes de los puntos de medida durante los ensayos de los niveles de velocidad. Las figura 4.4.3 a) y 4.4.3 b) son imágenes de uno de los laterales de la cámara de transmisión.



Figura 4.4.3 a)



Figura 4.4.3 b)



Figura 4.4.3 c)



Figura 4.4.3 d)



Figura 4.4.3 e)



Figura 4.4.3 f)

En la figura 4.4.4 a) se muestra la diferencia de niveles de velocidad que se han ensayado, comparadas con el límite establecido por la desigualdad 4.1.5 y para todo el rango de frecuencias de registro del analizador de doble canal utilizado. En la figura 4.4.4 b) se muestra el índice de reducción de vibraciones que se obtiene a partir de estos valores y en el rango de frecuencias de interés, este es, de 200 Hz hasta 1250Hz. A partir de estos valores se obtiene un valor global del índice de reducción vibracional para la transmisión medida, esta es, esquina formada entre la losa de impacto y la pared en la que se encuentra la puerta de entrada a una de las cámaras, transmisión que hemos denominado como 13A.

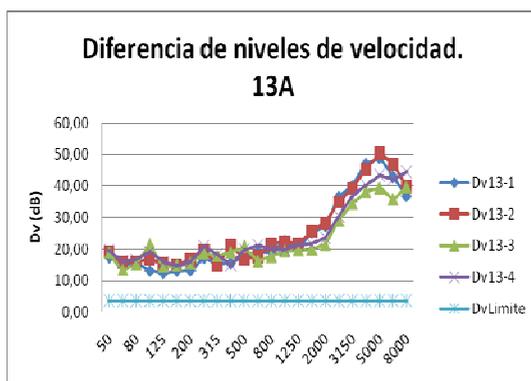


Figura 4.4.4 a)

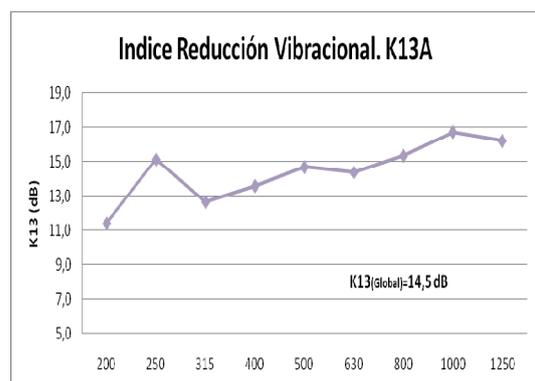


Figura 4.4.4 b)

Figura 4.4.4 Valores medidos de la diferencia de niveles de velocidad en la configuración 13A de la cámara de transmisión y  $K_{ij}$  a partir de las mediciones.

El valor global del índice de reducción de vibraciones para la transmisión 13A es de 14,5 dB.

Se sigue el mismo esquema de presentación para la transmisión entre la unión formada por la pared lateral y la losa de impacto, transmisión que hemos denominado como 13B. Los resultados se muestran en la figura 4.4.5.

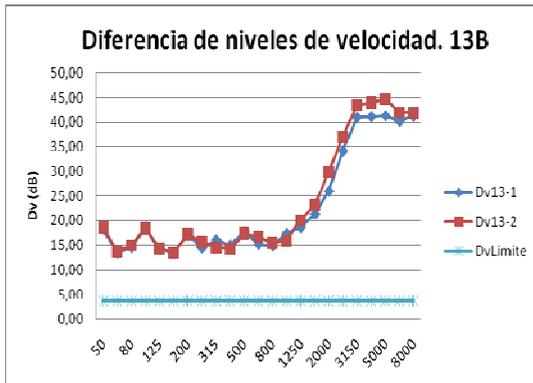


Figura 4.4.5 a)

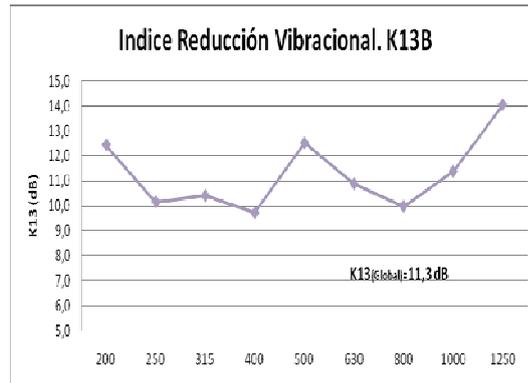


Figura 4.4.5 b)

Figura 4.3.5 Valores medidos de la diferencia de niveles de velocidad en la configuración 13B de la cámara de transmisión y  $K_{ij}$  a partir de las mediciones.

Para esta transmisión el valor global del índice de reducción de vibraciones es de 11,3 dB.

A partir de los valores de los índices de reducción de flancos podemos obtener los valores de los índices de reducción acústica de diferentes configuraciones en cámara y obtener así el índice de reducción máxima,  $R'_{max}$ , que limitará la capacidad para la realización de ensayos. Concretamente se han estudiado tres tipos de configuraciones distintas: paneles ligeros, pared ligera de albañilería y pared de albañilería pesada. Para cada uno de estos tipos de paredes se va aumentando el valor del índice de reducción sonora, R, y se obtiene el valor que nos daría el ensayo en cámara R'. Si R y R' son similares, la cámara todavía no ha saturado y podemos seguir aumentando el valor del aislamiento de la pared sometida a ensayo, hasta que la diferencia entre R y R' sea notable. En ese caso se

ha llegado a la saturación de la cámara y se ha encontrado el valor máximo que la cámara de transmisión, para este tipo de paredes puede medir,  $R'_{\max}$ .

En el caso que nos ocupa, este procedimiento para obtener  $R'_{\max}$  se ha obtenido mediante simulación. Los valores de los índices de reducción vibracional medidos se han utilizado como dato de entrada en los modelos de predicción descritos por [UNE12354-1] y expuestos en la sección 2.2. De esta forma podemos obtener el valor que obtendríamos del aislamiento del elemento constructivo mediante el ensayo en la cámara y compararlo con el valor, que también se utiliza como dato de entrada, que el catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación [DB-HR] nos proporciona para el mismo elemento. La simulación se ha podido realizar además, mientras la cámara de transmisión se encontraba todavía en construcción, por lo tanto hubiera sido posible minimizar cualquier deficiencia de la cámara si hubiera sido necesario, volver a medir las transmisiones por flancos in situ y volver a obtener el  $R'_{\max}$ .

Algunas tablas que representan la simulación realizada se muestran en el Anexo I.

Los valores del máximo índice de reducción acústica alcanzable en la cámara de transmisión estudiada que se obtienen mediante estas simulaciones se muestran en la tabla 4.4.1.

Tipo Pared	$R'_{\max}$ (dBA)
A. Paneles ligeros	61
B. Pared ligera de albañilería	64
C. Pared de albañilería pesada	65

Tabla 4.4.1 Valores del máximo índice de reducción acústica alcanzable para la cámara de transmisión a estudio.

## **5 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS**

En este capítulo se resumen las conclusiones más relevantes de la memoria de Tesis Doctoral presentada. En el apartado 5.1. se relatan las conclusiones más importantes sobre caracterización de materiales. En el apartado 5.2., las conclusiones asociadas a los ensayos y predicción del comportamiento de las transmisiones laterales. En el apartado 5.3., las líneas futuras propuestas.

### **5.1 CONCLUSIONES SOBRE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

Como se ha podido mostrar en el capítulo 3, dedicado a materiales, se ha realizado una amplia campaña de ensayos para obtener los parámetros más significativos para su uso en edificación. Este estudio se ha centrado sobre todo en materiales reciclados o de fibras naturales, y su fin último ha sido aportar nuevas soluciones al aislamiento o el acondicionamiento acústico. Las conclusiones más relevantes de este trabajo referentes a la caracterización de materiales absorbentes se resumen a continuación.

Se ha realizado una amplia campaña de caracterización de materiales para su uso como absorbente acústico, tanto de materiales conocidos, como de otros nuevos procedentes del reciclado y de fibras naturales. Se han determinado parámetros clásicos como la impedancia y el coeficiente de absorción, en un tubo propio construido según la [UNE10534] y se ha estudiado su incertidumbre. Cabe destacar los resultados obtenidos con materiales de fibra de kenaf, ya que se muestra como uno de los de mayor capacidad absorbente acústica de bajo coste.

Se han realizado también ensayos para la obtención de la resistencia al flujo, de forma indirecta, con un método alternativo al propuesto por la norma, abordando también la incertidumbre del método.

A partir de todos los ensayos realizados y al disponer de un abanico de materiales de diferentes orígenes, espesores, densidades e incluso diferente composición micro-estructural; poros o fibras, diferentes diámetros de las fibras, etc. se ha podido realizar un estudio sobre los modelos predictivos del comportamiento acústico de los materiales. Estos modelos han sido revisados y se ha obtenido una

formulación conjunta, en base a toda la campaña de ensayos, obteniendo un modelo global que en principio mejora las aproximaciones dadas por la norma, pudiéndose utilizar en un abanico más amplio de materiales.

Se ha obtenido también un modelo propio para el material absorbente acústico basado en fibra de Kenaf [Ram10].

Otra de las variables estudiadas ha sido la rigidez dinámica. También se ha obtenido la rigidez dinámica de nuevas láminas para su uso en suelos flotantes, estudiando con detalle la incertidumbre del método de ensayo y sus limitaciones.

## **5.2 CONCLUSIONES SOBRE TRANSMISIONES LATERALES.**

Para poder estudiar la influencia de las transmisiones laterales en el valor del aislamiento global de todo el conjunto constructivo ha sido necesario estudiar con detenimiento el índice de reducción de vibraciones,  $K_{ij}$ . Para ello se ha analizado cada una de las magnitudes necesarias para obtener este índice. En concreto aquellas que se deben determinar de forma experimental, aunque en algunos casos existen expresiones que bajo ciertas limitaciones nos permitan obtenerlas. Estas magnitudes son la diferencia de niveles de velocidad y el tiempo de reverberación estructural.

La diferencia de niveles de velocidad se ha estudiado con detenimiento siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE EN ISO 10848:2007 [UNE10848-1]. A continuación se resumen las conclusiones de todas las mediciones realizadas y de los análisis de estas mediciones.

En el procedimiento descrito por la normativa [UNE10848-1] para la medición de la diferencia de niveles de velocidad en laboratorio, se describe que es suficiente con tres posiciones de pares de medida y tres posiciones de transductor asociadas a cada una de las tres posiciones de excitación. Se ha podido comprobar mediante un análisis estadístico de los valores de las diferencias de niveles de velocidad que las desviaciones asociadas en este caso son bastante significativas y que se reduce la incertidumbre de forma significativa si se realizan ensayos de por lo menos

cinco pares de puntos. Sin embargo, la reducción de la incertidumbre del paso de cinco a siete pares no justifica el esfuerzo que hay que invertir.

También se ha estudiado la influencia del número de puntos de medida desde el punto de vista de la exactitud como método de medición, mediante el método GUM (The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). A partir de los resultados que se obtienen de este estudio se concluye que la diferencia de nivel de velocidad debe ser medida de forma simultánea. Esto es, se debe tomar como una variable de entrada en el análisis (y no como dos) el nivel en  $i$  cuando se excita  $i$  ( $L_{ii}$ ) y el nivel de  $j$  cuando se excita  $i$  ( $L_{ji}$ ). Si se consideran los valores  $L_{ii}$  y  $L_{ji}$  como valores independientes, la incertidumbre asociada a la medida es muy elevada, y en algunas ocasiones del mismo orden de magnitud que la propia medida.

El tiempo de reverberación estructural también juega un papel importante en la determinación del índice de reducción de vibraciones. Se puede obtener tal y como se describe en la norma UNE EN ISO 10848-1:2007 [UNE10848-1] que hace referencia a la UNE EN 3382-2:2008 [UNE3382-2] o se puede estimar bajo ciertas limitaciones. Las conclusiones sobre este parámetro se repasan a continuación.

Se han realizado múltiples ensayos de este parámetro. La tendencia según la frecuencia suele ser la misma, con una zona de “pico” en los alrededores de la frecuencia de resonancia del material y decreciente a partir de esa frecuencia.

En los modelos que se describen en la norma UNE EN 12354-1: 2000 [UNE12354-1] se obtiene un valor global de diferentes magnitudes como media aritmética de los valores que presenta la magnitud estudiada en las bandas centrales desde 200Hz hasta 1250Hz. Existe un caso particular en el que se permite obtener el tiempo de reverberación estructural global como el valor que presenta a 500Hz, sobre todo para elementos ligeros y elementos dobles. Se ha comprobado que para medianeras de doble ladrillo y medianeras de elementos ligeros, la diferencia entre el valor a 500Hz o el valor promediado entre 200Hz y 1250Hz apenas difieren en un 10%, por lo que esta aproximación, al menos en estos casos, es una buena estimación.

Según la normativa, el tiempo de reverberación estructural para elementos constructivos con una masa superficial menor de  $800 \text{ kg/m}^2$  se puede estimar considerando un valor del factor de pérdidas interno de 0,01. Comparando resultados de ensayo con las estimaciones de la norma se observan desviaciones importantes que aconsejan mayor precisión en el valor del factor de pérdidas.

El análisis de las diferentes magnitudes que influyen en el valor de  $K_{ij}$  ha sido necesario para poder obtener el valor in situ del índice de reducción de vibraciones. Además se han obtenido valores a partir de simulaciones mediante un modelado en dos dimensiones. Ambos casos se han comparado con los valores empíricos que nos ofrecen las ecuaciones que describen diferentes casos en la norma UNE EN 12354-1:2000 [UNE12354-1] y que son reproducidas en el Código Técnico de la Edificación [DB-HR].

Las conclusiones de estas comparaciones se detallan a continuación, tanto para el estudio de uniones rígidas como para el estudio de uniones con suelos flotantes.

Se han realizado simulaciones para diferentes densidades superficiales ( $m'$ ) de los elementos constructivos. Éstas no encajan con los valores supuestos con la norma [UNE12354-1] en muchos casos.

También se ha simulado el procedimiento de medida descrito en [UNE10848-1]. Se ha observado que las posibles limitaciones que presenta el procedimiento de medida debido a las condiciones de contorno son más fuertes en la unión de ambos elementos constructivos que en los límites de éstos.

Respecto a los ensayos para obtener el índice de reducción vibracional, realizadas tanto en maqueta como en edificaciones, estos han dado valores superiores a los obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas, tanto en uniones en Cruz como en uniones en T.

En el caso de suelos flotantes, la normativa no especifica ninguna ecuación explícita. Para estos casos, la transmisión se debe estudiar como un caso rígido (excluyendo incluso las masas de los elementos flexibles para realizar los cálculos) y después añadir una mejora al aislamiento global para considerar el efecto de la lámina elástica. En esta memoria se han comparado datos “in situ” y

empíricos de suelos flotantes con uniones rígidas o con elementos flexibles insertados, aún sabiendo que en ningún caso son representativas de la realidad.

Al realizar estas comparaciones se ha podido observar que los valores obtenidos in situ y por simulación no coinciden con los valores empíricos que nos ofrece la normativa [UNE12354-1]. Difieren mucho en el caso de compararlos con uniones rígidas y se acercan más en el caso de compararlos con elementos flexibles insertados en las uniones.

Otra cuestión importante observada es que al insertar la lámina flotante existe una dependencia clara con la frecuencia. El índice de reducción de vibraciones en general aumenta con la frecuencia. Se ha ajustado en algunos casos esta dependencia con la frecuencia para las láminas estudiadas.

### **5.3. LÍNEAS FUTURAS**

Las futuras líneas propuestas son las siguientes.

Referentes a la caracterización de materiales:

- Ampliar la caracterización a más materiales reciclados o basados en fibras textiles. En la actualidad se están ensayando materiales reciclados o materiales con base de fibras de plantas que se irán incorporando al mercado.
- Valorar las aplicaciones de los nuevos materiales. Por ejemplo, se pretende también estudiar la utilización del kenaf en contaminación acústica. Podría ser una buena alternativa utilizar estos bio-materiales en pantallas acústicas, ya que además de realizar la función de materiales absorbentes, se mejoraría el impacto visual.
- Se plantea abordar otros modelos como los propuestos por Voronina, y otros autores, para mejorar las predicciones y estudiar la influencia de otros parámetros, como la porosidad, tortuosidad o factor de estructura.

- Plantear nuevos modelos que relacionen la rigidez dinámica con el factor de pérdidas y poder así mejorar la predicción del comportamiento en suelos flotantes.

Referentes a las transmisiones laterales:

- Estudiar la validez de las aproximaciones sobre las longitudes de absorción equivalentes a partir de las cuales se da una expresión del índice de reducción acústica por flancos. Esta expresión es la base de cálculo en el Código Técnico de la edificación [DB-HR].
- A partir de las mediciones realizadas in situ del tiempo de reverberación estructural intentar ajustar mejor las ecuaciones que [UNE12354-1] nos ofrece como estimaciones.
- En cuanto a la simulación de las transmisiones surgen necesidades de continuidad como:
  - Ampliar el modelado en dos dimensiones a tres dimensiones, dado que el modelo 2D presenta limitaciones en la posible distribución de modos de vibración. En esta línea se ha empezado a trabajar, tal y como se muestra en las siguientes imágenes.

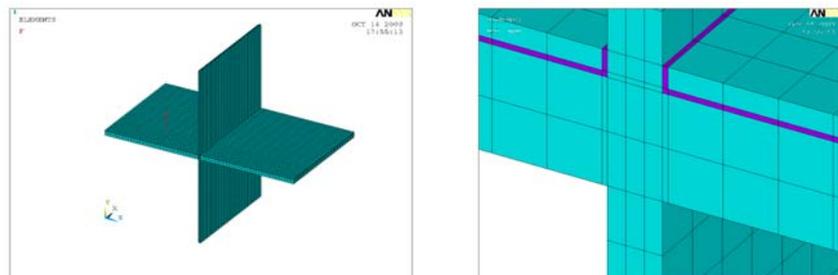


Figura 5.1 Detalle de la simulaciones en 3D de la unión en Cruz y unión en Cruz con lámina flotante.

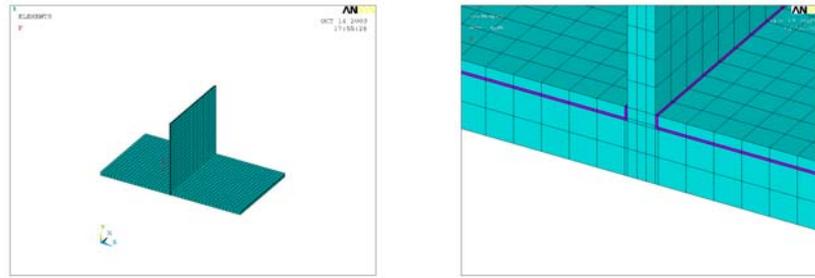


Figura 5.2 Detalle de la simulaciones en 3D de la unión en T y unión en T con lámina flotante.

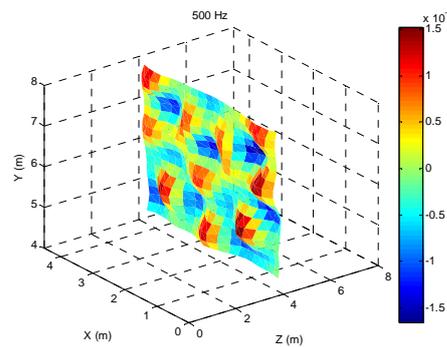


Figura 5.3 Ejemplo de modos propios de vibración en un entorno de 3D.

- Simular diferentes combinaciones de densidades superficiales para poder obtener así diferentes resultados dependientes de la relación de masas,  $M$ , tanto en simulaciones rígidas como con simulaciones con suelos flotantes.
- Simular diferentes materiales de base con diferentes valores de factor de pérdidas internos y estudiar la evolución de los resultados.
- Simular no solo el proceso de ensayo de las diferencias de niveles de velocidad sino también el procedimiento experimental del tiempo de reverberación estructural.

## REFERENCIAS

- [Alb00] Alba Fernández, Jesús. Tesis Doctoral. Algoritmos de modelado de particiones multicapa para la predicción de su aislamiento acústico a ruido aéreo.2000.
- [Alb05] Alba, J. Lorenzana M.T., Ramis, J. Modelado de materiales absorbentes acústicos a partir de mediciones en tubo de Kundt. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2005 (Granada).
- [Alb06] Alba, J., Ramis, J., Julià, E., Escuder, E. “Incertidumbre en la medida del coeficiente de absorción para incidencia normal”. V Congreso Iberoamericano de Acústica. Santiago de Chile. Octubre 2006.
- [Alb08] Alba, J., Ramis J., Lorenzana M<sup>a</sup>. T., y del Rey R. Propuesta de modelo empírico para materiales absorbentes acústicos. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño de ingeniería. Vol. 24. Pag.147-162.2008
- [Albr08] Alba, J., Ramis, J., Escuder, E., del Rey, R. Effect of the estimation of the wall/floor junction type on the acoustic isolation.Acoustics’08. Paris. 29 Junio-4 Julio 2008.
- [All85] Allard J. F., Delage P. Free field measurement of absorption coefficients on square of absorbing materials. Journal of Sound and Vibration (1985) 101(2), 161-170
- [All92] Allard J. F., Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. J. Acoust. Soc. Am. 91 (6), (1992) 3346 –3353.
- [Alo08] Alonso Rodríguez y Manuel A. Sobreira. Resultados previos en la simulación numérica de elementos de la construcción. Sociedad Española Acústica. Acoustics’08.Coimbra. 2008
- [Ans71] ANSYS, Inc. “[www.ansys.com](http://www.ansys.com)”. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317

[**Bar04**] Baron, N., Bonfiglio, P., Fausti, P. Dynamic Stiffness of materials Used For Reduction in Impact Noise: Comparison Between Different Measurement Techniques. *Acústica 2004*, Guimaraes.

[**Bar07**] Barbaresi Luca, Sempreni Giovanni. Laboratory measurements of the flanking transmission for brick wall junctions. 19<sup>th</sup> International Congress on acoustics. Ica 2007 Madrid. 2007

[**Bie80**] Bies D. A., Hansen C. H. Flow resistance information for acoustical design. *Applied Acoustics*, Vol.13, pp.357-391 (1980).

[**Cha90**] Champoux, Y., Stinson, R. Measurement of the characteristic impedance and propagation of materials high flow resistivity *J. Acoust. Soc. Am.* 90 (4)

[**Cou43**] Courant, R. Variational Methods for the solution of Problems of Equilibrium and Vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society*, Vol. 49, Providence, RI, 1943, pp. 1-23.

[**Cro69**] Crocker M. J and Price A.J. Sound transmission using statistical energy analysis. *J. Sound Vib.* 9 (1969) 469-486.

[**Dav09**] David K. Anthony. Los errores de discretización en la medida del amortiguamiento mediante un método exacto para un sistema con amortiguamiento viscoso o histetérico no ligero. *Tecniacústica 2009*. Cádiz.

[**DB-HR**] REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación

[**Del70**] Delany M.E. Bazley E.N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics* 3, (1970), 105 -116

[**Dun86**] Dunn I. P., Davern W. A. Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers. *Applied Acoustics* 19 (1986), 321-334

[**Fer95**] Fertis, D.G. Mechanical and structural vibration. John Wiley&Sons, INC, Cidade de Publicação, 1995.

- [**Gar05**] Garai M., Pompoli F. A simple empirical model of poliéster materials for acoustical applications. *Applied Acoustics* 66 (2005), 1383-1398
- [**Ing85**] Ingard K. U., Dear T. A. Measurement of acoustic flow resistance. *J. Sound Vib.* 103(4), (1985) 567-572
- [**ISO2631**] ISO 2631-2:2003. Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). (2003)
- [**ISO5725**] ISO 5725:1997. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. 1- General principles and definitions.
- [**ISO7626**] ISO 7626-5:1994. Vibration and Shock. Experimental determination of mechanical mobility. Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure.
- [**Jul06**] Julà, E., Alba, J., del Rey, R., Ramis, J. “Incertidumbre en la medida de la resistencia al flujo en el método de Ingard&Dear”. *Tecniacústica* 2006. Gandia. España.
- [**Lor04**] Lorenzana. M.T., Vidaurrágaza D., Álvarez J.A., Carro, G., González, J., “Propiedades acústicas de materiales obtenidos de productos ecológicos”. IV Congreso Ibérico de Acústica, Guimaraes (2004).
- [**Mar06**] Martín Bravo, M.A, Tarrero Fernández, A.L, Aparicio Colina, A, González Suárez, J, Machimbarrena Gutiérrez, M. Determinación del índice de reducción vibracional y análisis de los parámetros involucrados. *Tecniacústica* 2006. Gandia. 2006
- [**Mik90**] Miki Y. “Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Modifications of Delany&Bazley models” *J. Acoust. Soc. Jpn (E)* 11, 1 (1990) 19-24
- [**Miky90**] Miki Y. “Acoustical properties of porous materials-Generalizations of empirical models” *Journal of the Acoustical Society Jpn (E)* 11, 1 (1990) 25-28.

[Nev08] Neves, Ana.; António Julieta.; Nossa Ana. Resultados Experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes. Acústica 2008. Coimbra

[Ram10] Ramis J., Alba J., del Rey R., Escuder E., Sanchís V. Nuevos Materiales Absorbentes Acústicos Basados en fibras de Kenaf. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Materiales de Construcción. 2010

[Ren93] M. Ren , F. Jacobsen. A method of Measuring the Dynamic Flow Resistance and Reactance of porous Materials. Applied Acoustics 39, 265-276, 1993.

[Rey07] Del Rey R., J. Alba., Sanchís, V., Sanabre B., Julià. E. Valoración de la absorción acústica de materiales reciclados. IV Congreso: La Investigación ante la sociedad del Conocimiento. Sostenibilidad y Medio Ambiente. Noviembre 2007.

[Rey08] Del Rey Tormos, Romina; Alba Fernández, Jesús; Pastor Gimeno, José; Escuder Silla, Eva; Estruch Fuster, Vicente. Incertidumbre del cálculo del índice de reducción vibracional en función del número de medidas de la diferencia de velocidades. Sociedad Española Acústica. Acoustics'08.Coimbra. 2008

[Rey09] del Rey Romina, Alba Jesús, Escuder Eva, Estruch Vicente, Pastor Jose. Uncertainty of difference measures of speed level for the validity of the method of measure. ISCV 16 (16 International Congress on sound and Vibration). Krakov. Polonia.2009

[Reya09] Del Rey Tormos, Romina; Alba Fernández, Jesús; Ramis Soriano, Jaime; Escuder Eva. Nuevas formulas empíricas para la obtención del índice de reducción vibracional de uniones con suelos flotantes. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería . Barcelona.2009

[Sim06] Simón Francisco, K.Anthony, Fernández MªJosé. Estudio de cinco métodos para determinar las propiedades dinámicas de capas elásticas para la mejora del aislamiento a ruido de impactos. Tecniacústica 2006, Gandia.

[Sti83] Stinson, R. , Daigle, A."Electronic system for the measurement of flow resistance" J. Acoustc. Soc. Am. 83 (6)

[UNE140-1] UNE EN ISO 140-1: 1998. Acústica. Medición del aislamiento acústico de edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Requisitos de las instalaciones de laboratorio sin transmisiones indirectas. (ISO 140-1:1997)

[UNE140-3] UNE EN ISO 140-3: 1995. Acústica. Medición del aislamiento acústico de edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción.

[UNE140-4] UNE EN ISO 140-4: 1999. Acústica. Medición del aislamiento acústico de edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición “in situ” del aislamiento de ruido aéreo entre locales. (ISO 140-4:1998).

[UNE140-7] UNE EN ISO 140-7: 1999. Acústica. Medición del aislamiento acústico de edificios y de los elementos de construcción. Parte 7: Medición in situ del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos (ISO 140-7:1998).

[UNE140-8] UNE EN ISO 140-8: 1998. Acústica. Medición del aislamiento acústico de edificios y de los elementos de construcción. Parte 8: Medición en laboratorio de la reducción del ruido de impactos transmitido a través de revestimientos de suelos sobre forjado normalizado (ISO 140-8:1997).

[UNE354] UNE EN ISO 354: 2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante (ISO 354:2003).

[UNE717] UNE EN ISO 717-2:1997. Acústica .Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos (ISO 717-2:1996).

[UNE10534] UNE-EN 10534-2:2002. Acústica. “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia.”. Parte 2: Método de la función de transferencia.

[UNE10848-1] UNE-EN ISO 10848-1:2007. Acústica. 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)

[UNE10848-2] UNE-EN ISO 10848-2:2007. Acústica. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos

adyacentes. Parte 2: Aplicación a elementos ligeros cuando la unión tiene una influencia pequeña. (ISO 10848-2:2006)

[UNE12354-1] UNE EN 12354-1:2000 Acústica de la edificación. 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 (ISO 140-7:1998).

[UNE12354-2] UNE EN 12354-2:2001 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos

[UNE12354-6] UNE EN 12354-6:2004. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 6: Absorción sonora en espacios cerrados.

[UNE29052] UNE EN ISO 29052-1: 1994. Acústica. Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1: Materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas. (ISO 9052-1:1989). (Versión oficial EN 29052-1:1992).

[UNE29053] UNE EN 29053:1994 Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo del aire. (ISO 9053:1991)

[UNE3382-2] **UNE EN 3382-2:2008.** Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008)

[Vor94] Voronina N. Acoustics properties of fibrous materials. Applied Acoustics 42 (1994), 165-174

[Wil97] Wilson , D.K. Simple, relaxational models for the acoustical properties of porous media. Applied Acoustics 50 (1997), 171-188

[Zie67] Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K.K.The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. McGraw-Hill, London, 1967

[Zie93] Zienkiewick O. C., Taylor R. L. El método de los elementos finitos, 4ª edición Mc Grau Hill, CIMNE (Barcelona) Volumen 1 y 2 (1993)

# ANEXO I

Simulaciones realizadas para obtener el valor máximo del índice de reducción acústica para la cámara de transmisión del Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile, Campus Miraflores, Valdivia.

Datos de Entrada															
Elemento Separador															
Ancho $l_1$ (m)	4	Alto $l_2$ (m)	2,55	Superficie $S_e$ (m <sup>2</sup> )		10,2									
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{f,A}$	Revestimiento Recinto Emisor	$\Delta R_{0,A}$	Revestimiento Recinto Receptor	$\Delta R_{d,A}$								
YL 2x12,5 + AT MW 70 + YL 12,5 + SP + AT MW 70 + YL 2x12,5		65,0	55,0	Sin revestimiento	0	Sin revestimiento	0								
Recinto Emisor															
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{f,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$									
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F4 (Techo y Lateral)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Recinto Receptor															
Volumen $V_r$ (m <sup>3</sup> )		60													
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{f,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$									
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F4 (Techo)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Uniones de los Elementos Constructivos															
REF	Elemento Estructural Básico	$K_{ff}$	$K_{fd}$	$K_{df}$		Vista en sección lateral	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">RESULTADO ENSAYO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RA TEORICO</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>RA ENSAYADO</td> <td>53,7</td> </tr> <tr> <td>Dif. Teo-Ensayo</td> <td>-1,3</td> </tr> </tbody> </table>	RESULTADO ENSAYO		RA TEORICO	55	RA ENSAYADO	53,7	Dif. Teo-Ensayo	-1,3
RESULTADO ENSAYO															
RA TEORICO	55														
RA ENSAYADO	53,7														
Dif. Teo-Ensayo	-1,3														
Arista 1 (Unión Elemento-Pared Izquierda)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	-5,6	20,9	20,9		Vista en sección lateral									
Arista 2 (Unión Elemento-Pared Derecha)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	-5,6	20,9	20,9		Vista en sección lateral									
Arista 3 (Unión Elemento-Suelo)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	-5,7	21,9	21,9		Vista en sección frontal									
Arista 4 (Unión Elemento-Pared-Techo)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	20,9	25,1	20,9		Vista en sección frontal									

Tipo A : paneles ligeros.

Datos de Entrada															
Elemento Separador															
Ancho $l_1$ (m)	4	Alto $l_2$ (m)	2,55	Superficie $S_e$ (m <sup>2</sup> )		10,2									
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{f,A}$	Revestimiento Recinto Emisor	$\Delta R_{0,A}$	Revestimiento Recinto Receptor	$\Delta R_{d,A}$								
YL 2x12,5 + AT MW 70 + YL 12,5 + SP + AT MW 70 + YL 2x12,5		120,0	85,0	Sin revestimiento	0	Sin revestimiento	0								
Recinto Emisor															
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{f,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$									
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F4 (Techo y Lateral)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Recinto Receptor															
Volumen $V_r$ (m <sup>3</sup> )		60													
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{f,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$									
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0									
Elemento F4 (Techo)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0									
Uniones de los Elementos Constructivos															
REF	Elemento Estructural Básico	$K_{ff}$	$K_{fd}$	$K_{df}$		Vista en sección lateral	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">RESULTADO ENSAYO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RA TEORICO</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>RA ENSAYADO</td> <td>60,6</td> </tr> <tr> <td>Dif. Teo-Ensayo</td> <td>-24,4</td> </tr> </tbody> </table>	RESULTADO ENSAYO		RA TEORICO	85	RA ENSAYADO	60,6	Dif. Teo-Ensayo	-24,4
RESULTADO ENSAYO															
RA TEORICO	85														
RA ENSAYADO	60,6														
Dif. Teo-Ensayo	-24,4														
Arista 1 (Unión Elemento-Pared Izquierda)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	-4,7	18,2	18,2		Vista en sección lateral									
Arista 2 (Unión Elemento-Pared Derecha)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	-4,7	18,2	18,2		Vista en sección lateral									
Arista 3 (Unión Elemento-Suelo)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	-5,2	19,2	19,2		Vista en sección frontal									
Arista 4 (Unión Elemento-Pared-Techo)	Unión en T de elemento de entramado autoportante y elemento homogéneo	18,2	18,5	18,2		Vista en sección frontal									

Saturación Tipo A

Datos de Entrada									
Elemento Separador									
Ancho $l_1$ (m)	4	Alto $l_2$ (m)	2,55	Superficie $S_e$ (m <sup>2</sup> )		10,2			
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{e,A}$	Revestimiento Recinto Emisor		$\Delta R_{e,A}$	Revestimiento Recinto Receptor		$\Delta R_{r,A}$
Enl 15 + LHD 70 + Enl 15 (Ladrillo del 7 enlucido)		97,0	37,0	YL 15 + MW 48 + SP		15	Sin revestimiento		0
Recinto Emisor									
Elemento Estructural Básico		$m'_e$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{e,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{e,A}$			
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo y Lateral)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Recinto Receptor									
Volumen $V_r$ (m <sup>3</sup> )		60							
Elemento Estructural Básico		$m'_r$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{r,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{r,A}$			
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Uniones de los Elementos Constructivos									
REF	Elemento Estructural Básico	$K_{F1}$	$K_{F2}$	$K_{OF}$			RESULTADO ENSAYO		
Arista 1 (Unión Elemento-Pared Izquierda)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	9,6	16,5	16,5		Vista en sección lateral	RA TEORICO	52	
Arista 2 (Unión Elemento-Pared Derecha)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	9,6	16,5	16,5		Vista en sección lateral	RA ENSAYADO	51,9	
Arista 3 (Unión Elemento-Suelo)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	9,3	17,6	17,6		Vista en sección frontal	Dif. Teo-Ensayo	-0,1	
Arista 4 (Unión Elemento-Pared-Techo)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	16,5	35,4	16,5		Vista en sección frontal			

## Tipo B : pared ligera de albañilería

Datos de Entrada									
Elemento Separador									
Ancho $l_1$ (m)	4	Alto $l_2$ (m)	2,55	Superficie $S_e$ (m <sup>2</sup> )		10,2			
Elemento Estructural Básico		$m'$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{e,A}$	Revestimiento Recinto Emisor		$\Delta R_{e,A}$	Revestimiento Recinto Receptor		$\Delta R_{r,A}$
Enl 15 + LHD 70 + Enl 15 (Ladrillo del 7 enlucido)		97,0	37,0	YL 15 + MW 48 + SP		30	Sin revestimiento		0
Recinto Emisor									
Elemento Estructural Básico		$m'_e$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{e,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{e,A}$			
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo y Lateral)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Recinto Receptor									
Volumen $V_r$ (m <sup>3</sup> )		60							
Elemento Estructural Básico		$m'_r$ (kg/m <sup>2</sup> )	$R_{r,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{r,A}$			
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm	1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo)	HORMIGON 350 mm	800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Uniones de los Elementos Constructivos									
REF	Elemento Estructural Básico	$K_{F1}$	$K_{F2}$	$K_{OF}$			RESULTADO ENSAYO		
Arista 1 (Unión Elemento-Pared Izquierda)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	9,6	16,5	16,5		Vista en sección lateral	RA TEORICO	67	
Arista 2 (Unión Elemento-Pared Derecha)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	9,6	16,5	16,5		Vista en sección lateral	RA ENSAYADO	64,0	
Arista 3 (Unión Elemento-Suelo)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	9,3	17,6	17,6		Vista en sección frontal	Dif. Teo-Ensayo	-3,0	
Arista 4 (Unión Elemento-Pared-Techo)	T 0.3 Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)	16,5	35,4	16,5		Vista en sección frontal			

## Saturación TIPO B

Datos de Entrada											
Elemento Separador											
Ancho $l_1$ (m)		4	Alto $l_2$ (m)		2,55	Superficie $S_e$ (m <sup>2</sup> )				10,2	
Elemento Estructural Básico			$m'_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{i,A}$	Revestimiento Recinto Emisor		$\Delta R_{o,A}$	Revestimiento Recinto Receptor		$\Delta R_{e,A}$	
Enl 15 + LP 115 + AT + LP 115 + Enl 15 (doble hoja)			358,0	48,0	SIN REVESTIMIENTO		0	Sin revestimiento		0	
Recinto Emisor											
Elemento Estructural Básico			$m'_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{i,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$				
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm			1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo y Lateral)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Recinto Receptor											
Volumen $V_r$ (m <sup>3</sup> )		60									
Elemento Estructural Básico			$m'_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{i,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$				
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm			1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Uniones de los Elementos Constructivos											
REF		Elemento Estructural Básico			$K_{Ff}$	$K_{Fd}$	$K_{Of}$	RESULTADO ENSAYO			
Arista 1 (Unión Elemento-Pared Izquierda)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			13,5	12,4	12,4		Vista en sección lateral	RA TEORICO	48
Arista 2 (Unión Elemento-Pared Derecha)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			13,5	12,4	12,4		Vista en sección lateral	RA ENSAYADO	47,9
Arista 3 (Unión Elemento-Suelo)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			12,6	12,9	12,9		Vista en sección frontal	Dif. Teo-Ensayo	-0,1
Arista 4 (Unión Elemento-Pared-Techo)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			12,4	23,4	12,4		Vista en sección frontal		

## Tipo C : pared de albañilería pesada

Datos de Entrada											
Elemento Separador											
Ancho $l_1$ (m)		4	Alto $l_2$ (m)		2,55	Superficie $S_e$ (m <sup>2</sup> )				10,2	
Elemento Estructural Básico			$m'_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{i,A}$	Revestimiento Recinto Emisor		$\Delta R_{o,A}$	Revestimiento Recinto Receptor		$\Delta R_{e,A}$	
Enl 15 + LP 115 + AT + LP 115 + Enl 15 (doble hoja)			358,0	48,0	YL 15 + MW 48 + SP		20	Sin revestimiento		0	
Recinto Emisor											
Elemento Estructural Básico			$m'_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{i,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$				
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm			1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo y Lateral)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Recinto Receptor											
Volumen $V_r$ (m <sup>3</sup> )		60									
Elemento Estructural Básico			$m'_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{i,A}$	Revestimiento		$\Delta R_{f,A}$				
Elemento F1 (Pared Izquierda)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F2 (Pared Derecha)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F3 (SUELO)	FORJADO 450 mm			1000,0	68,0	Sin Revestimiento		0			
Elemento F4 (Techo)	HORMIGON 350 mm			800,0	65,0	Sin Revestimiento		0			
Uniones de los Elementos Constructivos											
REF		Elemento Estructural Básico			$K_{Ff}$	$K_{Fd}$	$K_{Of}$	RESULTADO ENSAYO			
Arista 1 (Unión Elemento-Pared Izquierda)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			13,5	12,4	12,4		Vista en sección lateral	RA TEORICO	68
Arista 2 (Unión Elemento-Pared Derecha)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			13,5	12,4	12,4		Vista en sección lateral	RA ENSAYADO	65,2
Arista 3 (Unión Elemento-Suelo)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			12,6	12,9	12,9		Vista en sección frontal	Dif. Teo-Ensayo	-2,8
Arista 4 (Unión Elemento-Pared-Techo)	T 0.3	Unión flexible en T de elementos homogéneos (2 juntas)			12,4	23,4	12,4		Vista en sección frontal		

## Saturación Tipo C

