

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Máster en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Obtención del índice de reducción  
vibracional de uniones elásticas en  
forma de esquina”**

***TESIS DE MÁSTER***

Autor:  
**Laura Bertó Carbó**

Director/es:  
**Jesús Alba Fernández**  
**Romina Del Rey Tormos**

**GANDIA, 2010**

# Índice de reducción vibracional de uniones elásticas en forma de esquina

*Autor:* Laura Bertó Carbó

*Director1:* Jesús Alba Fernández

*Director2:* Romina del Rey Tormos

## RESUMEN

El presente trabajo se ubica en el contexto de la investigación acústica en la edificación. La calidad acústica en cualquier campo es un factor fundamental para una mejor calidad de vida. En el ámbito de la edificación uno de los aspectos más determinantes de una acústica adecuada es el aislamiento acústico de los cerramientos que conforman una determinada construcción. El aislamiento acústico de un determinado cerramiento no depende, únicamente, de la transmisión de ruido a través de dicho cerramiento sino de las transmisiones indirectas, o transmisiones por flancos, a través de los elementos constructivos que atentan contra él y que conforman un recinto. Dichas transmisiones laterales se pueden evaluar mediante el índice de reducción vibracional,  $K_{ij}$ , magnitud relacionada con la transmisión de energía de vibración a través de una unión entre elementos estructurales. Uno de los cambios más importantes que ha introducido el Documento Básico de Protección frente al Ruido reside en la necesidad de instalar bandas de material elástico en las uniones entre elementos constructivos, reduciendo así la transmisión de vibraciones en los encuentros de un cerramiento con paredes, suelos, techos o pilares. En el caso de unión en esquina definida en la Norma EN 12354-1:2000, únicamente se presenta una tipología de unión rígida sin tener en cuenta la inserción de un elemento flexible como intercapa de este tipo de unión. Así pues, el objetivo del presente trabajo es el estudio del índice de reducción vibracional de una unión en esquina cuando se utiliza un material elástico como intercapa en dicha unión.

## ABSTRACT

This work is located in the context of the acoustic investigation in the building. The acoustic quality in any field is a fundamental factor for one better quality of life. In the edification's space, one of the most determining aspects of the acoustic, is the sound insulation of the closings that conform a certain construction. The sound insulation of a certain closing does not depend only of the transmission of noise through this closing but of the lateral transmissions, or transmissions by flanks. These lateral transmissions are evaluated by means of the Vibrational Reduction Index,  $K_{ij}$ , magnitude that describes the transmission of vibratory power through a junction between structural elements. The most important changes that has been introduced by the "Basic Document of Protection against the Noise" resides in the necessity to install elastic bands in the junctions between constructive elements, interrupting the transmission of vibrations in the encounter of a closing with walls, grounds, ceilings or columns. In the case of a corner junction, defined in EN 12354-1: 2000, only a typology of rigid junction it is taken, without having in consideration the insertion of a flexible material as an interlayer of this type of junction. Therefore, our purpose is the study of the Vibrational Reduction Index,  $K_{ij}$ , of a corner junction when we introduce an elastic material as an interlayer in this junction.

---

Autor: Laura Bertó Carbó, email: lauberca@upvnet.upv.es

Fecha de entrega: 06-09-2010

**ÍNDICE**

<b>1. OBJETO Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción .....	3
1.2. Objetivo.....	4
1.3. Estructura de la tesina .....	5
<b>2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
2.1. Normativa de aplicación .....	6
2.1.1. Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación.....	6
2.1.2. UNE EN 29052-1:1994. Determinación de la Rigidez Dinámica.....	6
2.1.3. UNE EN 12354-1:2000. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos.....	7
2.1.4. UNE EN 10848-1:2007. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes.....	9
2.2. Determinación del índice de reducción vibracional.....	10
2.2.1. Diferencia de niveles de velocidad a ambos lados de una unión.....	11
2.2.2. Tiempo de reverberación estructural.....	12
<b>3. DESARROLLO DE LA TESINA.....</b>	<b>13</b>
3.1. Descripción del modelo a escala .....	13
3.2. Ensayos sobre maqueta de la diferencia de niveles de velocidad .....	17
3.2.1. Instrumentación necesaria .....	17
3.2.2. Posiciones de excitación y medición.....	18
3.2.3. Método de medición.....	20
3.2.4. Resultados de diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente.....	21
3.3. Ensayos sobre maqueta del tiempo de reverberación estructural.....	32
3.3.1. Instrumentación necesaria .....	32
3.3.2. Posiciones de excitación y medición.....	33
3.3.3. Método de medición.....	34
3.3.4. Resultados de tiempo de reverberación estructural en el modelo a escala.....	35
3.4. Obtención del índice de reducción vibracional.....	41
<b>4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>45</b>
4.1. Conclusiones .....	45
4.2. Futuras líneas de investigación .....	48
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>49</b>

## 1. OBJETO Y ANTECEDENTES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La preocupación actual por una mejor calidad de vida desde el punto de vista acústico está directamente relacionada, entre otros factores, con una mejor calidad acústica en la edificación. Dicha preocupación ha permitido abrir líneas de investigación sobre el aislamiento acústico en la edificación. Es bien sabido que los valores de aislamiento acústico en laboratorio pueden distar de forma significativa de los medidos in situ y estas diferencias se deben, en gran medida, a las transmisiones laterales a través de los elementos que conforman un sistema constructivo.

Las transmisiones laterales, o transmisión por flancos, se cuantifican a partir del denominado “índice de reducción vibracional”. Esta magnitud queda definida en la Norma EN-12354-1:2000 [2] como la magnitud que relaciona la transmisión de energía de vibración vibratoria a través de una unión entre elementos estructurales y está en función de la diferencia de niveles de velocidad a ambos lados de la unión, de la longitud común de los elementos que componen la unión y del tiempo de reverberación estructural de dichos elementos. Contamos con dos formas de obtener el índice de reducción vibracional:

La primera, de forma teórica, haciendo uso de las fórmulas empíricas dadas en la Norma EN 12354-1:2000 [2], que ofrecen valores orientativos del índice de reducción vibracional pero con la restricción de contar únicamente con un conjunto limitado de condiciones de unión. Además no ofrece valores para determinadas soluciones constructivas que, desde hace años, se están ejecutando en el ámbito de la construcción.

La segunda, de forma experimental, siguiendo las indicaciones dadas en la Norma EN-10848-1:2007 [1], realizando mediciones de la diferencia de niveles de velocidad a ambos lados de la unión en ambas direcciones sobre la misma y del tiempo de reverberación estructural de cada uno de los elementos que conforman la unión a ensayo.

El presente trabajo se centra en la investigación de una única tipología de unión, unión en esquina. Tal y como se ha comentado anteriormente, la Norma EN-12354-1:2000 [2], únicamente cuenta con un conjunto limitado de condiciones de unión. En el caso de unión en esquina, sólo muestra una tipología con características de unión rígida, cuyo índice de reducción vibracional no presenta dependencia frecuencial y no se hace referencia a ningún elemento elástico como intercapa de la unión.

En Abril de 2009 entró en vigor el Documento Básico de Protección Frente el Ruido [5], aprobado a través del Real Decreto 1371/2007 de 19 de octubre y que forma parte del Código Técnico de la Edificación. La entrada en vigor de este documento supone numerosos e importantes cambios en el campo de la acústica. Entre ellos, la necesidad de instalar bandas de material elástico en los encuentros de una partición con paredes suelos o techos con la finalidad de disminuir las transmisiones laterales o transmisiones por flancos, mejorando de esta forma el aislamiento acústico de un determinado cerramiento. No obstante, no debemos pasar por alto que no cualquier material elástico es adecuado para ser empleado como banda, debe cumplir unas ciertas características que veremos con detalle más adelante.

Debemos tener en cuenta que la efectividad de colocar una lámina elástica como intercapa en una unión entre elementos constructivos, está directamente relacionada con las características del material, con el tipo de unión, con el tiempo de reverberación estructural de los elementos que componen la unión, etc, aspectos que veremos con detalle en el desarrollo de la presente tesina.

## 1.2. OBJETIVO

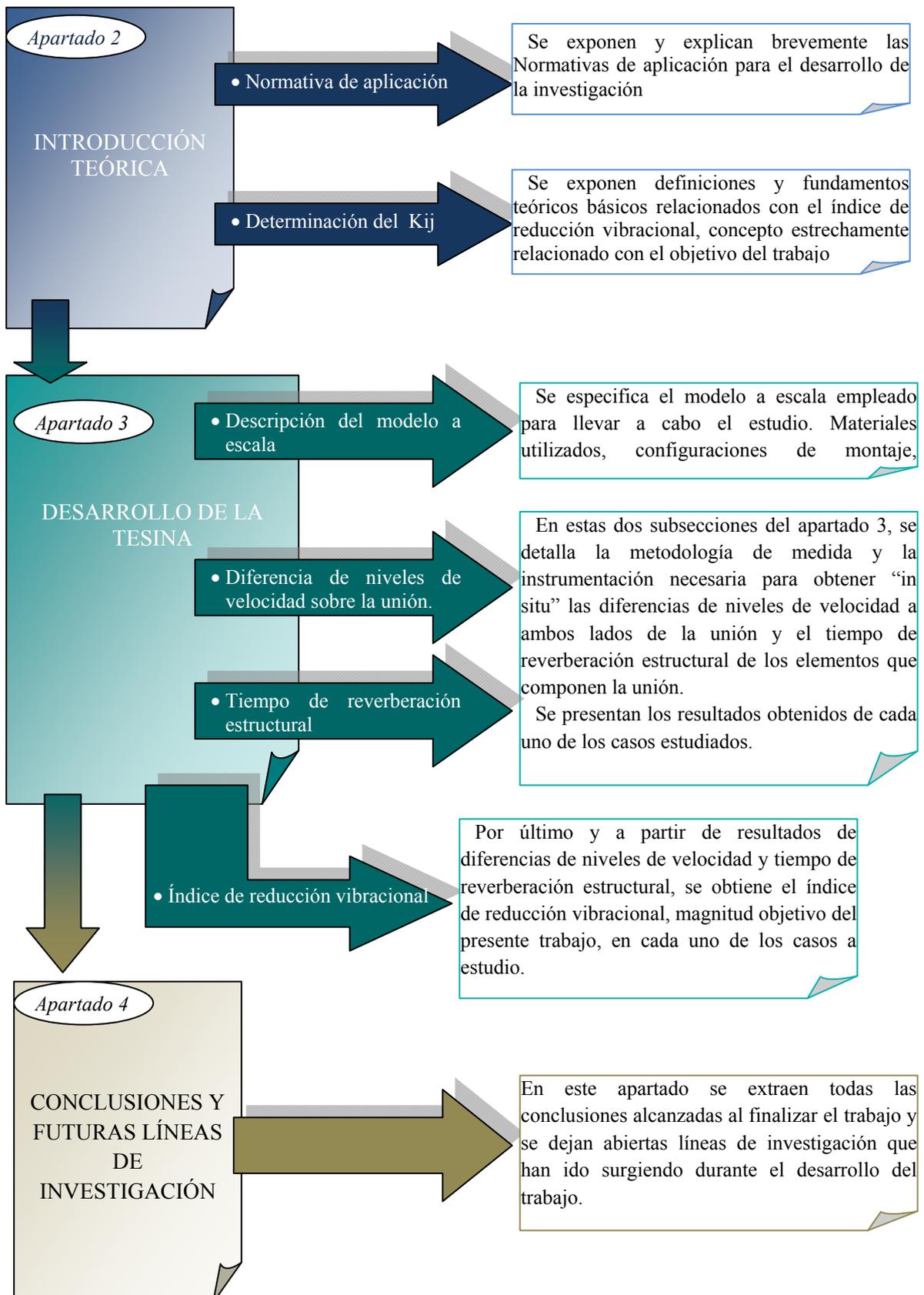
La publicación del Documento Básico de Protección contra el Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) [5] plantea el uso de soluciones constructivas donde en, prácticamente todas las soluciones reconocidas, es necesaria la colocación adecuada de una lámina flotante o de una banda elástica.

El presente estudio tiene como principal objetivo aportar resultados sobre la influencia que puede llegar a tener la interposición de materiales elásticos en unión en esquina, pasando de tener una unión rígida a una unión elástica.

Los resultados obtenidos quedarán cuantificados a través del denominado *índice de reducción vibracional*. Se seguirá el procedimiento de ensayo establecido en la Norma EN 10848-1:2007 [1]. Las pruebas experimentales se realizarán sobre un modelo a escala que reúne las características de una unión en esquina y que está compuesto, fundamentalmente, por policarbonato. Se evalúa el índice de reducción vibracional en el caso de unión rígida e interponiendo bandas elásticas de diferentes características. El estudio se realiza sobre dos configuraciones de montaje distintas, buscando con ello, la configuración más estable para una correcta evaluación.

### 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESINA

La estructura del presente trabajo se divide en tres apartados bien diferenciados, tal y como se muestra en el siguiente diagrama de bloques.



## 2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

A continuación se exponen las normativas de aplicación utilizadas para el desarrollo de la investigación, así como los fundamentos teóricos necesarios para una mejor comprensión de los resultados obtenidos, fruto del alcance del objetivo anteriormente descrito.

### 2.1. *NORMATIVA DE APLICACIÓN*

#### 2.1.1. *Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación.*

En Abril de 2009 entró en vigor el Documento Básico de Protección Frente el Ruido [5], aprobado a través del Real Decreto 1371/2007 de 19 de octubre y que forma parte del Código Técnico de la Edificación. Uno de los principales cambios que introduce este Documento es la necesidad de instalar bandas de material elástico en las uniones para interrumpir la transmisión de vibraciones en los encuentros de un elemento constructivo con suelos, paredes, techos y otras particiones. La principal característica de estos materiales es la rigidez dinámica. El DB-HR del CTE especifica cuál debe ser el valor de la rigidez dinámica de un determinado material para poder ser utilizado como banda elástica en una determinada unión.

#### 2.1.2. *UNE EN 29052-1:1994. Determinación de la Rigidez Dinámica.*

La rigidez dinámica de un determinado material se evalúa según las especificaciones dadas en la Norma EN 29052-1:1994 [4]. Esta parte de la Norma ISO 9052 especifica el método de ensayo que ha de usarse para determinar la rigidez dinámica de materiales elásticos y está destinada, principalmente, a la comparación de muestras de producción de materiales similares con especificaciones de calidad conocidas.

Conocida la normativa necesaria para evaluar las principales características de los materiales que emplearemos como bandas elásticas en nuestro estudio, pasamos a describir la normativa en la que nos basamos para la obtención del índice de reducción vibracional de una unión entre elementos constructivos.

En la actualidad, disponemos de dos conjuntos de normas europeas esenciales para la evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo y a ruido de impacto de elementos constructivos. La evaluación completa de dicho aislamiento acústico conlleva la evaluación del índice de reducción vibracional de uniones, principal objetivo del presente trabajo.

En primer lugar, contamos con el conjunto de Normas Europeas EN 12354:2000 [2] [3], que nos permiten obtener el índice de reducción vibracional de forma empírica y en segundo lugar las Normas Europeas EN 10848:2007 [1] que nos aportan las indicaciones necesarias para obtener dicho parámetro de forma experimental, mediante mediciones “in situ” de las diferencias de niveles de velocidad a ambos lados de una unión y mediciones “in situ” del tiempo de reverberación estructural de los elementos que componen la unión.

### 2.1.3. UNE EN 12354-1:2000. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos.

Las Norma Europeas En 12354:2000, son una serie de normas que especifican modelos de cálculo en la acústica de edificaciones. Cuentan con ciertas limitaciones, ya que, aunque tienen en cuenta los principales tipos de edificaciones, no pueden, de momento, cubrir todas las variaciones en la construcción de edificios. Ofrecen valores orientativos del índice de reducción vibracional, en ciertos casos muy concretos y con condiciones muy limitadas. Las magnitudes involucradas en este conjunto de Normas deben obtenerse fundamentalmente mediante medidas normalizadas en laboratorio. Sin embargo, también podrían deducirse de otras formas, como estimaciones empíricas o tomando resultados de mediciones in situ como valores de entrada.

En el presente trabajo nos centramos en la parte primera del conjunto de Normas EN 12354:2000, la cual cuenta, en su Anexo E, con datos para obtener el índice de reducción vibracional para los tipos habituales de uniones. Sólo existen datos para los casos en los que los elementos a ambos lados de la unión cuentan con la misma masa superficial. Las ecuaciones empíricas que se dan para la estimación de  $K_{ij}$  se basan en  $M$ :

$$M = \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_{\perp j}} \quad (1)$$

Donde

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

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

Se dan ecuaciones empíricas para los diferentes caminos de transmisión de los siguientes tipos de unión:

- 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.
- Unión rígida en esquina o cambios de espesor.

En el presente trabajo nos centramos en uniones en esquina, por lo que a continuación se presenta la ecuación empírica dada en la Norma EN 12354-1:2000 [2] que define esta configuración de unión:

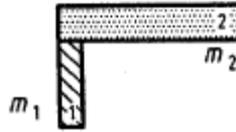


Fig. 1. Unión en Esquina

La ecuación empírica que define este tipo de unión viene dada por:

$$K_{12} = 15|M| - 3dB \text{ y } - 2dB \text{ mínimo } (= K_{21}); 0dB/octava \quad (2)$$

Podemos observar que la ecuación (2) no tiene dependencia frecuencial ni considera el efecto de un elemento elástico. En otras configuraciones, como uniones en T o en cruz, la mejora producida por un material elástico sobre una unión rígida, se caracteriza por una frecuencia,  $f_1$ , definida por D.B. Pedersen [7] [8], como frecuencia crossover, según la ecuación (3).

$$f_1 = 2.5 \cdot 10^{-6} \left( \frac{\sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2}}{G} \cdot d \cdot \frac{h_1}{w} \right)^{-3/2} \quad (3)$$

Donde,  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son las densidades volumétricas de los elementos que componen la unión,  $G$  es el módulo de cizalla,  $h_1$  es la longitud común de los elementos que componen la unión,  $d$  el espesor del material elástico usado como intercapa y  $w$  es la longitud común del elemento elástico y la unión, tal y como se muestra en la siguiente figura:

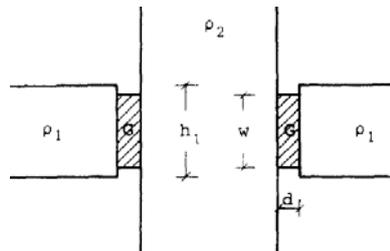


Fig. 2. Unión en Cruz con dos intercapas idénticas

*2.1.4. UNE EN 10848-1:2007. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes.*

En segundo lugar contamos con el conjunto de Normas Europeas EN 10848:2007. La Norma ISO 10848 especifica los métodos de medición que se deben utilizar en un laboratorio de ensayo para caracterizar la transmisión por flancos de uno o varios elementos de construcción. El rendimiento de los elementos de construcción se expresa tanto como una magnitud global para la combinación de unos elementos y la unión (como  $D_{nf}$  y/o  $L_{nf}$ ) o como el índice de reducción vibracional  $K_{ij}$  de una unión.

La parte primera de este conjunto de normas, EN 10848-1:2007 [1] contiene definiciones, requisitos generales para las muestras de ensayo y recintos de ensayo, y métodos de medición. Se describen procedimientos de ensayo para determinar, tanto la diferencia de niveles de velocidad entre los elementos que componen la unión, como el tiempo de reverberación estructural para cada uno de esos elementos. Estas dos magnitudes, tal y como veremos más adelante, son esenciales para poder determinar el índice de reducción vibracional de las uniones a estudio.

Otras partes de esta norma especifican la aplicación para los diferentes tipos de uniones y elementos de construcción.

Las magnitudes que caracterizan la transmisión por flancos se pueden usar para comparar diferentes productos o para expresar un requisito, o como datos de entrada para los métodos de predicción, tales como las Normas EN 12354-1:2000 [2] y EN 12354-2:2000 [3] correspondientes a la primera familia de normas descritas anteriormente.

Es importante mencionar que, actualmente, no existe una norma reconocida para la medición del Índice de Reducción Vibracional “in situ”. No obstante, es habitual trasladar este procedimiento a situaciones “in situ” aunque asimilando una serie de limitaciones.

## 2.2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL

El índice de reducción vibracional,  $K_{ij}$ , queda definido en la Norma EN 12354-1:2000 [2]. Se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas las direcciones de la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la siguiente ecuación:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \text{ dB} \quad (4)$$

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 viene determinada por:

$$a = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (5)$$

Donde:

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

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

$f$  es la frecuencia central de la banda, en hercios.

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

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

En la siguiente figura se puede ver un detalle de unión donde se marca cada elemento y la longitud común entre elementos.

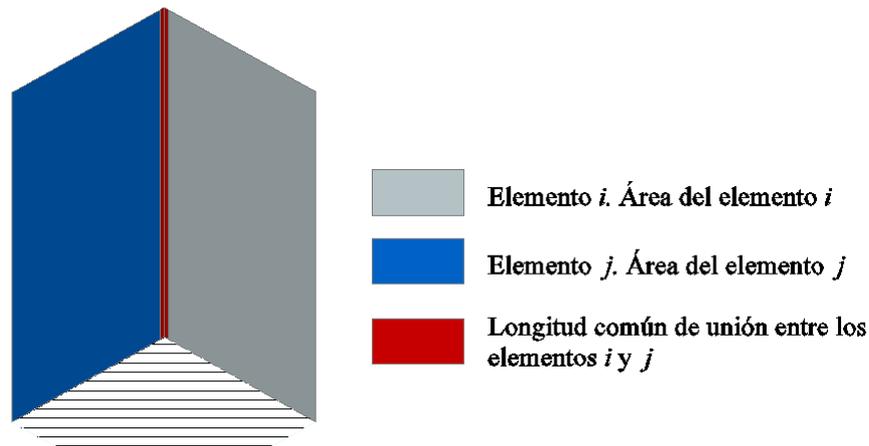


Fig. 3. Unión en esquina de elementos constructivos

Tal y como se especifica en la Norma EN-10848-1:2000 [1], es posible obtener el valor de  $K_{ij}$  utilizando como base las ecuaciones (4) y (5), a partir de la medición “in situ” de la diferencia de niveles de velocidad a través de la unión en ambas direcciones y la medición del tiempo de reverberación estructural de los dos elementos que componen la unión. Además se puede determinar un índice de reducción vibracional global,  $\overline{K}_{ij}$ , como la media aritmética de los índices de reducción vibracional en el rango de frecuencias de 200 Hz a 1250 Hz (en bandas de tercio de octava) o de 125 Hz a 1000 Hz (en bandas de octava) según la correspondiente Norma.

Veamos cada uno de estos parámetros con más detalle.

### 2.2.1. Diferencia de niveles de velocidad a ambos lados de una unión.

Para alcanzar el buscado índice de reducción vibracional, definido en la ecuación (4), es necesario conocer la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos  $i$  y  $j$  en decibelios, cuando el elemento  $i$  es excitado, en dB,  $D_{v,ij}$ , y la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos  $j$  e  $i$  cuando el elemento  $j$  es excitado, en dB,  $D_{v,ji}$ , esto se puede obtener a partir de los niveles de velocidad de la siguiente forma:

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \text{ dB} \quad (6)$$

$$D_{v,ji} = L_{v,j} - L_{v,i} \text{ dB} \quad (7)$$

En el apartado 3.2 del presente trabajo 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,  $K_{ij}$ .

### 2.2.2. *Tiempo de reverberación estructural.*

El tiempo de reverberación estructural,  $T_s$ , es la segunda magnitud fundamental para el estudio, cálculo y determinación del índice de reducción vibracional. Esta magnitud se define como el tiempo que debe transcurrir para que cuando se interrumpe la excitación en una estructura, el nivel de velocidad de vibración,  $L_v$ , de sus partículas disminuya 60dB tal y como se muestra en la Fig. 4 [10]. El interés de las transmisiones indirectas pasa por el conocimiento del tiempo de reverberación estructural. En general, no se dispone de un rango dinámico tan grande, por lo que el tiempo de reverberación estructural se determina extrapolando el valor calculado para la caída de 20 ó 30 dB.

El procedimiento de obtención del tiempo de reverberación estructural quedará descrito con más detalle en el apartado 3.3 del presente trabajo.

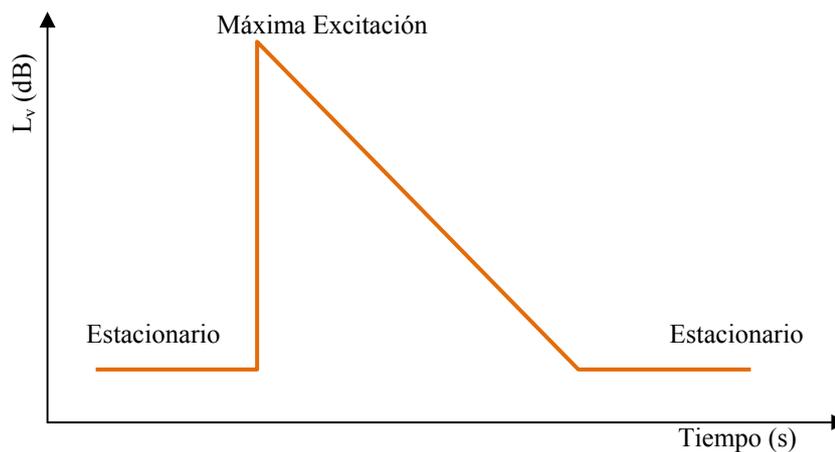


Fig. 4. Variación ideal del nivel de velocidad de un paramento que recibe una excitación impulsiva

### 3. DESARROLLO DE LA TESINA

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO A ESCALA

Tal y como se comenta en apartados anteriores, el presente estudio tiene como principal objetivo aportar resultados sobre la influencia que puede llegar a tener la interposición de bandas elásticas, de características adecuadas, en unión en esquina.

Se evalúa el efecto de la interposición de dos láminas elásticas de distintas características (ver Fig. 8 y 9), respecto a la unión rígida, teniendo en cuenta diferentes configuraciones (ver Fig. 6 y 7), buscando con ello la configuración más estable para una correcta evaluación.

Es evidente la dificultad de llevar a cabo este tipo de ensayos en edificaciones reales. El montaje y desmontaje de una determinada unión en una edificación real supondría un tiempo y esfuerzo excesivo. Es por ello que el estudio se realiza sobre un modelo a escala, que nos permite realizar una construcción exacta de lo que queremos evaluar, con relativa facilidad. No obstante, no podemos realizar un modelo a escala de una edificación real de cualquier manera con cualquier tipo de material, es necesario conocer las bases teóricas y experimentales que nos proporcionan un correcto diseño de nuestro modelo a escala.

Para asegurarnos que los resultados obtenidos del modelo a escala pueden ser aplicados a un modelo real, debemos diseñarlo siguiendo una serie de reglas de escalado [6]. Estas reglas aseguran que los procesos físicos son equivalentes en ambos casos, en el modelo a escala y en el caso real.

En el caso de ruido aéreo, la similitud se logra cuando la relación entre la longitud de onda y las dimensiones del recinto se mantiene constante, es decir, una reducción de todas las dimensiones del recinto por un factor  $n$  puede compensarse aumentando la frecuencia de medida por el mismo factor.

$$f_m = n \cdot f_0 \quad (8)$$

Donde  $f_m$  es la frecuencia del modelo a escala,  $f_0$  la frecuencia en el caso real y  $n$  el factor de escalado.

No obstante, tal y como se comenta en capítulos anteriores del presente trabajo, el estudio se centra en transmisión estructural y no en transmisión aérea. En este caso la longitud de onda estructural de flexión y la longitud del sonido aéreo vienen determinadas por el número de Helmholtz, definido según la ecuación (9)

$$He = \frac{\lambda_{\text{structureborne}}}{\lambda_{\text{airborne}}} \quad (9)$$

La relación entre las longitudes de onda debe ser invariante. Esto es equivalente al requisito de que las transiciones de sonido aéreo a sonido transmitido por vía sólida deben ser iguales tanto en el modelo a escala como en el modelo original. Esto se traduce en que la velocidad del sonido transmitido por vía sólida y la velocidad del sonido en el aire sea invariante, es decir.

$$c_{\text{structure borne},m} = c_{\text{structure borne},o} \quad (10)$$

En el estudio de la transmisión por flancos, interesan principalmente las ondas de flexión en placas. En este caso se logra la similitud entre los modelos cuando la relación entre la longitud de onda de flexión y la longitud de onda sonora se mantiene constante, es decir, la relación entre el módulo de Young y la densidad del material en el modelo a escala y en el modelo original debe permanecer constante, según la ecuación 11.

$$\left| \frac{E}{\rho \cdot (1 - \mu^2)} \right|_m = \left| \frac{E}{\rho(1 - \mu^2)} \right|_o \quad (11)$$

Donde el coeficiente de poisson,  $\mu$ , tiene una influencia prácticamente despreciable en la igualdad anterior.

Teniendo esto en cuenta, debemos seleccionar el material para la construcción de nuestro modelo a escala. Partimos de un modelo real a base de hormigón de 10cm de espesor. Las características de módulo de Young y densidad del hormigón se definen en la tabla 4.

Material	Módulo de Young (Pa)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
Hormigón	25x10 <sup>9</sup>	2300

Tabla 1. Características físicas del hormigón

Uno de los materiales que cumple la ecuación (11), suponiendo hormigón como material del modelo original, es el policarbonato. Es por ello que seleccionamos este tipo de material para construir la maqueta sobre la cual realizaremos las medidas experimentales.

En cuanto a las dimensiones de la maqueta, se ha diseñado un modelo a escala 1:4 y se ha tenido en cuenta una proporcionalidad según las dimensiones acotadas de la norma EN 10848-1:2007 [1]. En el apartado 6 de dicha Norma, se especifica que las dimensiones de la unión de ensayo deben ser conforme a la Fig. 5, cumpliéndose, al menos, una de las condiciones de

dimensionado (ecuaciones (12) y (13)) y siempre una diferencia de dimensiones entre elementos de, al menos, el 10%, tal y como se define en la ecuación (14).

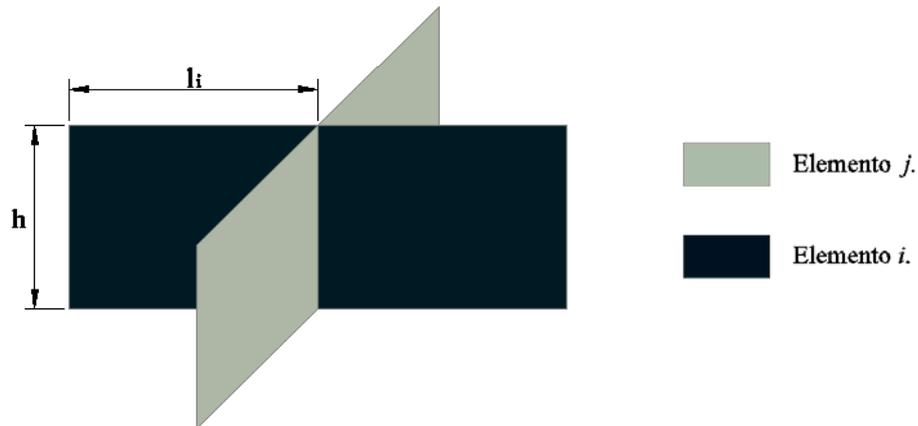


Fig. 5. Unión vertical

$$h \geq 2,3 \text{ metros} \quad (12)$$

$$3,5 \leq l_i \leq 6 \text{ metros para todos los elementos } i \quad (13)$$

$$\left| \frac{l_i - l_j}{l_i} \right| \geq 0,1 \text{ para todas las combinaciones de elementos } i \text{ y } j. \quad (14)$$

Las dimensiones finales de nuestra maqueta son de  $h=70\text{cm}$ , tanto para el elemento  $i$  como para el elemento  $j$ , cumpliéndose la ecuación (12) para un escalado 1:4. La longitud para el elemento  $i$  es de  $l_i = 49,5\text{cm}$  y la longitud del elemento  $j$  es de  $l_j = 42,5\text{cm}$ , manteniéndose de esta forma una diferencia en las dimensiones lineales de al menos un 10%, cumpliendo así con la ecuación (14).

Por tanto, el diseño del modelo a escala reúne las características de una unión en esquina tal y como se presenta en las Fig. 6 y 7, los dos elementos que componen la unión, elemento  $i$  ( $m_1$ ) y elemento  $j$  ( $m_2$ ), son policarbonato de 1,5 mm de espesor.

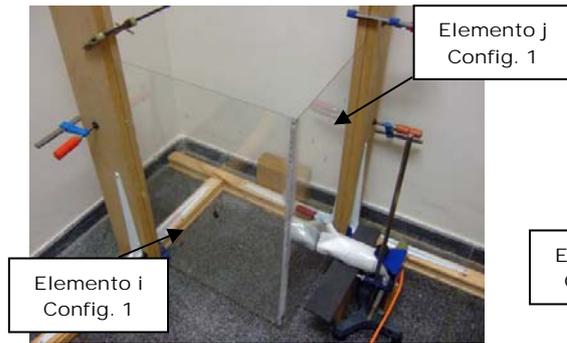


Fig. 6. Unión en esquina. Configuración 1

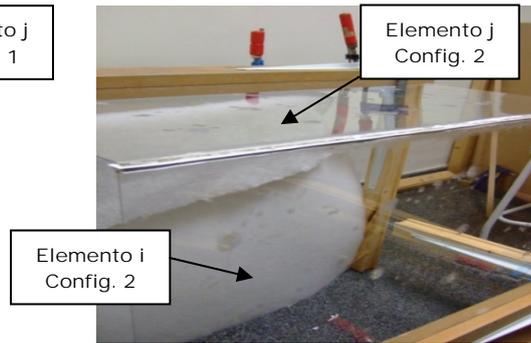


Fig. 7. Unión en esquina. Configuración 2

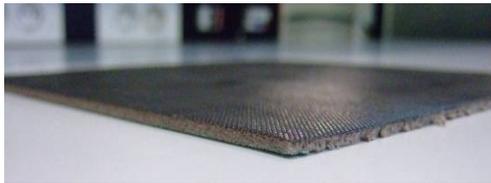


Fig. 8. Material elástico a base de Polietileno



Fig. 9. Material elástico a base de reciclado textil

Se estudiará el comportamiento de la unión en dos configuraciones diferentes, buscando de esta forma la configuración más estable para una correcta evaluación de dicho comportamiento. En la Configuración 1, los elementos que componen la unión están sujetos por tres puntos en la longitud opuesta a dicha unión, mientras que en la Configuración 2, únicamente se sujetan en dos puntos (los extremos) aunque, en este caso, el propio peso del elemento  $j$  sobre el elemento  $i$  hace más estable el montaje.

Se evaluará, para cada configuración, la unión rígida y dos uniones elásticas, una con un material elástico a base de polietileno (Fig. 8) y otra con un material elástico a base de reciclado textil (Fig. 9). Previo al estudio del índice de reducción vibracional, se evaluaron las características de rigidez dinámica de cada uno de los materiales elásticos según la Norma EN 29052-1:1994 [4], obteniendo como resultado una rigidez de dinámica de  $70\text{MN/m}^3$  para el caso del polietileno y  $116\text{MN/m}^3$  para el material de reciclado textil.

### 3.2. ENSAYOS SOBRE MAQUETA DE LA DIFERENCIA DE NIVELES DE VELOCIDAD

Tal y como se ha comentado en el apartado 2.2.1, uno de los parámetros esenciales para obtener el índice de reducción vibracional es la diferencia de niveles de velocidad promediado direccionalmente sobre la unión, definido de la siguiente forma.

$$\bar{D}_{v,ij} = \frac{1}{2}(D_{v,ij} + D_{v,ji}) \text{ dB} \quad (15)$$

Donde  $D_{v,ij}$  y  $D_{v,ji}$  se obtienen según las ecuaciones (6) y (7).

Para obtener este parámetro nos basamos en las directrices que marca la Norma EN 10848-1:2007[1]. Esta norma describe dos formas de excitar los elementos para poder obtener la velocidad de excitación de los mismos, mediante excitación aérea o mediante excitación estructural. En el presente trabajo se opta por la excitación estructural, por no ser eficaz la excitación aérea.<sup>1</sup>

#### 3.2.1. Instrumentación necesaria

La instrumentación necesaria para obtener el nivel de velocidad se basa, fundamentalmente, en un excitador mecánico o shaker (Fig. 10), necesario para excitar los diferentes elementos que componen la unión y acelerómetros (Fig. 11) que, conectados a un analizador de espectros, registran la amplitud de aceleración existente en cada elemento cuando éste es excitado con el shaker.



Fig. 10. Excitador mecánico (shaker)



Fig. 11. Acelerómetro B&K

---

<sup>1</sup> En el presente estudio se evalúa una unión en esquina concreta mediante un modelo a escala, por lo que no contamos con recintos acoplados cerrados en los que la excitación aérea sea efectiva.

### 3.2.2. Posiciones de excitación y medición.

La diferencia del nivel promediado direccional,  $\bar{D}_{v,ij}$  se obtiene a partir del valor medio de la diferencia del nivel de velocidad  $D_{v,ij}$  y  $D_{v,ji}$ , según la ecuación (15), y cada diferencia de nivel de velocidad se obtiene excitando cada elemento que compone la unión en varios puntos y midiendo el nivel de velocidad, también en varios puntos, sobre la superficie de ambos elementos,  $i$  y  $j$ .

Para la realización de las medidas, la Norma EN 10848-1:2007 [1] marca una serie condiciones geométricas de ubicación de posiciones de excitación y medición descritas a continuación:

- En cada elemento que compone la unión (*elemento i* y *elemento j*) se debe utilizar un mínimo de tres posiciones de excitación y un mínimo de 9 posiciones de transductor (tres posiciones de transductor para cada posición de excitación)
- Las posiciones deben distribuirse de forma aleatoria pero no simétricamente.
- La posición del transductor y puntos de excitación se deben situar cumpliendo las siguientes distancias mínimas:
  - o 0.5 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayar.
  - o 1 m entre puntos de excitación y unión sometida a ensayo.
  - o 1 m entre los puntos de excitación y las posiciones de transductor asociadas.
  - o 0.25 m entre las posiciones del transductor y los límites de cada elemento.
  - o 0.5 m entre cada posición del transductor.

No obstante, estamos trabajando sobre un modelo a escala 1:4 por lo que reduciremos, en un factor 4, las anteriores distancias mínimas, quedando entonces de la siguiente forma:

- o 0.125 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayar.
- o 0.25 m entre puntos de excitación y unión sometida a ensayo.
- o 0.25 m entre los puntos de excitación y las posiciones de transductor asociadas.
- o 0.0625 m entre las posiciones del transductor y los límites de cada elemento.
- o 0.125 m entre cada posición del transductor.

Además tres posiciones de excitación no era posible si se quería respetar las distancias para este tipo de montaje a escala. Se comprobó que con dos posiciones de excitación era suficiente puesto que las seis medidas ofrecían la estabilidad necesaria.

En las Fig. 12 y 13, se puede ver un esquema de la ubicación de las posiciones de excitación y medición sobre el modelo a escala, tanto en la Configuración 1 como en la Configuración 2 respectivamente.

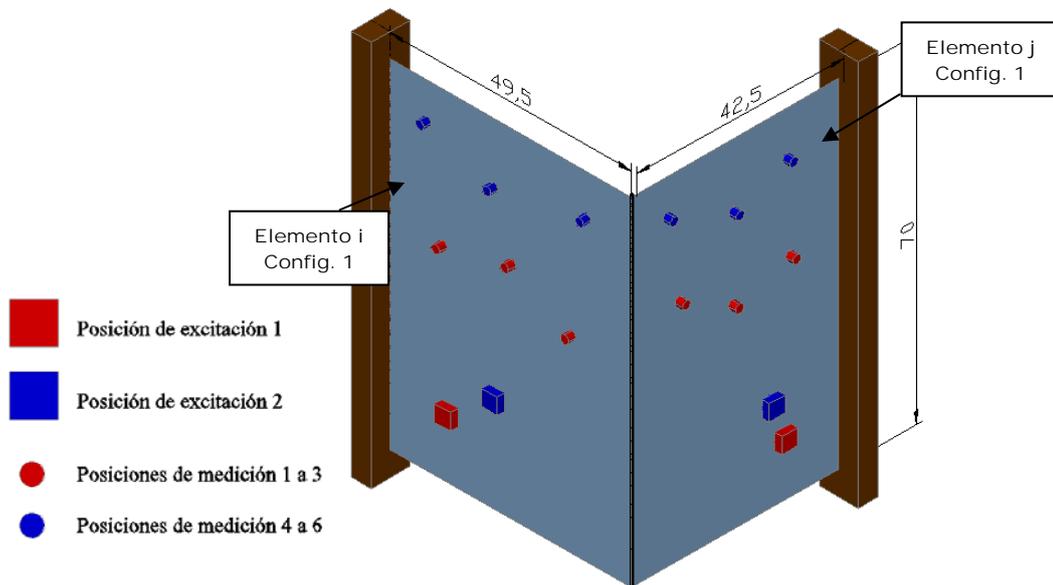


Fig. 12. Unión en esquina. Configuración 1. Posiciones de excitación y medición

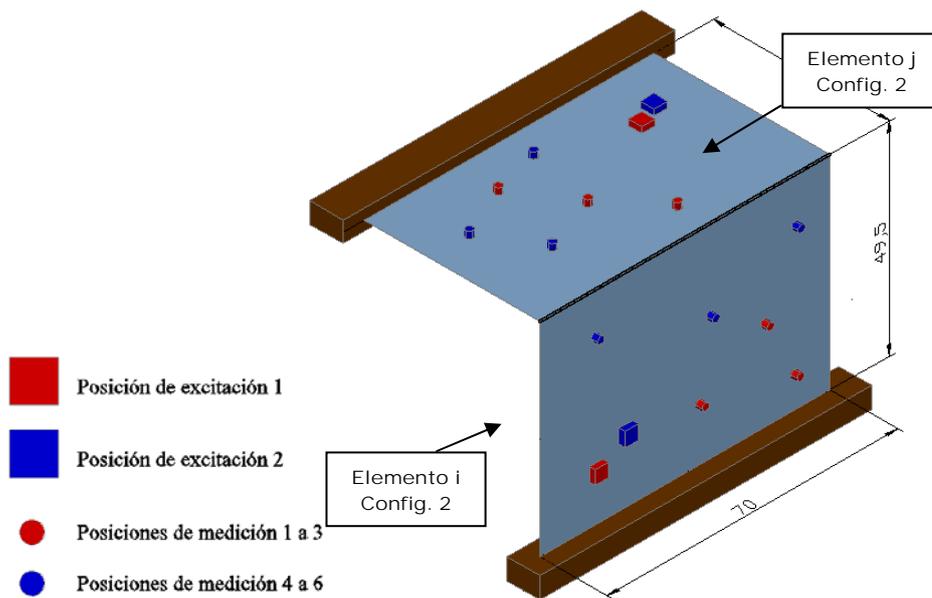


Fig. 13. Unión en esquina. Configuración 2. Posiciones de excitación y medición

### 3.2.3. Método de medición.

Previo a las mediciones, debemos asegurarnos que la fijación del acelerómetro al elemento a ensayo debe ser rígida en la dirección normal a la superficie del elemento (ver Fig.14) y su masa debe ser lo suficientemente pequeña como para minimizar la carga estructural sometida a ensayo. Por otra parte, debemos asegurarnos que el ruido propio emitido por el excitador o la radiación del elemento excitado, no excite otros elementos. En la Fig. 15 se puede ver la colocación del shaker sobre uno de los elementos que componen la unión en el proceso de medida.



Fig. 14. Colocación del acelerómetro sobre el elemento  $j$  en Configuración 2



Fig. 15. Colocación del shaker sobre el elemento  $i$  en la Configuración 2

El procedimiento de medición es sencillo, simplemente se deben seguir los siguientes pasos:

- En primer lugar se excita con el shaker y emitiendo un ruido blanco el *elemento i* en sus dos puntos de excitación y se registra, mediante el acelerómetro, el nivel de aceleración en cada una de las posiciones de medición, en las 6 posiciones del *elemento i* y en las 6 posiciones del *elemento j*. Integrando dichos niveles de aceleración, se obtienen los niveles de velocidad, y con ellos la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos  $i$  y  $j$ , cuando el elemento  $i$  es excitado, en dB,  $D_{v,ij}$  (ecuación (6)).

- En segundo lugar se invierte el camino de excitación sobre la unión, es decir, se excita sobre los dos puntos de excitación del elemento  $j$  y se registra, mediante el acelerómetro, el nivel de aceleración en cada una de las posiciones de medición, en las 6 posiciones del *elemento*  $j$  y en las 6 posiciones del *elemento*  $i$ . De nuevo, mediante integración, se obtienen los niveles de velocidad, y con ellos la diferencia del nivel de velocidad entre los elementos  $i$  y  $j$ , cuando el elemento  $j$  es excitado, en dB,  $D_{v,ji}$  (ecuación (7)).
- Por último, obtenemos la diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente;  $\bar{D}_{v,ij}$ , en dB, (ecuación (15)).

Existe una desigualdad de importante relevancia en la medida de diferencia de niveles de velocidad, dada por la siguiente ecuación:

$$D_{v,ij} \geq 3 - 10 \cdot \log \left( \frac{m_i \cdot f_{cj}}{m_j \cdot f_{ci}} \right) \text{ dB} \quad (16)$$

Donde  $m_i$  y  $m_j$  son las densidades superficiales ( $\text{Kg/m}^2$ ) de los elementos  $i$  y  $j$  respectivamente,  $f_{ci}$  y  $f_{cj}$  son las frecuencias críticas de dichos elementos.

La desigualdad (16) es lo que hemos denominado como *condición de acoplamiento débil* [9]. El valor medio de  $K_{ij}$  puede no ser de interés en el caso en que exista un fuerte acoplamiento entre los elementos que componen la unión. En este caso no se cumple la desigualdad y la transmisión de potencia no podrá ser entendida como índice de reducción vibracional

#### 3.2.4. Resultados de diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente.

Recordemos que se estudia el efecto de la interposición de dos láminas elásticas de distintas características respecto a la unión rígida, en dos configuraciones diferentes denominadas como *Configuración 1* y *Configuración 2*, buscando con ello la configuración más estable para una correcta evaluación.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente,  $\bar{D}_{v,ij}$ , sobre la unión en cada uno de los casos a estudio, para cada una de las dos configuraciones planteadas, de forma gráfica y de forma tabular.

#### *CONFIGURACIÓN 1 – Diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente, $\bar{D}_{v,ij}$*

---

Tras realizar las medidas permitentes sobre la configuración a ensayo denominada como Configuración 1, se obtienen los siguientes resultados de diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente, para cada uno de los tres casos a estudio.

**CASO 1 – UNIÓN RÍGIDA**

f(Hz)	D <sub>v,ij</sub> dB	D <sub>v,ji</sub> dB	Dif. Velocidad promediada $1/2 \cdot (D_{v,ij} + D_{v,ji})$	Condición de Acoplamiento débil
100	7,9	9,5	<b>8,7</b>	<b>OK</b>
125	7,7	10,7	<b>9,2</b>	<b>OK</b>
160	9,6	12,4	<b>11,0</b>	<b>OK</b>
200	6,2	13,1	<b>9,6</b>	<b>OK</b>
250	6,6	10,6	<b>8,6</b>	<b>OK</b>
315	10,8	7,6	<b>9,2</b>	<b>OK</b>
400	8,0	10,8	<b>9,4</b>	<b>OK</b>
500	8,7	9,9	<b>9,3</b>	<b>OK</b>
630	7,8	9,3	<b>8,6</b>	<b>OK</b>
800	3,4	5,4	<b>4,4</b>	<b>OK</b>
1.000	7,5	7,5	<b>7,5</b>	<b>OK</b>
1.250	10,6	10,9	<b>10,7</b>	<b>OK</b>
1.600	3,5	2,3	<b>2,9</b>	No válido
2.000	0,3	0,0	<b>0,2</b>	No válido
2.500	0,1	0,1	<b>0,1</b>	No válido
3.150	-0,1	0,0	<b>0,0</b>	No válido
4.000	-0,1	0,1	<b>0,0</b>	No válido
5.000	0,1	0,0	<b>0,1</b>	No válido

Tabla 2. Diferencia de niveles de velocidad y cumplimiento de la condición de acoplamiento. Unión rígida – Configuración 1

Tal y como se observa en la tabla 2, no se cumple la condición de acoplamiento débil, definida en la ecuación (16), a partir de la frecuencia de 1250Hz, por lo que es posible que a partir de esta frecuencia los resultados de  $K_{ij}$  que obtendremos en apartados posteriores no sean adecuados. Es por ello que representamos gráficamente el rango de frecuencias que nos ofrece resultados válidos.

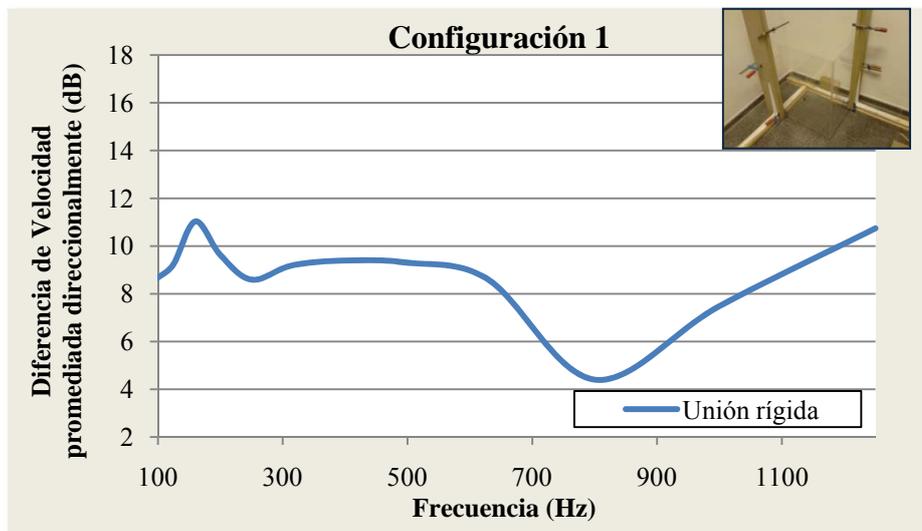


Fig. 16. Diferencia de velocidad promediada. Unión rígida. Configuración 1

**CASO 2 – UNIÓN ELÁSTICA CON POLIETILENO**

f(Hz)	D <sub>v,ij</sub> dB	D <sub>v,ji</sub> dB	Dif. Velocidad promediada $1/2 \cdot (D_{v,ij} + D_{v,ji})$	Condición de Acoplamiento débil
100	16,1	7,7	<b>11,9</b>	<b>OK</b>
125	15,5	4,3	<b>9,9</b>	<b>OK</b>
160	7,8	10,4	<b>9,1</b>	<b>OK</b>
200	8,0	8,2	<b>8,1</b>	<b>OK</b>
250	8,9	6,3	<b>7,6</b>	<b>OK</b>
315	7,8	3,8	<b>5,8</b>	<b>OK</b>
400	7,7	6,8	<b>7,2</b>	<b>OK</b>
500	9,5	5,5	<b>7,5</b>	<b>OK</b>
630	10,4	5,5	<b>7,9</b>	<b>OK</b>
800	9,0	4,4	<b>6,7</b>	<b>OK</b>
1.000	14,6	10,9	<b>12,7</b>	<b>OK</b>
1.250	13,2	9,9	<b>11,6</b>	<b>OK</b>
1.600	1,9	0,8	<b>1,3</b>	No válido
2.000	0,5	-0,1	<b>0,2</b>	No válido
2.500	0,2	0,0	<b>0,1</b>	No válido
3.150	0,0	0,1	<b>0,0</b>	No válido
4.000	-0,1	0,0	<b>0,0</b>	No válido
5.000	-0,1	0,0	<b>0,0</b>	No válido

Tabla 3. Diferencia de niveles de velocidad y cumplimiento de la condición de acoplamiento. Unión elástica con polietileno – Configuración 1

De la misma forma que en el caso anterior, tal y como se observa en la tabla 3, no se cumple la condición de acoplamiento débil. Es por ello que representamos gráficamente el rango de frecuencias que nos ofrece resultados válidos, de 100Hz a 1250Hz.

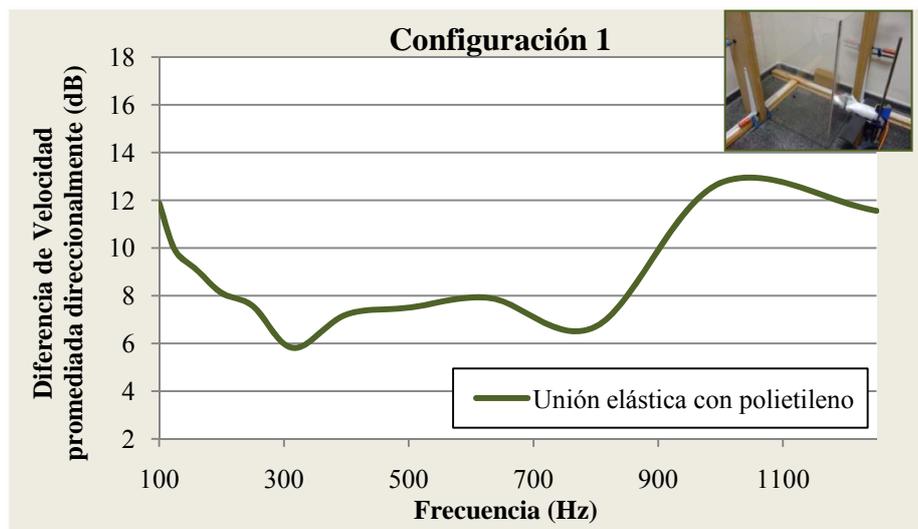


Fig. 17. Diferencia de velocidad promediada. Unión elástica con polietileno. Configuración 1

**CASO 3 – UNIÓN ELÁSTICA CON MATERIAL RECICLADO**

f(Hz)	D <sub>v,ij</sub> dB	D <sub>v,ji</sub> dB	Dif. Velocidad promediada $1/2 \cdot (D_{v,ij} + D_{v,ji})$	Condición de Acoplamiento débil
100	14,3	13,3	<b>13,8</b>	<b>OK</b>
125	14,8	9,2	<b>12,0</b>	<b>OK</b>
160	11,2	9,7	<b>10,5</b>	<b>OK</b>
200	7,2	10,4	<b>8,8</b>	<b>OK</b>
250	8,7	8,3	<b>8,5</b>	<b>OK</b>
315	8,4	7,7	<b>8,0</b>	<b>OK</b>
400	7,0	6,5	<b>6,7</b>	<b>OK</b>
500	6,5	4,7	<b>5,6</b>	<b>OK</b>
630	6,4	5,4	<b>5,9</b>	<b>OK</b>
800	5,6	2,3	<b>3,9</b>	<b>OK</b>
1.000	9,4	7,1	<b>8,3</b>	<b>OK</b>
1.250	7,3	5,5	<b>6,4</b>	<b>OK</b>
1.600	0,6	0,4	<b>0,5</b>	No válido
2.000	0,2	0,2	<b>0,2</b>	No válido
2.500	0,0	0,1	<b>0,1</b>	No válido
3.150	0,1	0,1	<b>0,0</b>	No válido
4.000	-0,1	0,1	<b>0,0</b>	No válido
5.000	-0,1	0,0	<b>0,0</b>	No válido

Tabla 4. Diferencia de niveles de velocidad y cumplimiento de la condición de acoplamiento. Unión elástica con polietileno – Configuración 1

Una vez más, tal y como se observa en la tabla 4, no se cumple la condición de acoplamiento débil. Es por ello que representamos gráficamente el rango de frecuencias que nos ofrece resultados válidos (de 100Hz a 1250Hz).

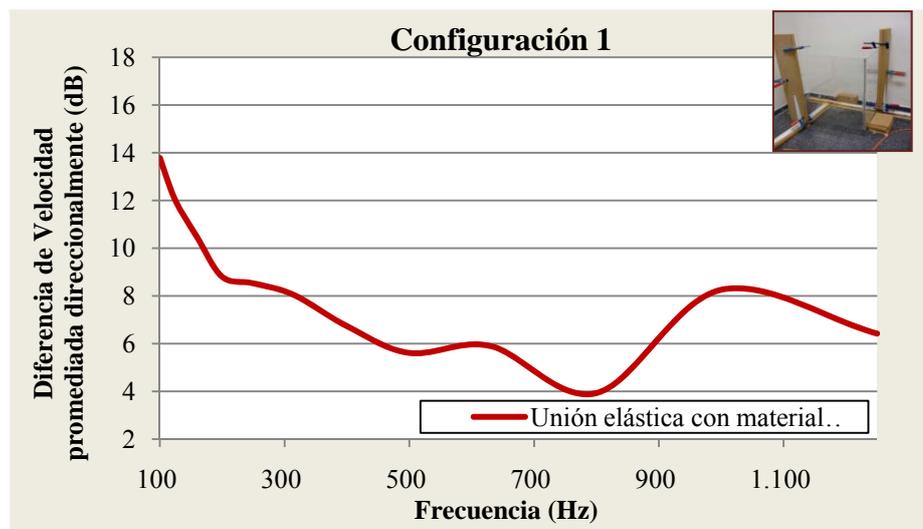


Fig. 18. Diferencia de velocidad promediada. Unión elástica con material reciclado. Configuración 1

Hasta ahora se han presentado las diferencias de velocidad promediadas sobre la unión en los tres casos a estudio para la primera configuración. En la Fig. 19 se observa una comparativa de estos resultados.

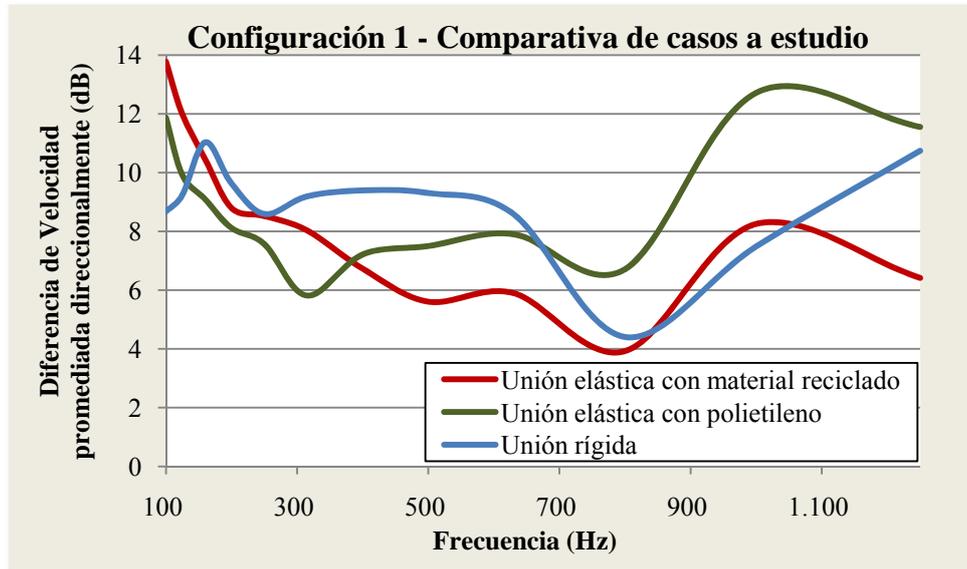


Fig. 19. Diferencia de velocidad promediada sobre la unión en Configuración 1. Comparativa de unión rígida con unión elástica mediante la interposición de diferentes láminas elásticas.

Se puede observar que, a partir de 400Hz, la diferencia de velocidad obtenida sobre la unión al interponer las láminas elásticas mantiene la misma tendencia, obteniéndose con el polietileno diferencias superiores a las obtenidas con el material reciclado. Por ello, en principio, el polietileno parece ser mejor candidato para interrumpir la transmisión sonora a través de la unión

Por otra parte, si comparamos los resultados obtenidos al interponer en la unión materiales elásticos con el caso de unión rígida, observamos que, a partir de una cierta frecuencia (en torno a 700Hz), la interposición de un material elástico a base de polietileno aumenta la diferencia de niveles de velocidad a ambos lados de la unión con respecto a la unión rígida, por tanto podríamos decir que a partir de esta frecuencia la lámina de polietileno mejora el comportamiento de la unión aumentando la diferencia de velocidades promediada sobre dicha unión.

No ocurre lo mismo al interponer en la unión una lámina elástica a base de material reciclado textil. En este caso, entre 800Hz y 1000Hz, las diferencias de velocidades son prácticamente igual a las obtenidas con unión rígida, y por encima de los 1000Hz no se aprecia una mejora con la lámina elástica.

*CONFIGURACIÓN 2 – Diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente,  $\bar{D}_{v,ij}$*

Tal y como se comentó anteriormente, se realizan las medidas sobre dos configuraciones distintas con la finalidad de buscar la configuración más estable para una correcta evaluación de los resultados obtenidos. A continuación se describen los resultados de diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente, para cada uno de los tres casos a estudio en la configuración de montaje denominada como Configuración 2.

**CASO 1 – UNIÓN RÍGIDA**

f(Hz)	$D_{v,ij}$ dB	$D_{v,ji}$ dB	Dif. Velocidad promediada $1/2 \cdot (D_{v,ij} + D_{v,ji})$	Condición de Acoplamiento débil
100	5,39	10,46	<b>7,92</b>	OK
125	7,23	4,07	<b>5,65</b>	OK
160	8,25	3,63	<b>5,94</b>	OK
200	5,54	2,22	<b>3,88</b>	OK
250	4,59	5,28	<b>4,93</b>	OK
315	4,48	6,68	<b>5,58</b>	OK
400	6,05	3,98	<b>5,01</b>	OK
500	4,87	5,08	<b>4,98</b>	OK
630	3,75	5,28	<b>4,51</b>	OK
800	3,31	2,95	<b>3,13</b>	OK
1.000	6,27	5,63	<b>5,95</b>	OK
1.250	5,96	5,65	<b>5,81</b>	OK
1.600	1,23	0,32	<b>0,77</b>	No válido
2.000	0,33	-0,04	<b>0,14</b>	No válido
2.500	0,35	0,17	<b>0,26</b>	No válido
3.150	0,05	-0,11	<b>0,03</b>	No válido
4.000	0,16	-0,19	<b>-0,02</b>	No válido
5.000	0,10	-0,05	<b>0,03</b>	No válido

Tabla 5. Diferencia de niveles de velocidad y cumplimiento de la condición de acoplamiento. Unión rígida – Configuración 2

A continuación se presentan los resultados de forma gráfica de 100Hz a 1250Hz, pues para frecuencias superiores no se cumple la condición de acoplamiento débil, por lo que los resultados pueden no ser fiables.

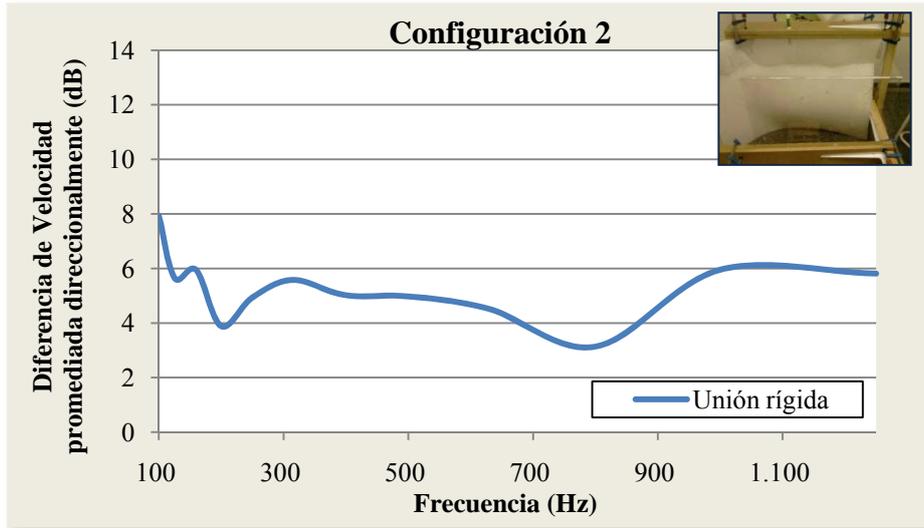


Fig. 20. Diferencia de velocidad promediada. Unión rígida. Configuración 2

**CASO 2 – UNIÓN ELÁSTICA CON POLIETILENO**

f(Hz)	D <sub>v,ij</sub> dB	D <sub>v,ji</sub> dB	Dif. Velocidad promediada $1/2 \cdot (D_{v,ij} + D_{v,ji})$	Condición de Acoplamiento débil
100	14,01	8,87	<b>11,44</b>	OK
125	8,50	9,95	<b>9,22</b>	OK
160	6,38	8,74	<b>7,56</b>	OK
200	9,32	10,42	<b>9,87</b>	OK
250	9,22	10,40	<b>9,81</b>	OK
315	7,59	6,22	<b>6,90</b>	OK
400	5,92	4,32	<b>5,12</b>	OK
500	5,89	4,95	<b>5,42</b>	OK
630	4,76	5,17	<b>4,97</b>	OK
800	4,11	2,64	<b>3,38</b>	OK
1.000	7,14	8,67	<b>7,90</b>	OK
1.250	4,91	4,86	<b>4,89</b>	OK
1.600	0,63	0,21	<b>0,42</b>	No válido
2.000	-0,07	-0,03	<b>-0,05</b>	No válido
2.500	-0,11	-0,02	<b>-0,07</b>	No válido
3.150	-0,01	0,08	<b>0,03</b>	No válido
4.000	-0,03	0,15	<b>0,06</b>	No válido
5.000	0,08	-0,09	<b>-0,01</b>	No válido

Tabla 6. Diferencia de niveles de velocidad y cumplimiento de la condición de acoplamiento. Unión elástica a base de polietileno – Configuración 2

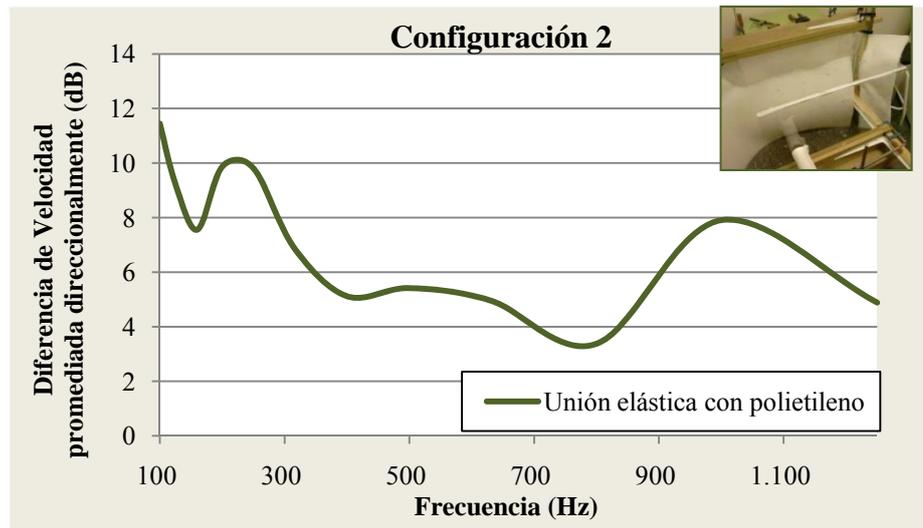


Fig. 21. Diferencia de velocidad promediada. Unión elástica con polietileno. Configuración 1

**CASO 3 – UNIÓN ELÁSTICA CON MATERIAL RECICLADO**

f(Hz)	D <sub>v,ij</sub> dB	D <sub>v,ji</sub> dB	Dif. Velocidad promediada $1/2 \cdot (D_{v,ij} + D_{v,ji})$	Condición de Acoplamiento débil
100	8,99	11,73	<b>10,36</b>	OK
125	7,82	12,18	<b>10,00</b>	OK
160	4,31	10,19	<b>7,25</b>	OK
200	4,67	6,80	<b>5,73</b>	OK
250	6,27	8,95	<b>7,61</b>	OK
315	6,92	6,44	<b>6,68</b>	OK
400	5,67	7,89	<b>6,78</b>	OK
500	4,90	7,15	<b>6,02</b>	OK
630	3,94	5,78	<b>4,86</b>	OK
800	1,50	5,93	<b>3,72</b>	OK
1.000	4,35	7,46	<b>5,91</b>	OK
1.250	3,70	4,25	<b>3,97</b>	OK
1.600	0,30	0,38	<b>0,34</b>	No válido
2.000	0,19	0,16	<b>0,17</b>	No válido
2.500	-0,07	0,11	<b>0,02</b>	No válido
3.150	-0,07	0,03	<b>0,03</b>	No válido
4.000	-0,06	0,12	<b>0,03</b>	No válido
5.000	-0,01	-0,07	<b>-0,04</b>	No válido

Tabla 7. Diferencia de niveles de velocidad y cumplimiento de la condición de acoplamiento. Unión elástica a base material reciclado – Configuración 2

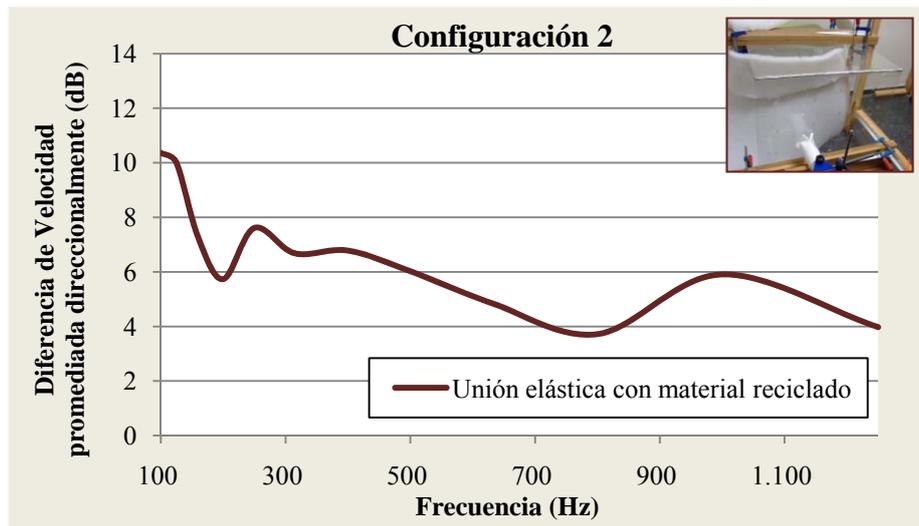


Fig. 22. Diferencia de velocidad promediada. Unión elástica con material reciclado. Configuración 1

Veamos, ahora, de la misma forma que en el caso de Configuración 1, una comparativa de las diferencias de velocidad promediada sobre la unión tanto para el caso de unión rígida como para ambos casos de unión elástica, en la Configuración 2.

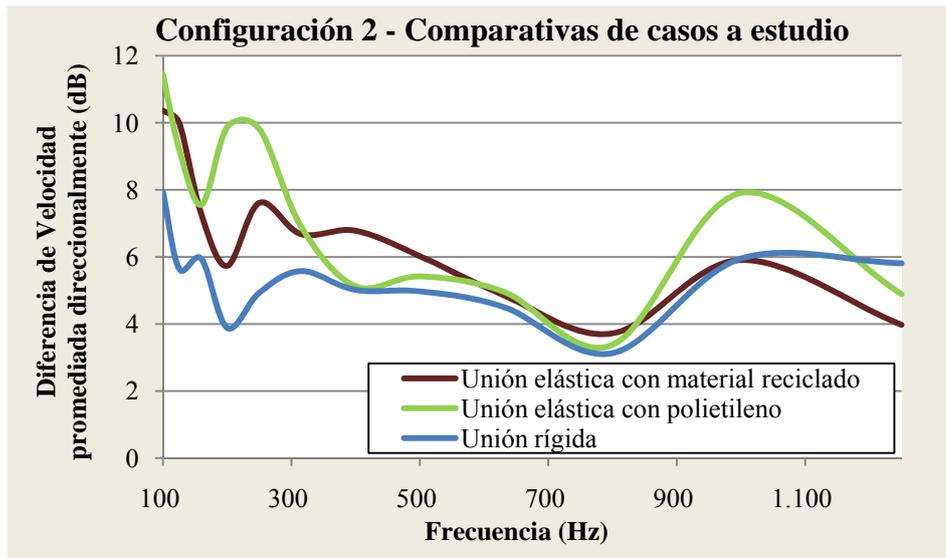


Fig. 23. Diferencia de velocidad promediada sobre la unión en Configuración 2. Comparativa de unión rígida con unión elástica mediante la interposición de diferentes láminas elásticas

De la misma forma que en la Configuración 1 (Fig.19) se puede observar que, en este caso a partir de los 630Hz, la diferencia de velocidad obtenida promediada sobre la unión al interponer las láminas elásticas mantiene la misma tendencia, no obstante, en este caso la diferencia no es tan acusada como en la Configuración 1, aunque sigue siendo el polietileno la lámina con la que se obtiene mayor diferencia de velocidad promediada sobre la unión al ser empleada como elemento elástico.

Si comparamos los resultados obtenidos al contar con uniones elásticas con el caso de unión rígida, vemos que al interponer la lámina elástica de polietileno, la diferencia de velocidad promediada sobre la unión aumenta en, prácticamente, todas las frecuencias de evaluación respecto a la unión rígida. Cuando la lámina que se interpone en la unión es la de material reciclado, también existe una mejora respecto a la unión rígida, aunque inferior al caso del polietileno. Además para este caso se repite el comportamiento que observábamos en la Configuración 1, a partir de 1000Hz, no se aprecia mejora al insertar la capa elástica.

Por otra parte, si comparamos ambas configuraciones en cada uno de los casos (Fig. 24, 25 y 26), podemos observar que, las diferencias de niveles de velocidad son superiores en la Configuración 1, aunque, en líneas generales, a partir de 300Hz, estas diferencias mantienen el mismo comportamiento en ambas configuraciones.

Es por ello que esta variación en las diferencias de velocidad a ambos lados de la unión entre Configuración 1 y Configuración 2, pueden ser debidas a las diferencias de montaje de dichas configuraciones, es decir, la diferencia se debe a la estabilidad de cada configuración debido a los puntos de sujeción de los elementos que componen la unión, que influyen, sobre todo, en baja frecuencia como se puede observar en la figura 23. A partir de 300 Hz parece q ambas configuraciones ofrecen tendencias de resultados similares en figuras 23 y 24.

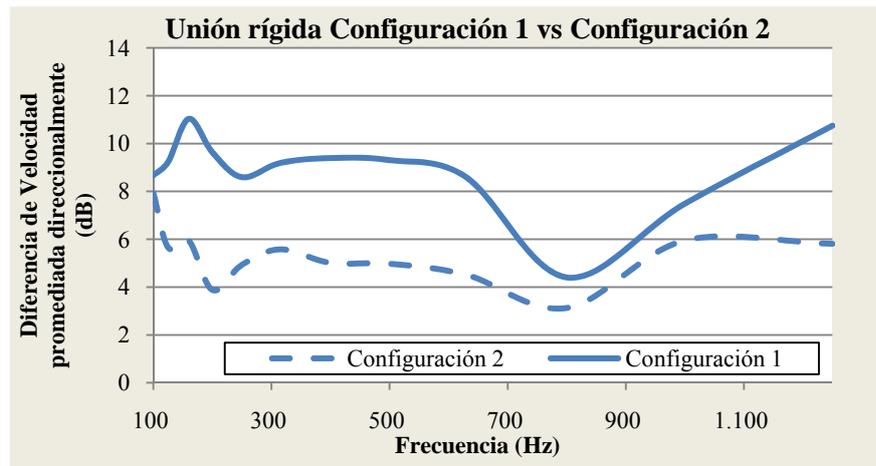


Fig. 24. Diferencia de velocidad promediada sobre la unión en Caso 1. Comparativa entre Configuración 1 y Configuración 2

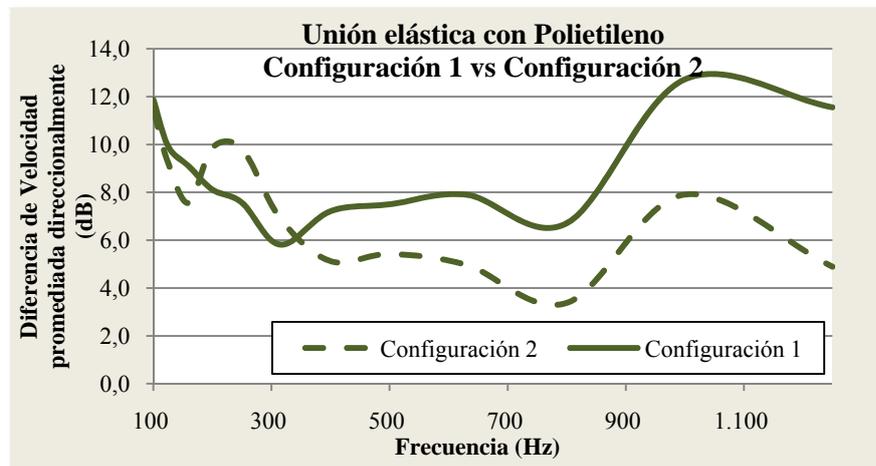


Fig. 25. Diferencia de velocidad promediada sobre la unión en Caso 2. Comparativa entre Configuración 1 y Configuración 2

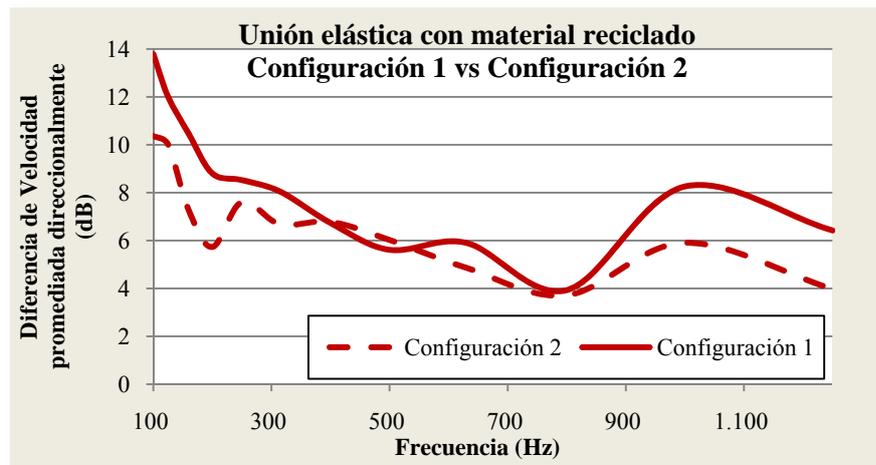


Fig. 26. Diferencia de velocidad promediada sobre la unión en Caso 3. Comparativa entre Configuración 1 y Configuración 2

### 3.3. ENSAYOS SOBRE MAQUETA DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESTRUCTURAL.

Tal y como se describe en el apartado de introducción teórica, además de la diferencia de velocidad promediada direccionalmente sobre la unión,  $\bar{D}_{v,ij}$ , el tiempo de reverberación estructural,  $T_s$ , es otra magnitud imprescindible para la obtención del índice de reducción vibracional. Se define como el lapso de tiempo que debe transcurrir una vez que ha cesado la excitación mecánica, para que el desplazamiento de la masa del sistema vibratorio, disminuya a la millonésima parte de su valor inicial

Para obtener el tiempo de reverberación estructural de cada uno de los elementos que componen la unión a estudio nos basamos en las directrices que marca la Norma EN 10848-1:2007 [1]. Esta Norma cita que el tiempo de reverberación estructural de un elemento se determina con excitaciones puntuales y mediciones puntuales de la velocidad o de la aceleración en diferentes posiciones del transductor.

Se pueden utilizar dos métodos de excitación: la excitación por vibrador o la excitación por martillos. En el primer método la respuesta por impulsos se mide con la técnica MLS (Secuencia de Longitud Máxima) o con algún otro método que permita obtener la respuesta por impulsos correcta. El segundo método es el método adoptado en el presente trabajo que se detalla a continuación.

#### 3.3.1. Instrumentación necesaria

La instrumentación empleada para obtener el tiempo de reverberación estructural de cada elemento consiste en un martillo de Brüel&Kjaer, type 8208, con diferentes extremos, cada uno de ellos con una masa y un material distinto (Fig. 28) y un acelerómetro de pulgada de Brüel&Kjaer, Type 4370 (Fig. 27), que, conectado a un analizador de espectros (plataforma Symphonie), registra el tiempo que tarda en desvanecerse la excitación del elemento a estudio.

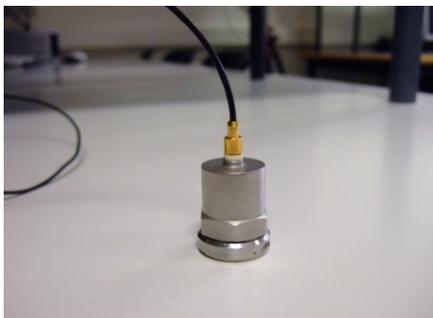


Fig. 27. Acelerómetro B&K 4370



Fig. 28. Martillo B&K, type 8208  
y diferentes masas

### 3.3.2. Posiciones de excitación y medición.

Tal y como se especifica en la Norma UNE 10848-1:2007 [1], se deben utilizar, al menos, tres posiciones de excitación sobre el elemento a ensayo y al menos tres posiciones de transductor para cada punto de excitación.

Además, las posiciones de transductor y los puntos de excitación se deben disponer respetando las siguientes distancias mínimas:

- 0.5 metros entre las posiciones del transductor y los límites del elemento a ensayo
- 1 metro entre los puntos de excitación y las posiciones del transductor asociadas
- 0.5 metro entre cada posición del transductor
- Los puntos de medición se deben distribuir de forma aleatoria sobre el elemento a ensayo

Recordemos que estamos trabajando sobre un modelo a escala 1:4 por lo que reduciremos, en un factor 4, las anteriores distancias mínimas, quedando entonces de la siguiente forma:

- 0.125 metros entre las posiciones del transductor y los límites del elemento a ensayo
- 0.25 metros entre los puntos de excitación y las posiciones del transductor asociadas.
- 0.125 metros entre cada posición del transductor

En las Fig. 29 y 30, se puede ver un esquema de la ubicación de las posiciones de excitación y medición sobre cada elemento que compone el modelo a escala, tanto en la Configuración 1 como en la Configuración 2 respectivamente.

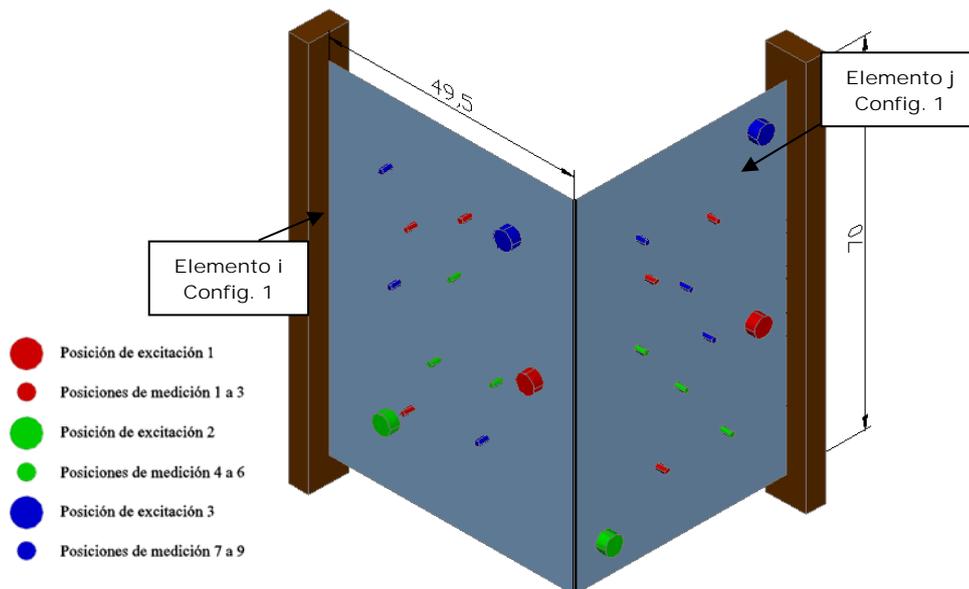


Fig. 29. Unión en esquina. Configuración 1. Posiciones de excitación y medición, tiempo de reverberación estructural

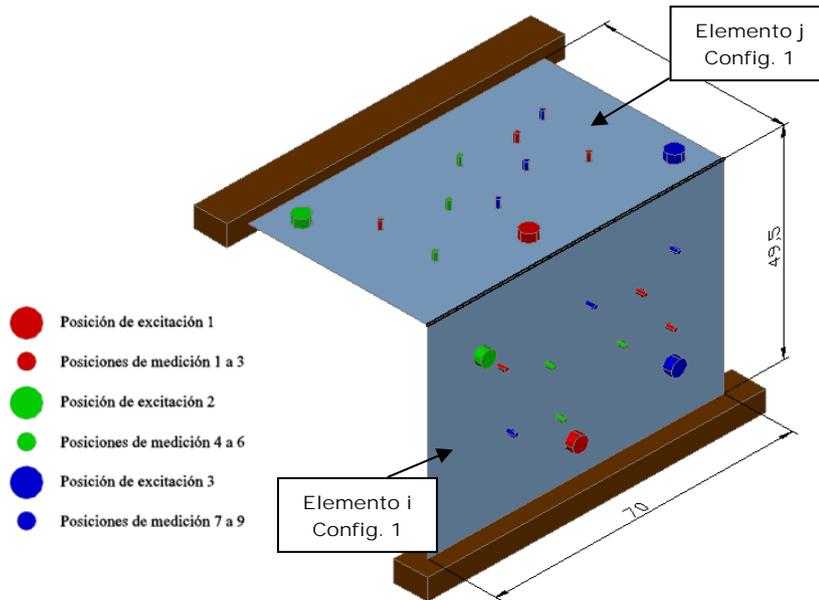


Fig. 30. Unión en esquina. Configuración 2. Posiciones de excitación y medición, tiempo de reverberación estructural

### 3.3.3. Método de medición.

El procedimiento de medición consiste en excitar el elemento a estudio con un golpe seco de martillo. Tras la excitación, se mide la respuesta temporal de la caída de la amplitud de vibración en función de la frecuencia con un analizador de respuesta temporal. Es importante tener en cuenta que en todo momento se cumpla que el tiempo de respuesta del detector promediador sea suficiente para poder registrar la caída de forma correcta.

El martillo excitador cuenta con distintos extremos (Fig. 28), cada uno de una masa diferente, por lo que nos aseguramos que queden excitadas todas las bandas de frecuencia, variando, cuando sea necesario, la terminación del martillo, ya que un material diferente lleva a excitaciones diferentes en las bandas de frecuencia.

Tal y como se expone en el apartado 3.3.2, las posiciones de excitación y medición se han distribuido de forma aleatoria, cumpliendo siempre, en la medida de lo posible, las condiciones descritas en la Norma En 10848-1:2007 [1], con el fin de obtener a partir de éstos, por promediado aritmético, el tiempo de reverberación estructural del elemento a estudio.

En la Fig. 31 se puede ver un detalle de la medición del tiempo de reverberación estructural sobre el elemento *j* en la Configuración 2 para el caso de unión rígida.



Fig. 31. Medición del tiempo de reverberación estructural sobre el elemento  $j$  para la configuración 2 en el caso de unión rígida.

#### 3.3.4. Resultados de tiempo de reverberación estructural en el modelo a escala.

Contamos, como bien sabemos ya, con tres casos a estudio, unión rígida y unión elástica mediante la interposición de dos láminas de diferentes características (polietileno y material reciclado). Estas tres disposiciones de unión se repiten en dos configuraciones distintas de unión en esquina, Configuración 1 y Configuración 2.

En este apartado se presenta el tiempo de reverberación estructural obtenido para cada uno de los elementos que componen la unión (elemento  $i$  y elemento  $j$ ) en cada uno de los tres casos a estudio y para cada una de las dos configuraciones (Fig. 32 – 37), así como gráficos comparativos que representan la influencia que puede tener, sobre el tiempo de reverberación estructural, la interposición de una lámina elástica en una unión en esquina respecto a una unión rígida (Fig. 40 a 43).

En primer lugar veamos, mediante la representación del tiempo de reverberación estructural, cómo responde cada uno de los elementos que componen la unión (elemento  $i$  y elemento  $j$ ) a una excitación en cada uno de los casos a estudio.

CONFIGURACIÓN 1 – TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESTRUCTURAL,  $T_s$

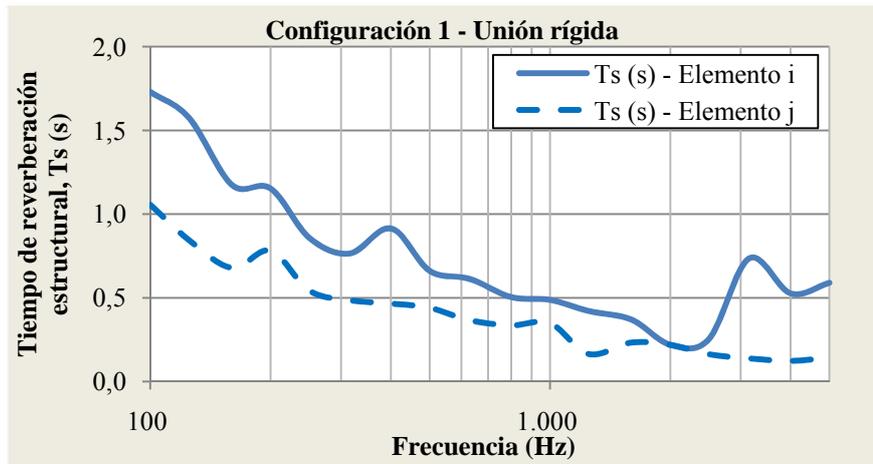


Fig. 32. Tiempo de reverberación sobre elementos de unión en esquina rígida. Configuración 1

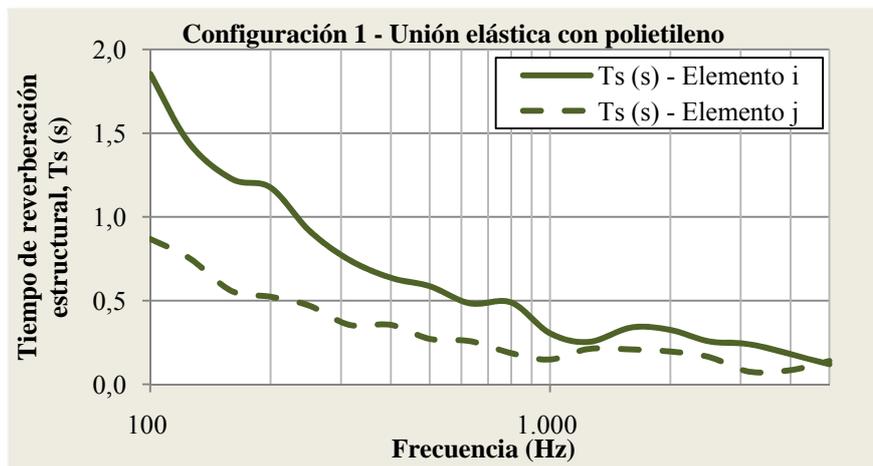


Fig. 33. Tiempo de reverberación sobre elementos de unión elástica (polietileno). Configuración 1

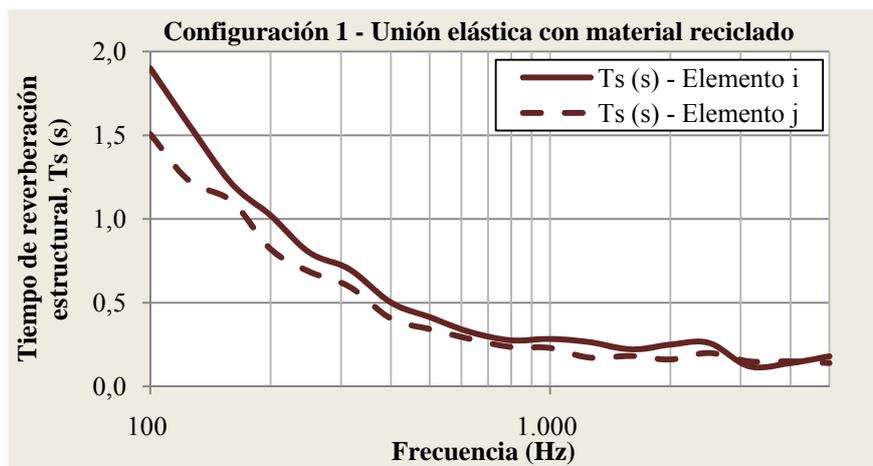


Fig. 34. Tiempo de reverberación sobre elementos de unión elástica (material reciclado). Configuración 1

CONFIGURACIÓN 2 – TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESTRUCTURAL,  $T_s$

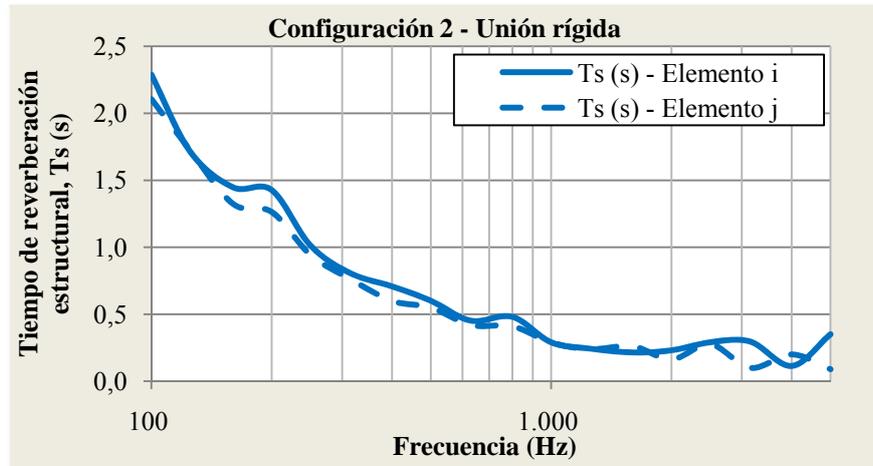


Fig. 35. Tiempo de reverberación sobre elementos de unión en esquina rígida. Configuración 2

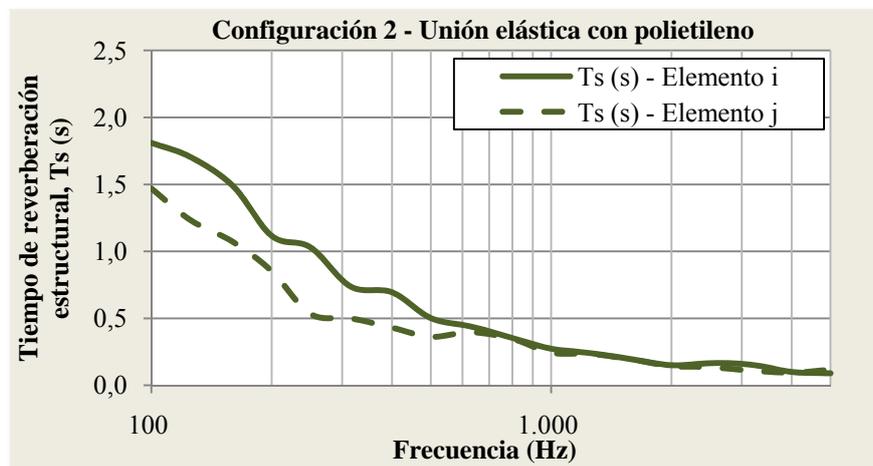


Fig. 36. Tiempo de reverberación sobre elementos de unión elástica (polietileno). Configuración 2

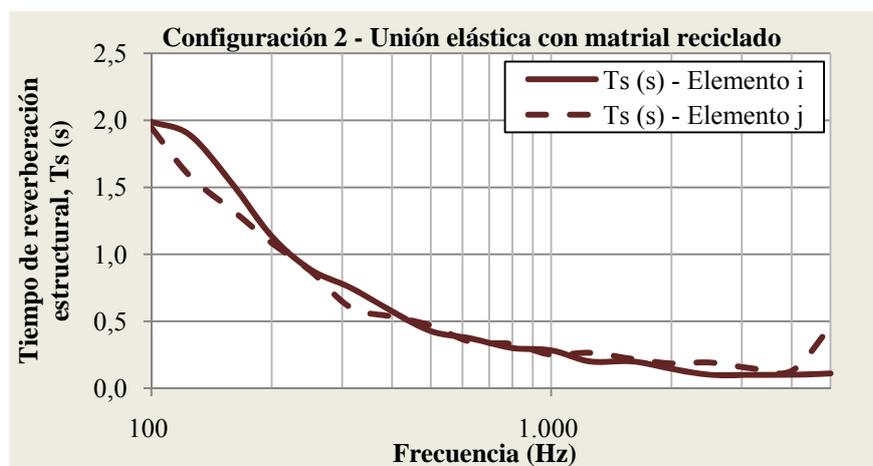


Fig. 37. Tiempo de reverberación sobre elementos de unión elástica (material reciclado). Configuración 2

Sobre los resultados obtenidos en la Configuración 1 podemos observar que, en líneas generales, aunque manteniendo la misma tendencia, el tiempo de reverberación estructural obtenido sobre el elemento  $j$  es inferior al que se obtiene sobre el elemento  $i$  en los tres casos a estudio. Esto puede estar relacionado con el tamaño de cada uno de ellos, contando el elemento  $j$  con una superficie  $0.2975 \text{ m}^2$  y el elemento  $i$  con  $0.3465 \text{ m}^2$ , es decir un 15% mayor.

En el caso de la Configuración 2 se repite el mismo comportamiento, aunque la diferencia no es tan notable como en la Configuración 1. notándose que además del tamaño del elemento influyen las condiciones de sujeción

Tal y como se comenta en el apartado 3.1 del presente trabajo, en la Configuración 1, los elementos que componen la unión están sujetos por tres puntos en la longitud opuesta a dicha unión (Fig. 38), mientras que en la configuración 2, únicamente se sujetan en dos puntos, los extremos, aunque en este caso el propio peso del elemento  $j$  sobre el elemento  $i$  hace más estable el montaje (Fig. 39). Estas variaciones en las condiciones de sujeción de los elementos que componen la unión puede ser un factor influyente en los resultados obtenidos de tiempo de reverberación estructural para cada configuración.

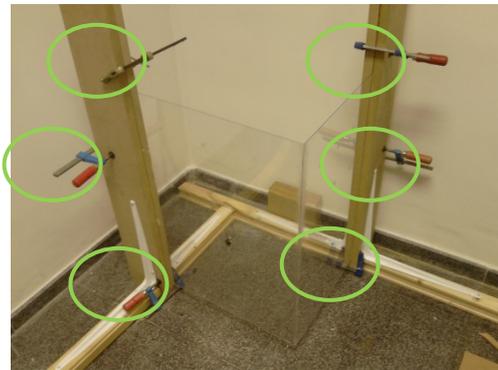


Fig. 38. Puntos de sujeción de los elementos  $i$  y  $j$  en la Configuración 1

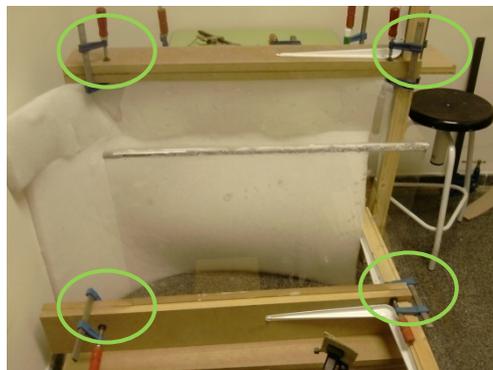


Fig. 39. Puntos de sujeción de los elementos  $i$  y  $j$  en la Configuración 2

Veamos ahora, mediante representación gráfica, la influencia que tiene en el tiempo de reverberación estructural la interposición de una lámina elástica en una unión en esquina. De nuevo vemos los resultados obtenidos para cada una de las dos configuraciones.

*CONFIGURACIÓN 1 - Unión elástica frente a unión rígida - Ts*

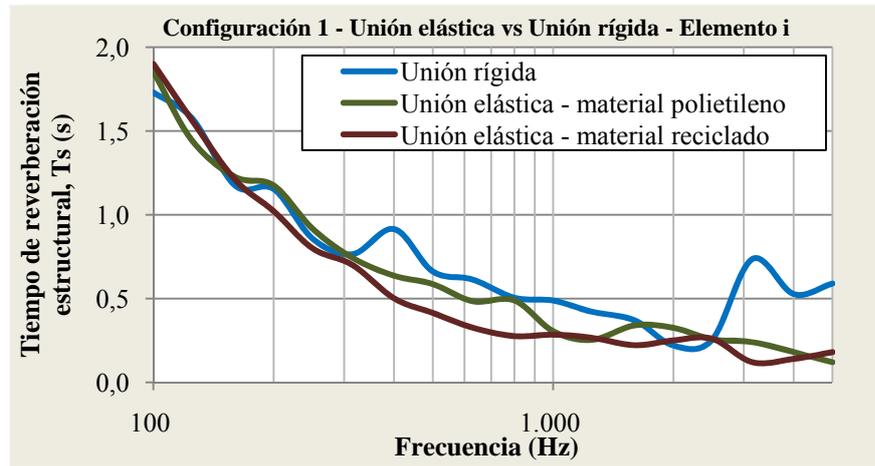


Fig. 40. Tiempo de reverberación estructural para unión rígida y dos uniones elásticas sobre el elemento  $i$  Configuración 1.

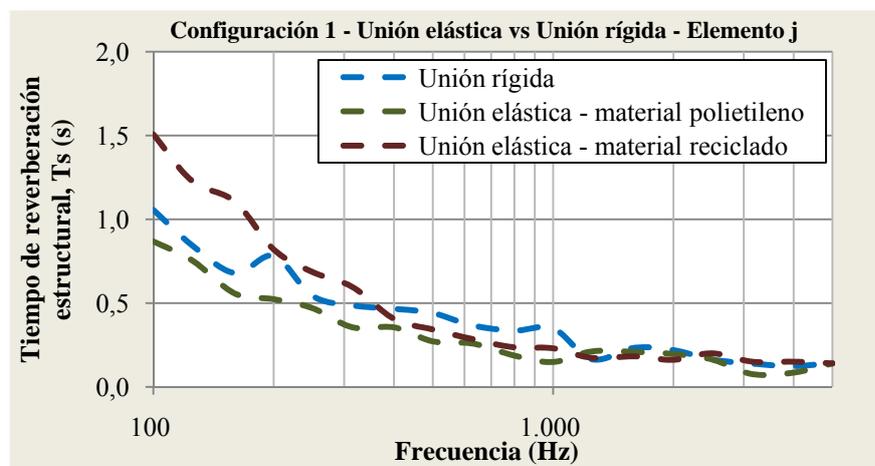


Fig. 41. Tiempo de reverberación estructural para unión rígida y dos uniones elásticas sobre el elemento  $j$  Configuración 1.

CONFIGURACIÓN 2 - Unión elástica frente a unión rígida -  $T_s$

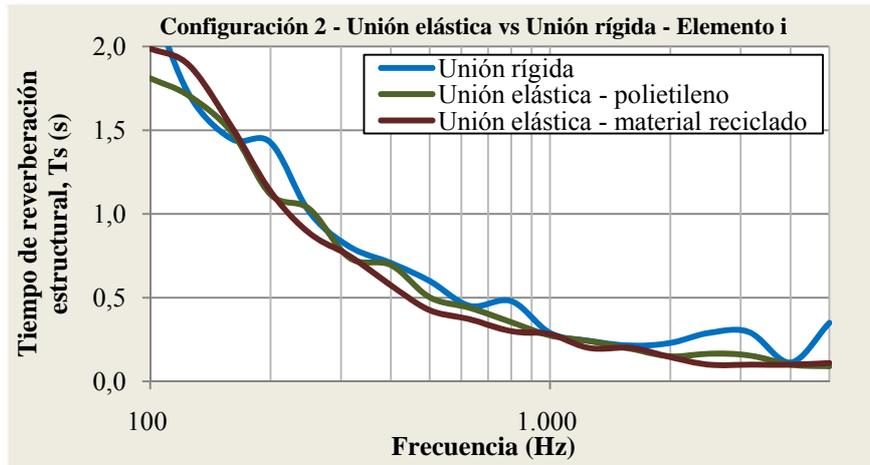


Fig. 42. Tiempo de reverberación estructural para unión rígida y dos uniones elásticas sobre el elemento  $i$  Configuración 2.

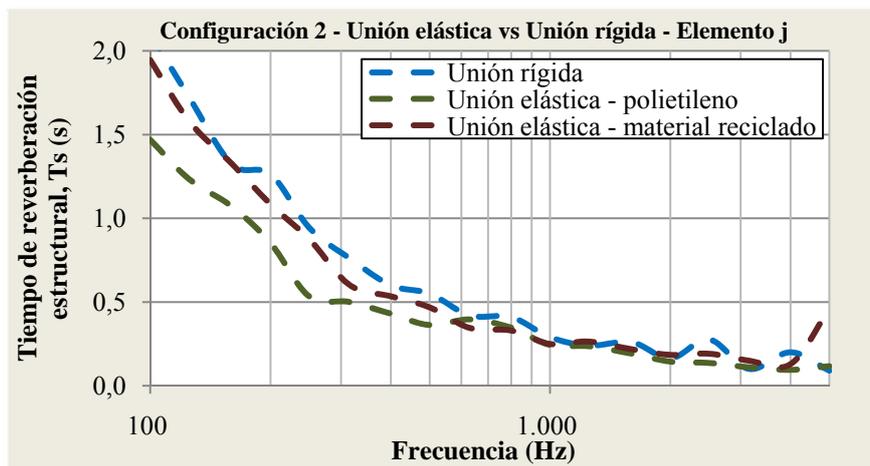


Fig. 43. Tiempo de reverberación estructural para unión rígida y dos uniones elásticas sobre el elemento  $j$  Configuración 2.

A la vista de los resultados representados en las Fig. 40 a 43, podemos observar la influencia, en el tiempo de reverberación estructural, de la interposición de un material elástico en la unión, tanto en la Configuración 1 como en la Configuración 2. En líneas generales, los valores obtenidos al interponer una lámina elástica en la unión son inferiores a los valores obtenidos en el caso de unión rígida. Esta diferencia se aprecia más claramente a frecuencia bajas y medias.

### 3.4. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL

Recordemos que el índice de reducción vibracional,  $K_{ij}$ , se define como la magnitud que relaciona la transmisión de potencia vibratoria a través de una unión entre elementos estructurales, normalizada con el objeto de hacerla una magnitud invariante. Se determina normalizando la diferencia de niveles de velocidad promediados en todas las direcciones de la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según las ecuaciones (4) y (5). Para hacer más sencillo el seguimiento de este apartado, a continuación se reescribe dicha ecuación:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \text{ dB} \quad (18)$$

$$a = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (19)$$

Podemos observar que el índice de reducción vibracional depende de cuatro parámetros fundamentales:

- La diferencia de niveles de velocidad entre los elementos de unión
- La longitud común entre los elementos que componen la unión
- Las áreas de los elementos que componen la unión
- El tiempo de reverberación estructural de cada elemento que compone la unión

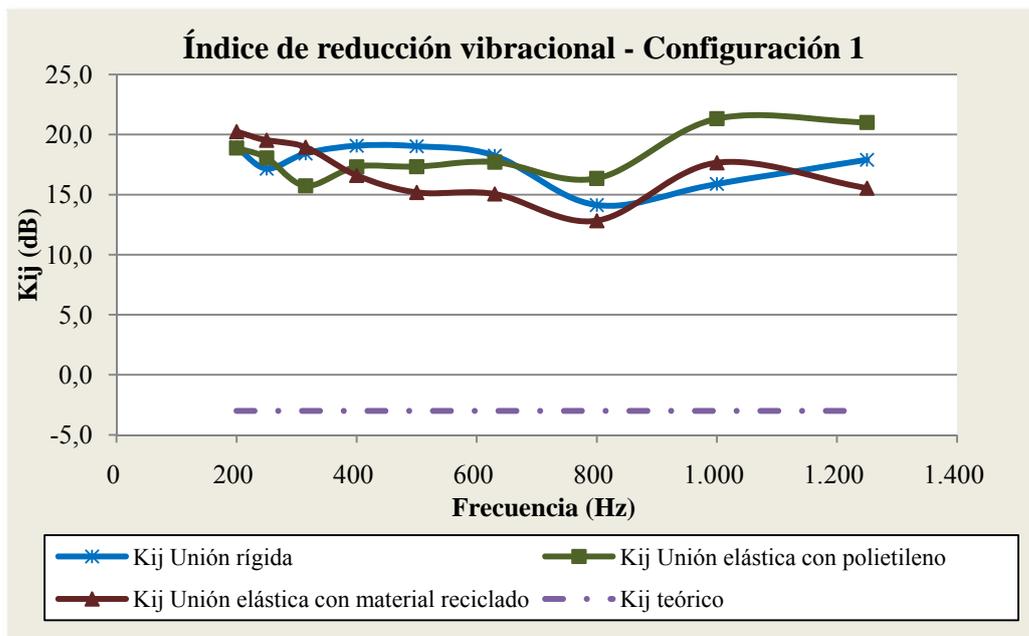
De estos cuatro parámetros, la diferencia de niveles de velocidad y el tiempo de reverberación estructural son magnitudes obtenidas “in situ”. El procedimiento a seguir para alcanzar estas dos magnitudes, así como los resultados obtenidos se describen en los apartados 3.2 y 3.3 del presente trabajo. En consecuencia, contamos con todos los datos necesarios para, mediante las ecuaciones (18) y (19), obtener el índice de reducción vibracional de la unión en esquina, para cada uno de los tres casos a estudio (unión rígida, unión elástica con polietileno y unión elástica con material reciclado) y en cada una de las dos configuraciones (Configuración 1 y Configuración 2).

A continuación se presentan los resultados del índice de reducción vibracional para frecuencias en tercios de octava de 200Hz a 1250Hz así como un valor global obtenido como el promedio del valor obtenido para este rango de frecuencias, tal y como se indica en el Anexo A de la Norma UNE 10848-1:2007 [1].

Además se comparan los valores obtenidos experimentalmente con valores derivados de la aplicación de ecuaciones empíricas dadas en la Norma UNE 12354-1:1998 [2] (ecuación (2)).

## CONFIGURACIÓN 1 – ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL

f(Hz)	CONFIGURACIÓN 1		
	$k_{ij}$ Unión rígida	$k_{ij}$ Poliétileno	$k_{ij}$ Mat. reciclado
200	19,0	18,9	20,2
250	17,2	18,1	19,5
315	18,4	15,7	19,0
400	19,1	17,3	16,6
500	19,0	17,3	15,2
630	18,2	17,7	15,1
800	14,1	16,3	12,8
1.000	15,9	21,3	17,7
1.250	17,9	21,0	15,5
<b><math>K_{ij}</math> (global, dB)</b>	<b>17,6</b>	<b>18,2</b>	<b>16,8</b>

Tabla 8.  $K_{ij}$  por frecuencias y global en Configuración 1Fig. 44.  $K_{ij}$  por frecuencias experimental y teórico en Configuración 1

## CONFIGURACIÓN 2 – ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL

CONFIGURACIÓN 2			
f(Hz)	k <sub>ij</sub> Unión rígida	k <sub>ij</sub> Poliétileno	k <sub>ij</sub> Mat. reciclado
200	15,4	21,6	18,0
250	15,8	20,8	19,4
315	17,1	18,1	17,9
400	16,4	16,6	17,5
500	15,0	15,5	16,3
630	14,1	15,5	14,7
800	12,3	13,7	13,5
1.000	14,5	17,3	15,5
1.250	13,9	14,5	14,3
<b>K<sub>ij</sub> (global, dB)</b>	<b>14,9</b>	<b>17,1</b>	<b>16,4</b>

Tabla 9. Kij por frecuencias y global en Configuración 2

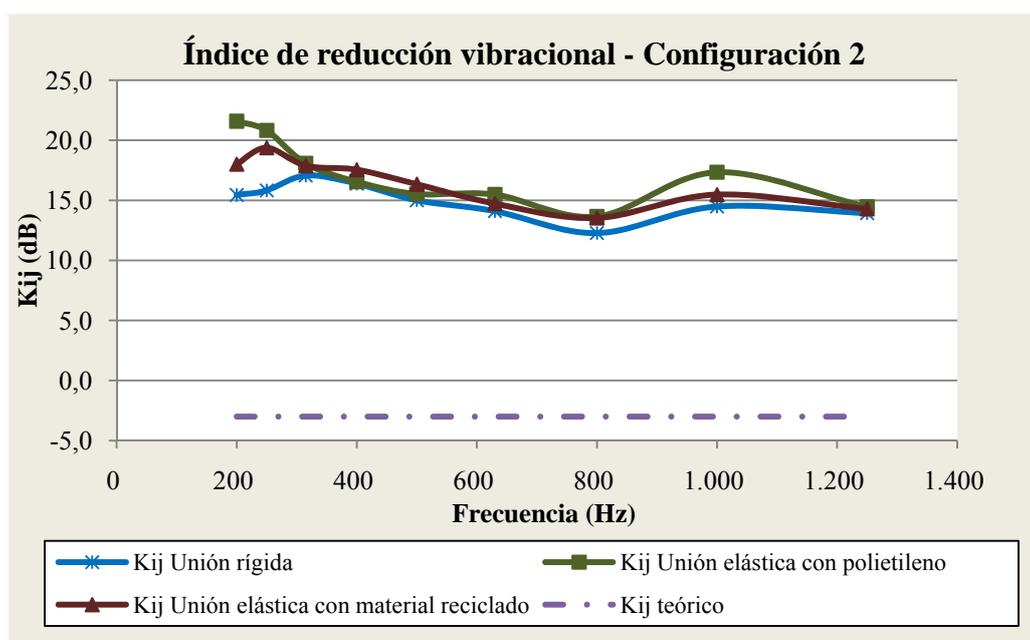


Fig. 45. Kij por frecuencias experimental y teórico en Configuración 2

A la vista de los resultados podemos observar que, en ambas configuraciones y para todos los casos a estudio, se aprecia, a simple vista, una dependencia del índice de reducción vibracional con la frecuencia en el caso de medidas experimentales, dependencia que no tiene en cuenta la EN 12354-1 donde se ha obtenido el índice de reducción vibracional mediante ecuaciones empíricas.

Por otra parte, podemos observar en la Configuración 1 se observan mayores diferencias en el índice de reducción vibracional entre las diferentes uniones elásticas estudiadas que en el caso de la Configuración 2.

En la primera configuración (Configuración 1) se obtiene un índice de reducción vibracional global, al interponer un material a base de polietileno, de 18,2dB frente a los 17,6dB de la unión rígida. Sin embargo, la interposición del segundo material, o material reciclado, da como resultado un  $K_{ij} = 16.8\text{dB}$ , por debajo del obtenido en el caso de la unión rígida, por lo que, en principio, este material no parece muy efectivo. Sin embargo, en la segunda configuración (Configuración 2), se observa una mejora, el caso del polietileno, a partir de, aproximadamente, 400Hz. Mientras que en el caso del material reciclado, se produce una mejora para todas las frecuencias del rango a estudio. Se obtiene un  $K_{ij}$  global de 16.4dB para el caso del material reciclado y de 17.1dB para el polietileno, frente a los 14.9dB obtenidos para la unión rígida.

A partir de los resultados obtenidos parece que la configuración 2 ofrece resultados más significativos y estables para el estudio del  $K_{ij}$ .

Por tanto el hecho de interponer un material elástico en una unión en esquina es, en líneas generales, una acción influyente en el índice de reducción vibracional de la unión aumentando su valor y mejorando así su comportamiento reduciendo las transmisiones laterales. En cualquier caso, tanto para la unión rígida como para uniones elásticas, se obtiene un índice de reducción vibracional entre 17dB y 22dB por encima del valor teórico dado en la EN 12354-1:2000 [2].

## 4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. CONCLUSIONES

Se ha estudiado el efecto que produce, en el índice de reducción vibracional, la interposición de bandas elásticas en una unión en forma de esquina. Las medidas experimentales se han desarrollado sobre un modelo a escala compuesto, principalmente, de policarbonato. Para alcanzar el objetivo del presente trabajo se han seguido las directrices que marca la Norma EN 10848-1:2007, midiendo “in situ” las diferencias de niveles de velocidad promediados sobre la unión a estudio así como el tiempo de reverberación estructural sobre los elementos que componen dicha unión.

Del trabajo realizado para el desarrollo de esta investigación, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Respecto a la construcción del modelo a escala podemos decir que:

- Un modelo a escala destinado a estudiar el comportamiento de un determinado tipo de unión se debe diseñar siguiendo una serie de reglas de escalado para asegurar que los resultados obtenidos sobre dicho modelo puedan ser aplicados a un modelo real.
- En cuanto a las dimensiones se debe mantener una proporcionalidad según las dimensiones acotadas de la Norma EN 10848-1:2007. Se mantiene una diferencia en las dimensiones lineales entre elementos superior al 10%. Además la relación entre el módulo de Young y la densidad del material en el modelo a escala y en el modelo original permanece constante, lo cual asegura que los procesos físicos son equivalentes en ambos casos.

Respecto a la diferencia de nivel de velocidad promediada direccionalmente sobre la unión podemos decir que:

- En la configuración de ensayo denominada como Configuración 1, se aprecia un aumento de la diferencia de niveles de velocidad promediados sobre la unión a partir de una frecuencia en torno a 700Hz, al interponer en dicha unión una lámina elástica a base de polietileno, material que cuenta con una rigidez dinámica de  $70\text{MN/m}^3$ , lo que evidencia la mejora al interponer la lámina elástica.

- En la configuración de ensayo denominada como Configuración 2, la diferencia de niveles de velocidad promediada sobre la unión aumenta en prácticamente todas las frecuencias respecto a la unión rígida al utilizar el polietileno como intercapa de dicha unión, demostrando la ventaja de la intercapa.
- La diferencia de niveles de velocidad promediada sobre la unión es superior en la Configuración 1 que en la Configuración 2. Esta diferencia se debe a las condiciones de montaje de cada configuración, es decir, a la estabilidad del modelo debido a los puntos de sujeción de los elementos que componen la unión. Es en la Configuración 2 donde se obtiene resultados más significativos, por tanto es ésta la configuración más estable de las dos estudiadas.

Respecto al tiempo de reverberación estructural podemos concluir que:

- El tamaño del elemento a estudio es uno de los factores que influyen en el tiempo de reverberación estructural obtenido sobre dicho elemento. Los valores obtenidos sobre el elemento de menor tamaño, tanto en Configuración 1 como en Configuración 2, son inferiores a los obtenidos sobre el elemento mayor, contando este último con una superficie superior en un 15%.
- Otro factor influyente en el resultado obtenido de tiempo de reverberación estructural son las condiciones de contorno de cada uno de los elementos que componen la unión, es decir, las condiciones de sujeción de estos elementos.
- La interposición de un material elástico en la unión, influye en el tiempo de reverberación estructural registrado sobre los elementos que la componen, alcanzándose valores inferiores a los obtenidos cuando se cuenta con una unión rígida.

Respecto al índice de reducción vibracional, parámetro objetivo de este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La utilización de una lámina elástica como intercapa de una unión rígida en forma de esquina influye en el índice de reducción vibracional que define dicha unión, aumentando su valor, en líneas generales, a partir de una cierta frecuencia crossover.
- Existe una dependencia de los resultados con el tipo de configuración a ensayo. En la Configuración 1 los resultados son más dependientes de las condiciones de contorno que en la Configuración 2.

- Los resultados del índice de reducción vibracional obtenidos a partir de mediciones “in situ” de diferencia de niveles de velocidad y de tiempo de reverberación estructural, presentan una dependencia frecuencial.
- El índice de reducción vibracional obtenido mediante las ecuaciones empíricas dadas en la Norma EN 12354-1:2000, no presenta dependencia frecuencial por lo que resulta necesario reajustarlo.
- La mejora en el índice de reducción vibracional al interponer un material elástico en la unión estará en función de las características de dicho material.
- Al interponer una lámina elástica en una unión rígida en forma de esquina, se obtiene una mejora en el índice de reducción vibracional de entre 1 y 3dB en función del tipo de elástico que se utilice.
- Tanto para unión rígida como para uniones elásticas, se obtiene un índice de reducción vibracional entre 17dB y 22dB por encima del valor teórico obtenido mediante la aplicación de fórmulas empíricas definidas por la Norma En 12354-1:2000.

#### 4.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se plantean futuras líneas de investigación como continuidad del presente trabajo.

- Desarrollar un modelo a escala cuya configuración sea lo más estable posible con la finalidad de que los resultados obtenidos no estén en función del montaje de dicho modelo.
- Estudiar el comportamiento de la unión al interponer materiales elásticos con características de rigidez dinámica distintas a las estudiadas hasta el momento.
- Establecer una relación entre la rigidez dinámica de un material y la mejora en el índice de reducción vibracional de la unión al interponer dicho material.
- A partir de mediciones “in situ” de diferencias de niveles de velocidad y tiempos de reverberación estructural, ajustar las ecuaciones empíricas dadas en la Norma En 12354-1:2000 para uniones en forma de esquina.
- Repetir el estudio con la técnica NAH (Nearfield Acoustical Holography) sin contacto y comprobar, incluso cuantificar, la perturbación que puede llegar a provocar la masa de un acelerómetro en el campo de sonido vibracional.
- Realizar simulaciones del comportamiento de una unión mediante el método de elementos finitos hasta alcanzar, mediante comparación con medidas experimentales, un modelo de simulación estable. Esto puede proporcionar una potente herramienta en trabajos posteriores ya que se pueden obtener resultados mediante simulación previos a un proceso experimental. Esto, evidentemente, no sustituye la realización de mediciones “in situ” pero nos proporciona ideas previas para optimizar al máximo el trabajo de campo.

#### AGRADECIMIENTOS

**Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (BIA2007-68098-C02-02) y por el Programa Gerónimo Forteza FPA2010 de la Consellería d'Educació de la Generalitat Valenciana.**

Aprovecho para dar la gracias a mis tutores por su apoyo y por la confianza depositada en mí para llevar a cabo este trabajo.

Gracias a Eva Escuder por su extraordinaria ayuda, no sólo en la realización de este trabajo, sino siempre que la he necesitado, por su paciencia y por su amistad.

Gracias a Fernando Hernández por su ayuda en el laboratorio y por sus consejos y ánimos en todo momento durante este año.

Gracias a Ali y Carlos por su compañía durante este año de máster.

**REFERENCIAS**

- [1] UNE - EN ISO 10848-1:2007. *Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes. Parte 1: Documento Marco.*
- [2] UNE – EN ISO 12354-1:2000. *Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1. Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.*
- [3] UNE – EN 12354-2:2001. *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.*
- [4] UNE – EN ISO 29052-1:1994. *Determinación de la rigidez dinámica. Parte 1. Materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas.*
- [5] Documento Básico HR Protección Frente al Ruido. Septiembre 2009.
- [6] Christoph Kling. *Investigations into damping in building acoustics by use of downscaled models.* Braunschweig, May 2008
- [7] D.B. Pedersen. *Estimation of Vibration Attenuation through Junctions of Building Structures.* DELTA Acoustics & Vibration, Kongsvang Allé 33, DK-8000 Aarhus C, Denmark.
- [8] E. Escuder-Silla, J. Ramis-Soriano, J. Alba-Fernández, R. Del-Rey-Tormos. *Vibration reduction index of a corner-junction with flexible interlayer.* InterNoise 2010.
- [9] Romina Del Rey Tormos. *Modelización del ruido transmitido por flancos en la edificación en nuevas soluciones constructivas.* Tesis Doctoral, Noviembre 2009.
- [10] Martín Bravo M<sup>a</sup> A; Tarrero Fernández AI; Aparicio Colino A; González Suárez J. *Determinación del tiempo de reverberación estructural. Procedimiento y validación.* Tecnicústica 2006.
- [11] Del Rey, Romina; Alba, Jesús; Ramis, Jaime; Escuder, Eva. *Una maqueta para el estudio de transmisiones laterales en edificación.* Tecnicústica 2009.
- [12] Escuder Silla, Eva; Alba Fernández, Jesús; Del Rey Tormos, Romina; Hervás González, Carlos. *Estudio de transmisiones indirectas en modelos a escala mediante Nearfield Acoustical Holography.* Acústica 2008, Coimbra, Portugal.
- [13] Escuder Silla, Eva; Alba Fernández, Jesús; Del Rey Tormos, Romina; Ramis Soriano, Jaime. *Efecto de la rigidez dinámica de bandas elásticas en el índice de reducción vibracional de un modelo a escala mediante NAH.* Tecnicústica 2009, Cádiz.
- [14] Bertó Carbó, Laura; Escuder Silla, Eva; Tomás Ibiza, Fernando; Alba Fernández, Jesús; Del Rey Tormos, Romina. *Estudio de la influencia de bandas elásticas en una unión en esquina.* Tecnicústica 2010, León.