

SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL DE UNIONES CON SUELOS FLOTANTES

Alba Fernández, Jesús¹; Ramis Soriano, Jaime²; Del Rey Tormos, Romina¹; Segura Alcaraz, Jorge Gabriel³; Gadea Borrell, Jose María³

¹Instituto para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras
Escuela Politécnica Superior de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N Grao de Gandía 46730 (Valencia)
Teléfono (96) 284.93.14 - (96) 284.93.00
(jesalba@fis.upv.es)

²Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría.
Universidad de Alicante
Apdo. Correos, 99: 03080 Alicante
(jramis@ua.es)

³Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
Escuela Politécnica Superior de Alcoy. Plaza de Ferrándiz y Carbonell, s/n. Alcoy (03801)

Resumen

La aparición del Documento Básico de Protección contra el Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) plantea el uso de soluciones constructivas donde en, prácticamente todas las soluciones reconocidas, es necesaria la colocación adecuada de una lámina flotante. De esta forma, desde el punto de vista acústico, se pretende reducir las transmisiones del ruido a través de los flancos. La efectividad de estos sistemas está relacionada con características del material, tipo de unión, tiempo de reverberación estructural de los elementos constitutivos, etc. Existen formulas simplificadas para ciertas tipologías de unión, estas se ofrecen en las normas UNE-EN 12354. Estas formulas dependen de cuestiones geométricas, relaciones de masas y propiedades elásticas, sobre todo de la lámina flotante utilizada, y nos ofrecen un índice de reducción vibracional simplificado. En este trabajo se realiza un estudio utilizando elementos finitos, de diferentes uniones en + y en T con el fin de valorar todos los efectos de un suelo flotante desde un punto de vista numérico

Palabras-clave: Transmisiones laterales, aislamiento acústico, índice de reducción vibracional, elementos finitos, predicción.

Abstract

The appearance of the Protection Against Noise Basic Document (PAN-BD) of the Technical Building Code (TBC) suggests the use of constructive solutions where it is necessary the correct placing of a floating sheet. This way, from an acoustic point of view, the goal is to reduce the noise transmissions through the flanks. The effectiveness of these systems is related to the characteristics of the material, the kind of junction, the structural time reverb of the constituent elements, etc. There are simplified formulas for some junction typologies which are encompassed in the UNE-EN 12354 norms. These formulas depend on geometrical questions, relationships of masses and elastic properties, specifically of the floating sheet used, and they offer us a simplified vibration reduction index. In this project it is carried out a study using the finite elements of different junctions in + and T in order to assess all the effects of a floating floor from a numerical point of view.

Keywords: Lateral transmisión, acoustic isolation, vibration reduction index, finite elements, prediction.

1 Introducción

La aparición del Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) [1] 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, o suelos flotantes, que permitan la reducción del nivel de ruido de impactos y disminuyan 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.

El método reconocido más habitual para valorar acústicamente la transmisión por flanco es el de valorar el índice de reducción vibracional. Actualmente se puede obtener mediante el uso de fórmulas empíricas reconocidas para ciertas soluciones constructivas y en un conjunto determinado de diseños rígidos o con elementos elásticos insertados. Esto se ha recogido en el DB-HR del CTE [1] que referencia las normas UNE-EN 12354 [2-4] donde se pueden encontrar las diferentes formulaciones y sus limitaciones. En el caso que nos ocupa, aparecen soluciones clásicas con elementos “pesados” a los que se les ha colocado una banda elástica de una relación entre el Módulo de Young del material y su espesor, y no deja margen para muchas configuraciones con elementos elásticos.

Otra técnica que puede ser factible es la obtención de información del flanco en una edificación, mediante procedimientos de medida similares a los detallados en las normas UNE-EN ISO 10848 [5], con el uso de diferente equipamiento y la medición de multitud de datos de diferencias de niveles de velocidad y tiempos de reverberación estructural, para obtener datos sobre transmisión de energía y pérdidas. Se pueden encontrar ya diferentes trabajos sobre esta temática [6-9].

En este trabajo se realiza un estudio mediante el método de los elementos finitos, de diferentes configuraciones en + y en T, comparando las mismas situaciones sin y con una lámina elástica que cumple las características que se señalan en la UNE-EN 12354-1 [2] con el fin de poder cuantificar el efecto de la lámina y poder comparar los resultados con lo que marcan las fórmulas predictivas, a través de la simulación del proceso de medición.

1.1 Definición de Índice de Reducción vibracional

El índice de reducción vibracional, K_{ij} , se define como la magnitud relacionada con 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 direcciones sobre la unión, con la longitud de la unión y la longitud de absorción equivalente, si fuera relevante, de ambos elementos según la siguiente ecuación:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \quad (1)$$

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:

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

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.

1.2 Determinación experimental del índice de reducción vibracional

Tal y como se especifica en la 10848-1, es posible obtener el valor de Kij utilizando como base las ecuaciones (1) y (2), a partir de la medición 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. Para la obtención de la diferencia de velocidades la norma marca una serie de limitaciones geométricas [5].

Algunas de las condiciones indicadas en la norma son las siguientes:

- Deben realizarse en cada elemento 3 posiciones de excitación y 9 de transductor (3* excitación).
- Las posiciones deben distribuirse aleatoriamente pero no simétricamente.
- La posición del transductor y puntos de excitación deben cumplir las siguientes distancias mínimas:
 - 0.5 m entre los puntos de excitación y los límites del elemento a ensayar.
 - 1 m entre los puntos de excitación y las posiciones de transductor asociadas.
 - 0.5 m entre cada posición del transductor.

Para la medición del tiempo de reverberación estructural se puede seguir la normativa ISO 3382. Se excita el elemento constructivo con un golpe de martillo y se obtiene el tiempo que tarda en caer el sonido 60 dB. La norma indica al menos tres puntos de excitación por al menos tres posiciones de transductor para la obtención del tiempo de reverberación estructural. Las condiciones de colocación son similares a las de la medida de la diferencia de velocidades. Además deben tenerse en cuenta las posibles limitaciones en el proceso de medida, tanto del nivel de velocidad como del tiempo de reverberación estructural, dado por la norma.

1.3 Fórmulas empíricas para el índice de reducción vibracional

El Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) refieren a las normas UNE-EN 12354 para la predicción del comportamiento acústico en diferentes situaciones. El método detallado descrito en el DB-HR utiliza las fórmulas de predicción

que contienen dichas normas. En el caso concreto de la 12354-1 se puede encontrar un anexo con fórmulas obtenidas a través de datos empíricos, para tipos habituales de uniones, en el momento de desarrollo de la norma.

Las fórmulas se obtienen para el caso de uniones en que los elementos a ambos lados de la unión en el mismo plano tienen la misma masa, con lo cual, la relación de masas se reduce a dos. Las figuras 1 y 2 muestran el caso de uniones rígidas.

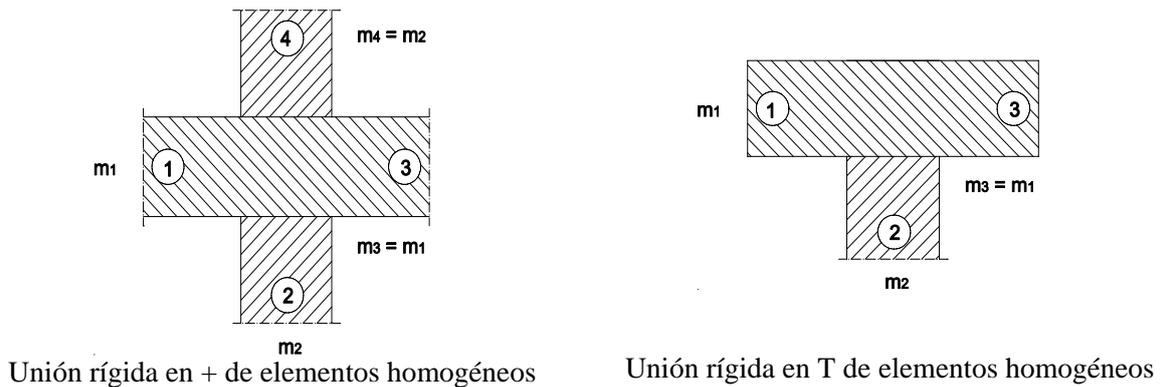


Figura 1. Uniones rígidas a comparar

En el caso de la unión en cruz, se definen las siguientes relaciones para los índices de reducción sonora asociados:

$$K_{13} = 8,7 + 17,1 M + 5,7 \cdot M^2 \quad \text{dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (3a)$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 \cdot M^2 \quad (= K_{23}) \quad \text{dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (3b)$$

En el caso de la unión en T, se definen las siguientes relaciones para los índices de reducción sonora asociados:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 \cdot M^2 \quad \text{dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (4a)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \cdot M^2 \quad (= K_{23}) \quad \text{dB}; \quad 0 \text{ dB/octava} \quad (4b)$$

Las expresiones (3) y (4) están dadas en función de la magnitud M definida como:

$$M = \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \quad (5)$$

siendo:

m'_i masa por unidad de superficie del elemento i en el camino de transmisión ij
 $m'_{\perp i}$ masa por unidad de superficie del otro elemento, perpendicular al i, que forma la unión

En el cálculo de estas masas sólo se cuenta el material base o forjado conectado a los elementos constructivos colindantes, y deben excluirse las masas de las capas de revestimiento, tales como suelos flotantes, trasdosados y techos suspendidos [1].

Se puede observar como las magnitudes dadas por (3) y (4) no tienen dependencia con la frecuencia. De hecho, según se indica en el DB-HR, en general la transmisión es poco dependiente de la frecuencia desde 125 a 2 kHz, por lo que se considera 0 dB/octava.

En el caso de interponer elementos flexibles (figura 2), las fórmulas reconocidas son las siguientes:

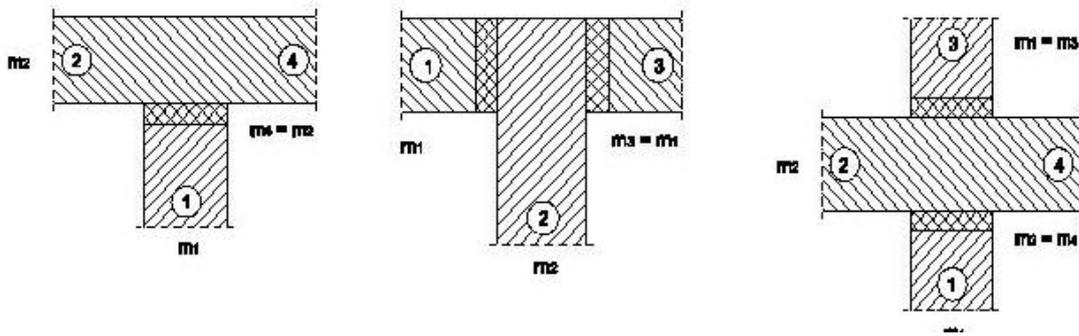


Figura 2. Uniones con elementos flexibles insertados

$$K_{13} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 \cdot M^2 + 2 \cdot \Delta_1 \text{ dB}; \quad (6a)$$

$$K_{24} = 3,7 + 14,1 M + 5,7 \cdot M^2 \text{ dB}; \quad -4 \text{ dB} \leq K_{24} \leq 0 \text{ dB}; \quad (6b)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \cdot M^2 + \Delta_1 (= K_{23}) \text{ dB}; \quad (6c)$$

donde:

$$\Delta_1 = 10 \cdot \lg(f / f_1) \text{ dB} \quad \text{para } f > f_1 \quad (7a)$$

$$f_1 = 125 \text{ Hz si } (E_1 / e_1) \approx 100 \text{ M N/m}^3 \quad (7b)$$

Siendo:

E_1 módulo de Young, en N/m^2 ,
 e_1 espesor del elemento flexible interpuesto, [m]

Respecto a las anteriores, aparece un factor corrector Δ_1 que representa la evolución en función de la frecuencia de los K_{ij} y que es válido para una relación determinada entre el Módulo de Young y el espesor de la lámina interpuesta.

2 Modelo 2D en elementos finitos

2.1 Técnica de los elementos finitos

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. En el presente trabajo las uniones se han mallado con elementos planos de ocho nodos, con dos grados de libertad por nodo: desplazamientos en X e Y. El número medio de elementos por modelo de unión es de 10000. La ecuación del movimiento armónico a resolver es la siguiente:

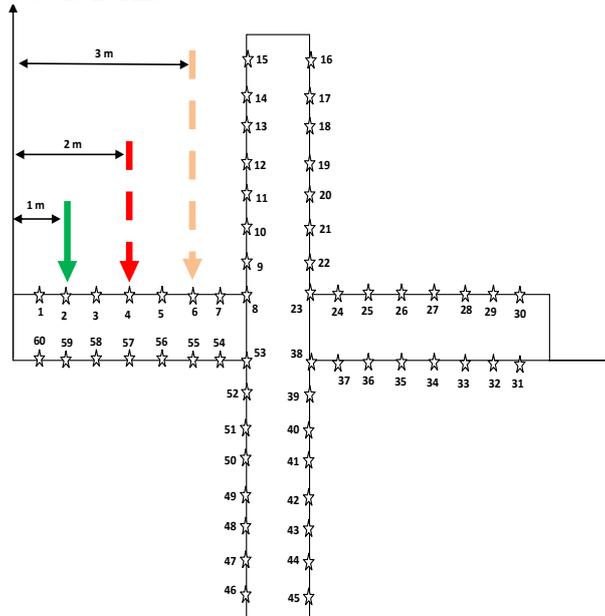
$$\{F(t)\} = [M] \left\{ \frac{d^2 y}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dy}{dt} \right\} + [K] \{y\} \quad (8)$$

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 [10]

2.2 Modelos 2D de unión en cruz y en T

Para realizar un acercamiento al problema, se propone intentar simular las condiciones de la norma 10848, 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 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 condición impuesta con la fórmula (7b), y un factor de pérdidas de 0,2.

Se aplica una fuerza constante en el margen de frecuencias considerado de 1 N 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 medida, 0,5 m, siguiendo el espíritu de la norma.



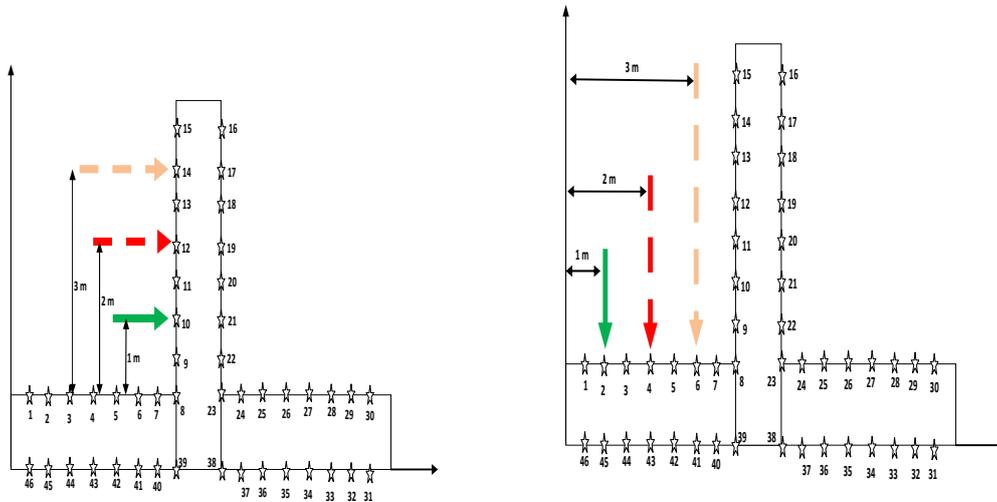


Figura 3. Modelo para unión rígida en + de elementos homogéneos (figura 3 a). Modelo para unión rígida en T de elementos homogéneos (figura 3 b y c).

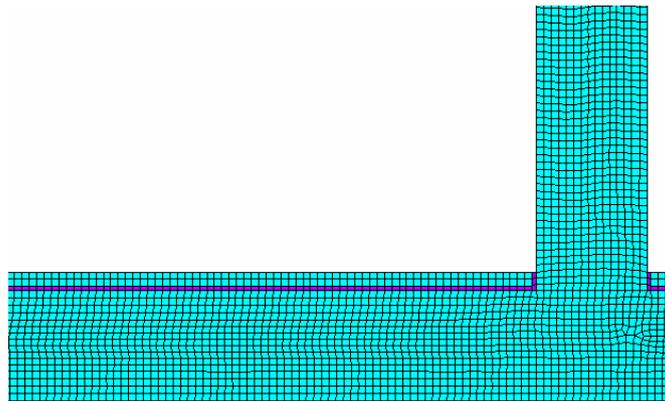


Figura 4. Unión mallada con la lámina para el estudio mediante elementos finitos.

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 velocidades promedio.

Para la obtención del tiempo de reverberación estructural, se sigue la siguiente expresión, dada por la 12354-1:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{TOT}} \quad (9)$$

Donde el factor de pérdidas total se puede obtener mediante la relación:

$$\eta_{TOT} = \eta_{int} + \frac{m}{485\sqrt{f}} \quad (10)$$

Siendo m la masa por unidad de área. La fórmula es válida, según la UNE-EN 12354-1, para $m < 800 \text{ kg/m}^2$.

3 Resultados

3.1 Resultados de unión en cruz. Comparativa rígida-flotante

Se presentan resultados del índice de reducción vibracional para la configuración en cruz, K_{12} y K_{14} , comparándolas, y K_{13} . K_{12} y K_{14} representan el camino desde forjado emisión hasta medianera recepción y son, además simétricos. Además, se presentan valores globales de los índices de reducción, independientes de las frecuencias, calculados según normativa como media aritmética de los valores en el espectro de frecuencias, en hercios, de 200 a 1250. Estos valores son comparados con los que se obtienen utilizando las soluciones simplificadas, expresión 6a. También hemos comparado algunos de los resultados obtenidos, en función de la frecuencia, con los valores sin la lamina flotante.

Tabla1. Valores globales de los Índices de Reducción Vibracional para tres configuraciones de masas diferentes. Configuración en Cruz.

	240 kg/m ²	480 kg/m ²	720 kg/m ²	K _{ij} (6a)
K₁₂	38,9 dB	48,3 dB	53,8 dB	11,7 dB
K₁₄	39,0 dB	48,2 dB	53,6 dB	11,7 dB
K₁₃	48,9 dB	59,5 dB	62,3 dB	17,8 dB

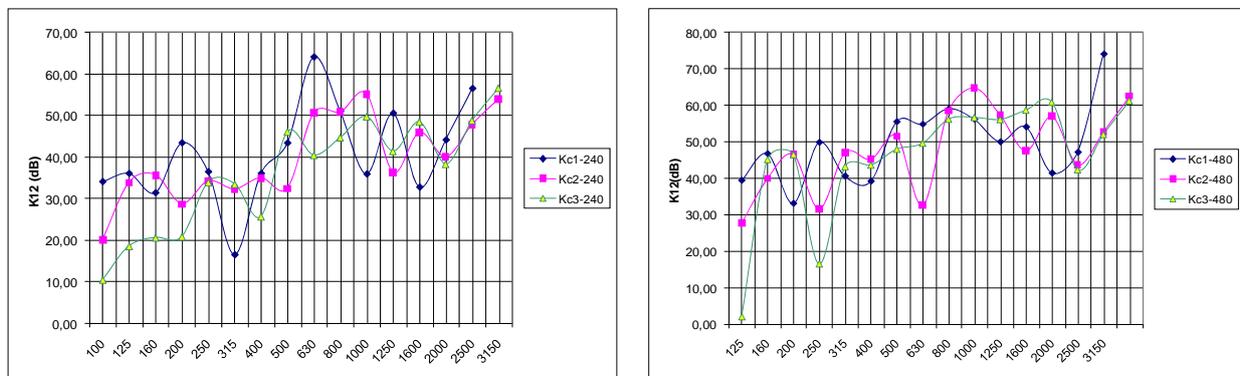


Figura 5. Medidas para la obtención del índice de reducción vibracional K_{12} , para configuraciones de 240 y 480 kg/m². Se ha calculado a 3m (C1), 2m (C2) y 1m (C3) de la unión.

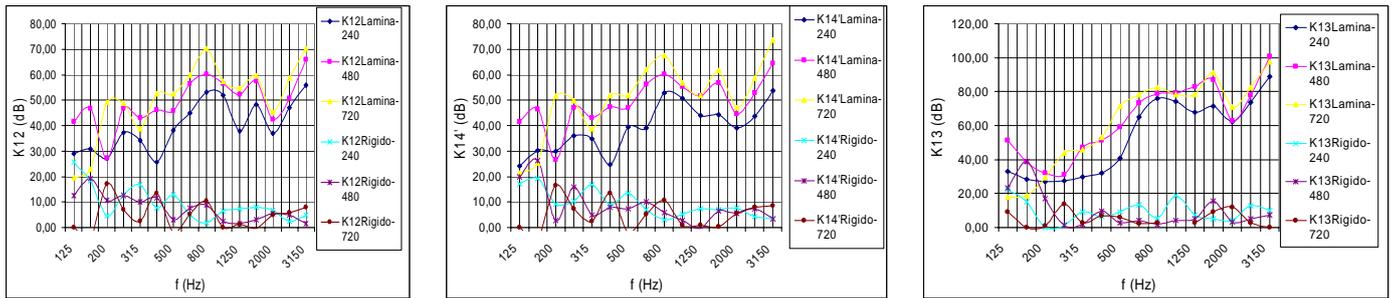


Figura 6. Índices de reducción Vibracional K_{12} , K_{14} y K_{13} para configuraciones en cruz de 240, 480 y 720 kg/m² con lámina flotante y en unión rígida.

3.2 Resultados de unión en T. Comparativa rígida-flotante

Se presentan resultados del índice de reducción vibracional para la configuración en T, K_{14} y K_{41} . Se comparan los índices K_{14} y K_{41} . En este apartado también se presentan valores globales, pero en este caso de la unión en T y comparados con los obtenidos mediante la expresión 6b, también compararemos los resultados en función de la frecuencia con los obtenidos en el caso de la misma unión rígida, sin la lámina flotante.

Tabla2. Valores globales de los Índices de Reducción Vibracional para tres configuraciones de masas diferentes. Configuración en T.

	240 kg/m ²	480 kg/m ²	720 kg/m ²	$K_{ij}(6b)$
K_{14}	30.0dB	37.2 dB	38.2 dB	11.7dB
K_{41}	20.6 dB	18.1 dB	18.4 dB	11.7dB

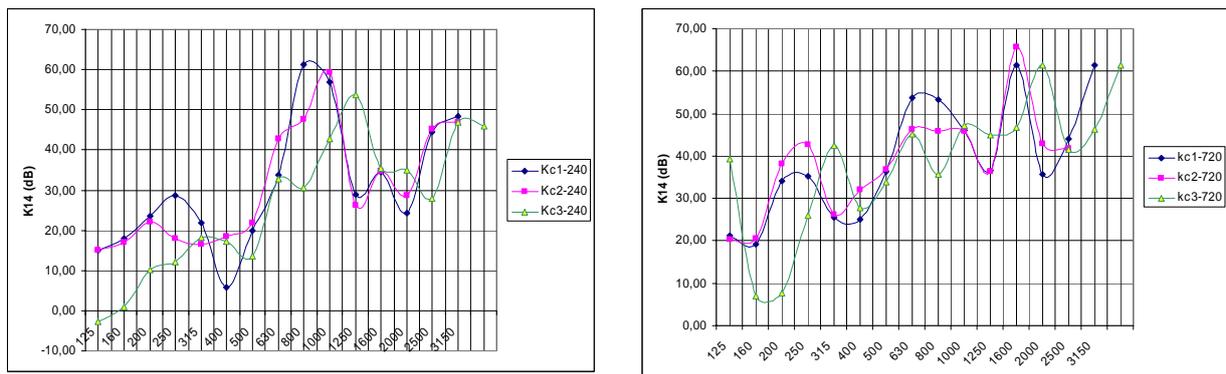


Figura 7. Medidas para la obtención del índice de reducción vibracional K_{14} (unión en T), para configuraciones de 240 y 720 kg/m². Se ha calculado a 3m (C1), 2m (C2) y 1m (C3) de la unión.

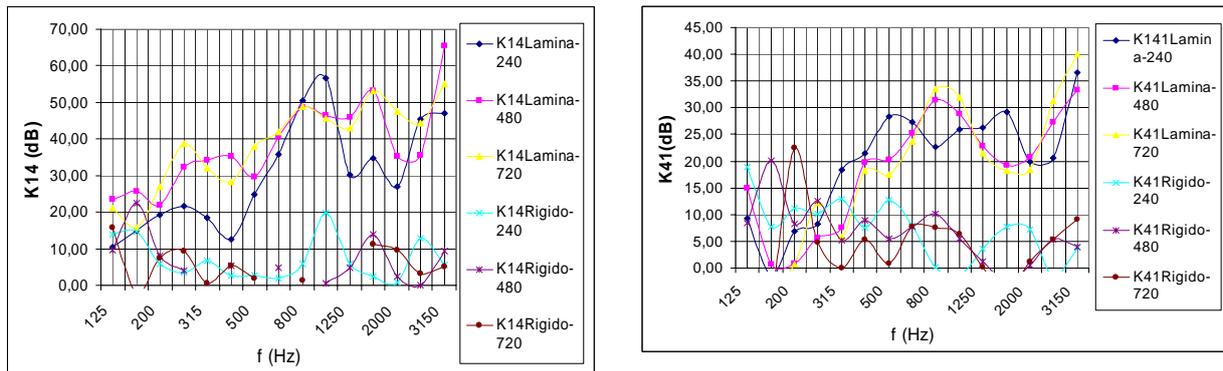


Figura 8. Índices de reducción Vibracional K_{14} y K_{41} para configuraciones en cruz de 240, 480 y 720 kg/m^2 con lámina flotante y en unión rígida. Configuración en T.

4 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Las conclusiones de este trabajo preliminar son las siguientes. En primer lugar, se puede observar como la introducción de la lámina flotante ha conseguido que los valores del K_{ij} se eleven sustancialmente, respecto a los valores sin lámina que configuran una unión rígida. Sin embargo, lo obtenido no coincide con las fórmulas ofrecidas por la norma UNE-EN 12354-1. Además, se puede observar la tendencia creciente de los valores y cómo no parece que haya una dependencia clara con la masa de los elementos que configuran la unión.

Se pretende realizar más pruebas con diferentes láminas y valorar el efecto separado de láminas y diferentes masas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02).

Referencias

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] UNE EN 12354-3: 2001 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra el ruido del exterior.
- [5] ISO 10848-parts 1, 2 and 3. Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms.
- [6] 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.
- [7] Alba, J., Venero, J., del Rey, R., Ramis, J., Escuder, E. Vibration Reduction Index of different junctions measured in situ. *ICA 2007*. 2-7 September 2007.
- [8] M^a A. Martín, A. I. Tarrero, A. Aparicio, J. González, M. Machimbarrena "Determinación del índice de reducción vibracional y análisis de los parámetros involucrados". *Tecniacústica 2006, 37º Congreso nacional de acústica. Encuentro ibérico de acústica. EAA Symposium on Hydroacoustics*, Gandia, 18-20 octubre, 2006
- [9] J. Alba, J. Ramis, J. Venero, E. Escuder, L. Bertó, "Medida in situ de transmisiones indirectas y análisis de su influencia en el aislamiento acústico de una medianera", *Tecniacústica 2006, 37º Congreso nacional de acústica. Encuentro ibérico de acústica. EAA Symposium on Hydroacoustics*, Gandia, 18-20 octubre, 2006 Pr. Hooch, M. Mc Gonagall, V. Krum, "A new device to amplify voices during a Quidditch match", *Acta Acustica united with Acustica* 55, 147-159 (1984)
- [10] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., "El método de los elementos finitos", 4ª edición Mc Grau Hill, CIMNE (Barcelona) Volumen 1 y 2 (1993)