

PREDICCIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL DE UNIONES EN CRUZ Y EN T MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Alba Fernández, Jesús¹; Ramis Soriano, Jaime²; Del Rey Tormos, Romina¹; Juliá Sanchis, Ernesto³; Segura Alcaraz, Jorge Gabriel³

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 Gandia 46730 (Valencia)

²Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría.
Universidad de Alicante - Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante

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

{jesalba@fis.upv.es, jramis@ua.es, roderey@doctor.upv.es}

Resumen

Para valorar el efecto de las transmisiones laterales de un diseño, se ofrecen actualmente formulaciones dentro de la UNE-EN 12354 en sus diferentes partes, donde aparecen simplificaciones del método SEA para obtener el índice de reducción vibracional para ciertas tipologías de unión en + o en T. Estas simplificaciones se justifican ya que se desarrollaron en los años 80 con técnicas computacionales limitadas.

En este trabajo se realiza un estudio mediante el método de los elementos finitos, de diferentes configuraciones en + y en T con el fin de reajustar nuevas fórmulas de predicción para este tipo de uniones, en función de la relación de masas y simulando la medición en diferentes posiciones de medida y excitación que se describe en la UNE-EN ISO 10848-1.

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

Abstract

In order to assess the effect of the lateral transmissions of a design, nowadays formulations are offered in the UNE-EN 12354 in its different parts, with simplifications of the SEA method to get the vibration reduction rate for some kinds of union in + or in T. These simplifications are justified since they were developed in the 80s using limited computational techniques.

In this project, a study using the finite elements method, of different configurations in + and T is carried out so as to readjust new prediction ways/formula for these kind of unions, according to the relation of masses and simulating the measurement in different measure and stimulation positions which is described in the UNE-EN ISO 10848-1.

Keywords: Lateral transmissions, acoustic isolation, vibration reduction rate, finite elements, prediction.

1 Introducción

En los últimos cinco años, con el proceso de discusión abierto para la mejora de la calidad acústica de la edificación, se ha reconocido la importancia del uso de herramientas predictivas para valorar previamente el estado acústico en fase de proyecto. Actualmente ya no se cuestiona la importancia del conocimiento del efecto de los flancos en el aislamiento acústico global en un diseño completo de cualquier unidad de uso [1]. Es más, se fomenta el uso de métodos reconocidos como base para la predicción previa del efecto de un flanco y su repercusión en el conjunto del diseño.

El método reconocido más habitual para valorar acústicamente la transmisión por flanco es el de valorar el índice de reducción vibracional que podemos asociar a la unión en un camino determinado, desde el recinto emisor al receptor, diferente al camino principal. Este índice de reducción vibracional, que nace del método SEA y se simplifica para el uso de ecuaciones relativamente más sencillas, engloba la transmisión de energía en el camino decidido y las pérdidas asociadas a los elementos constituyentes de la unión.

Actualmente se puede obtener el índice de reducción vibracional 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 [2] que referencia las normas UNE-EN 12354 [3-5] donde se pueden encontrar las diferentes formulaciones y sus limitaciones.

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 [6], 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 [7-9].

En este trabajo se realiza un estudio mediante el método de los elementos finitos, de diferentes configuraciones en + y en T con el fin de reajustar nuevas fórmulas de predicción para este tipo de uniones, en función de la relación de masas y simulando la medición en diferentes posiciones de medida y excitación que se describe en la UNE-EN ISO 10848-1, valorando la influencia de las colocaciones de sensores y excitadores en la obtención de los valores finales del índice de reducción vibracional.

2 Índice de Reducción Vibracional

2.1 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 [6]. 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.

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

2.2 Determinación experimental del índice de reducción vibracional

Tal y como se especifica en la UNE-EN ISO 10848-1 [6], es posible obtener el valor de K_{ij} 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. Sin embargo, en la misma normativa prácticamente se desecha el uso de excitación con ruido aéreo, recomendando el uso de máquina de impactos modificada o vibrador, para realizar una excitación directa sobre el elemento de ensayo. Además, debe ser estacionaria, en función del método de medida elegido.

Para la obtención de la diferencia de velocidades, se marca, en condiciones de laboratorio, las condiciones geométricas que se marcan en la figura 1, con las distancias tomadas desde la superficie.

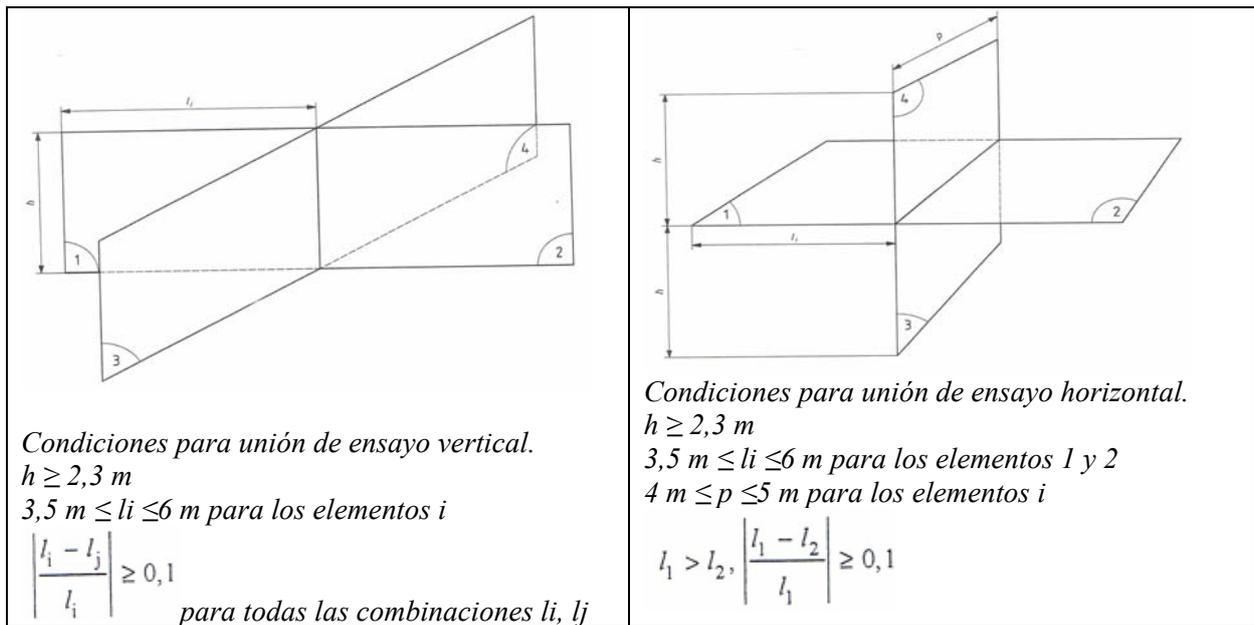


Figura 1 – Condiciones geométricas de la 10848-1

Por tanto, existen una serie de limitaciones claras para los tamaños de las muestras que deben ensayarse, desde el punto de vista de laboratorio, por lo cual, aún será más complicada la medición “in situ”.

Respecto a la medida de la diferencia de velocidades, existen una serie de limitaciones. Si se mide con máquina de impactos en el suelo, debe tomarse como referencia la UNE-EN ISO 140-6. En la figura 2 se muestra el área mínima a tener en cuenta, donde el área sombreada muestra la zona donde no se debe colocar la máquina.

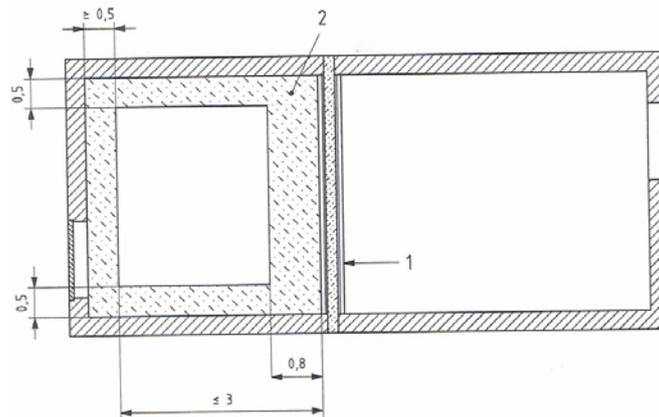


Figura 2 – Área válida para el uso de la máquina de impactos

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. Realmente el rango debe situarse entre 5, 20 o 25 dB por debajo del nivel máximo, teniendo en cuenta principalmente el rango superior de las curvas. 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 de este procedimiento, debe 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, que puede cuestionar en algunos casos el valor final obtenido.

2.3 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 [3-5] 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 UNE –EN 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. Algunos ejemplos de fórmulas empíricas, que posteriormente se usan en este trabajo son “Unión rígida en + de elementos homogéneos” de la figura 3 y la “Unión rígida en T de elementos homogéneos” de la figura 4.

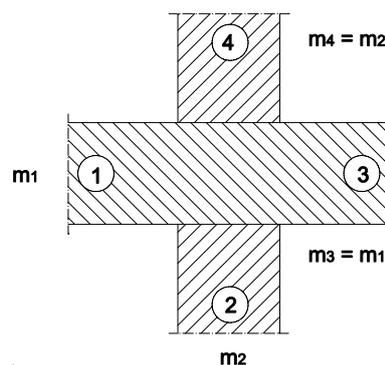


Figura 3. Unión rígida en + de elementos homogéneos

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

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

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

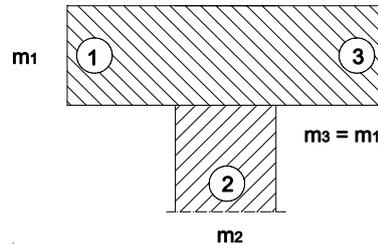


Figura 4. Unión rígida en T de elementos homogéneos

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

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

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

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 [3].

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.

3 Modelo 2D en elementos finitos

3.1 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:

$$\{F(t)\} = [M] \left\{ \frac{d^2 y}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dy}{dt} \right\} + [K] \{y\} \quad (6)$$

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].

3.2 Modelos 2D de unión en cruz y en T

Para realizar un acercamiento al problema, se propone intentar simular las condiciones de la norma UNE-EN ISO 10848-1 [6], respecto a la colocación de fuentes de excitación y transductores de medida y respecto al tamaño de las muestras. En la figura 5 se muestra el modelo en cruz utilizado. En la figura 6 se muestra el modelo en T. 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.

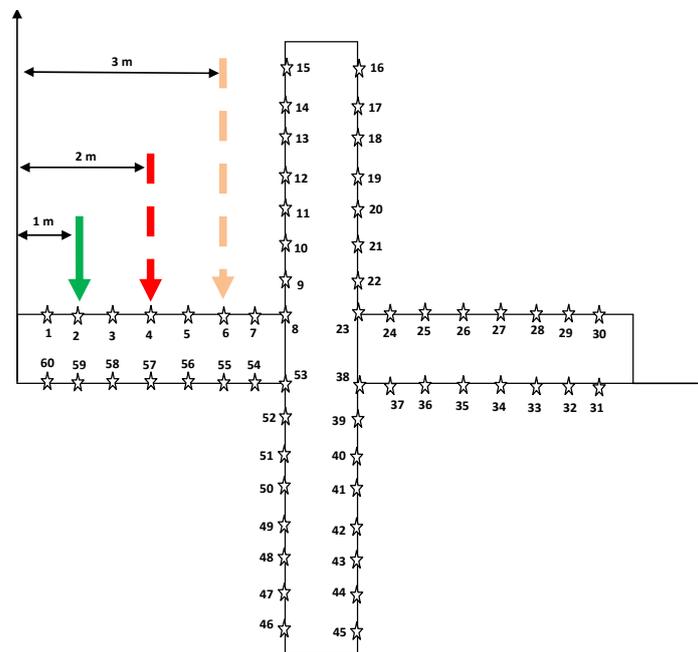


Figura 5. Modelo para unión rígida en + de elementos homogéneos

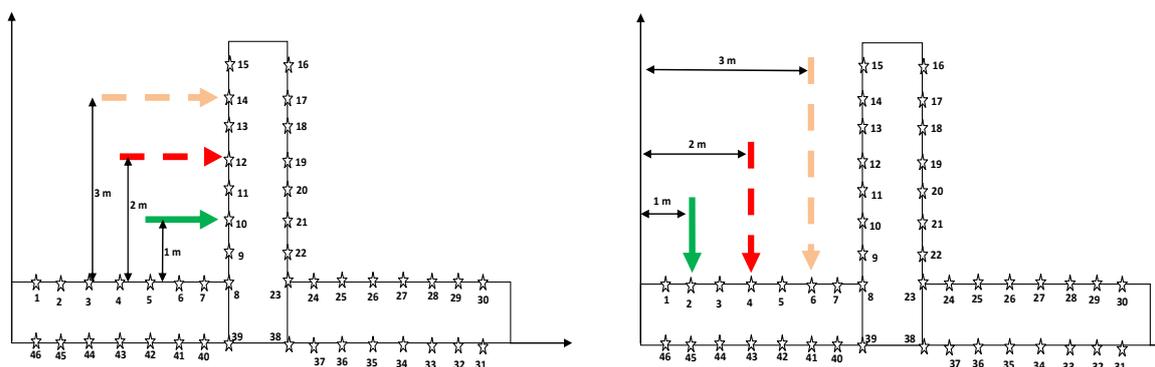


Figura 6. Modelo para unión rígida en T de elementos homogéneos

Como se muestra en la figura, 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.

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:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{TOT}} \quad (7)$$

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

$$\eta_{TOT} = \eta_{int} + \frac{m}{485\sqrt{f}} \quad (8)$$

Siendo m la masa por unidad de área. La fórmula es válida, según la UNE-EN 12354-1, para $m < 800$ kg/m².

4 Resultados

4.1 Resultados de unión en cruz

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 la 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 3 a.

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
K₁₂	8.3 dB	7.6 dB	6.1 dB
K_{14'}	9.0 dB	6.3 dB	6.2 dB
K₁₃	8.9 dB	5.3 dB	4.8 dB
K_{ij}(3a)	8.7 dB	8.7 dB	8.7 dB

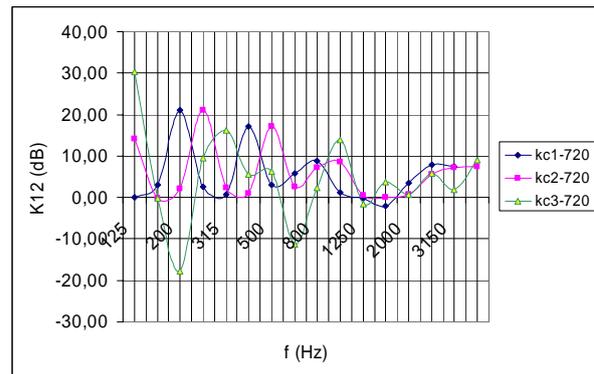
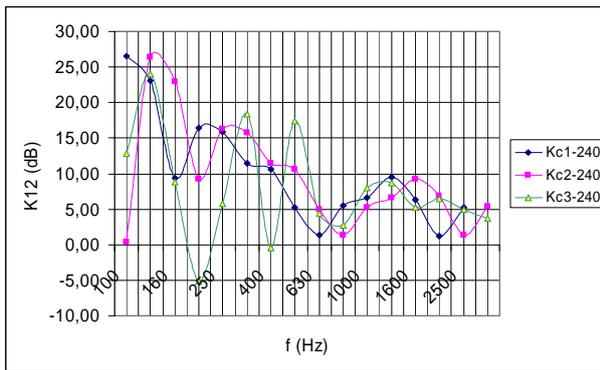


Figura 7. Medidas para la obtención del índice de reducción vibracional K_{12} , para configuraciones de 240 y 720 kg/m². Se ha calculado a 3m (C1), 2m (C2) y 1m (C3) de la unión.

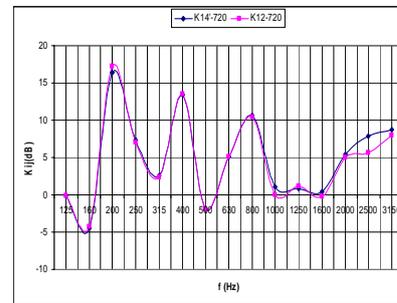
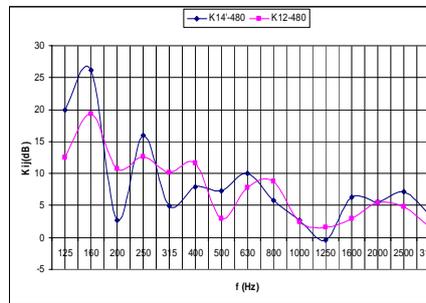
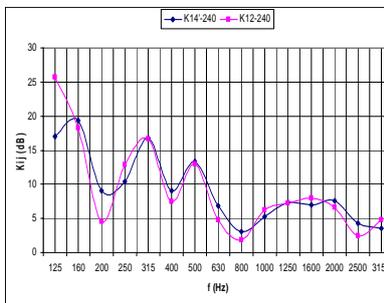


Figura 8. Índices de reducción Vibracional K_{14} y K_{12} para configuraciones en cruz de 240, 480 y 720 kg/m²

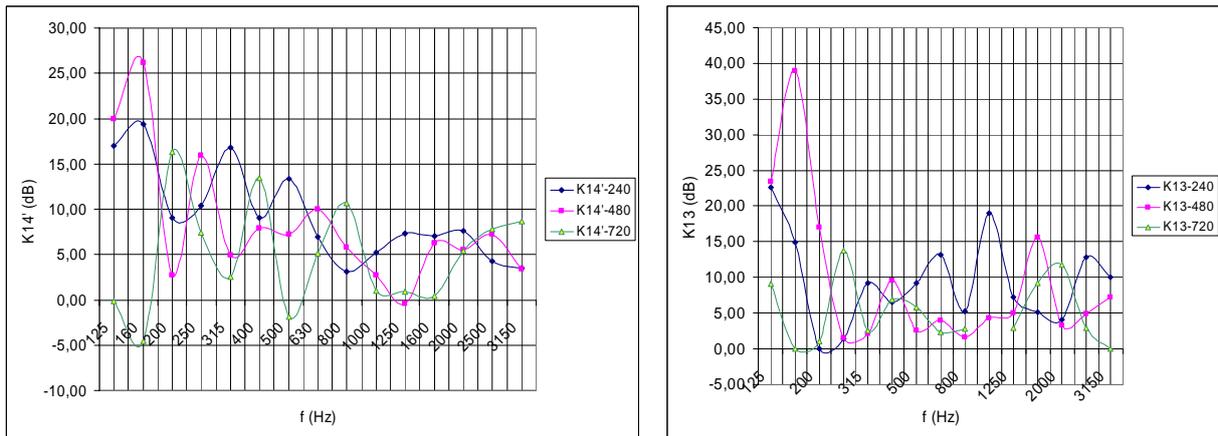


Figura 9. Índice de Reducción Vibracional K_{14} y K_{13} para configuraciones en cruz de 240, 480 y 720 kg/m^2

4.2 Resultados de unión en T

Se presentan resultados del índice de reducción vibracional para la configuración en T, K_{14} , K_{41} y K_{14} . 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 3b.

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_{14}	6.1 dB	4.6 dB	4.3 dB
K_{14}	5.9 dB	6.3 dB	9.4 dB
K_{41}	7.2 dB	7.2 dB	6.1 dB
$K_{ij}(3b)$	5.7 dB	5.7 dB	5.7 dB

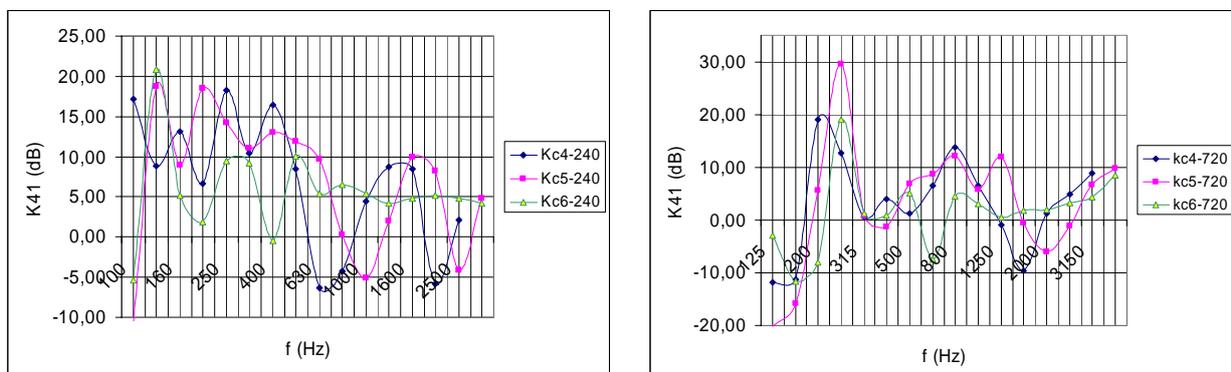


Figura 10. Medidas para la obtención del índice de reducción vibracional K_{41} , para configuraciones de 240 y 720 kg/m^2 . Se ha calculado a 3m (C4), 2m (C5) y 1m (C6) de la unión.

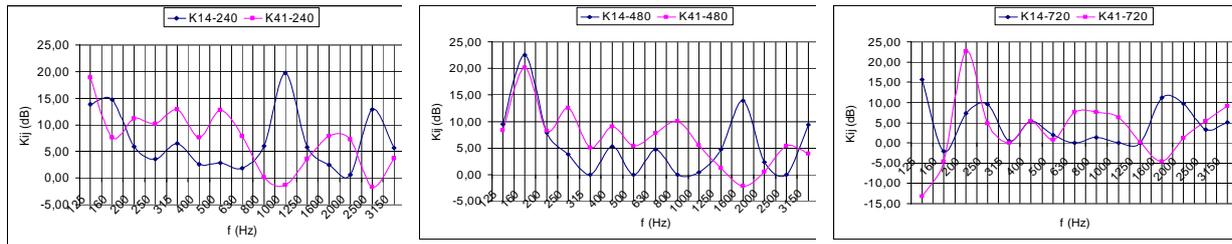


Figura 11. Índices de reducción Vibracional K_{14} y K_{41} para configuraciones en T de 240, 480 y 720 kg/m^2

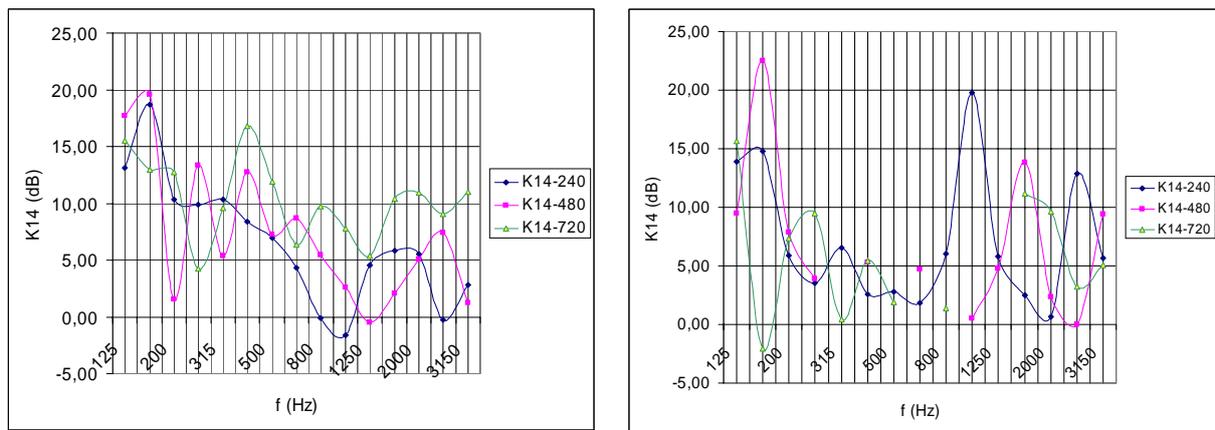


Figura 12. Índice de Reducción Vibracional $K_{14'}$ y K_{14} para configuraciones en cruz de 240, 480 y 720 kg/m^2

5 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Algunas de las conclusiones de este trabajo son las siguientes. Respecto a la comparativa de las fórmulas empíricas con los resultados obtenidos, tanto en unión en cruz como en T, se puede observar que el valor del K_{ij} correspondiente parece encajar cuando se compara con masas de 240 kg/m^2 . Sin embargo, al aumentar la masa de la unión los valores divergen de los obtenidos mediante las ecuaciones empíricas.

Respecto a la evolución del valor del K_{ij} en función de la frecuencia, en lo obtenido por elementos finitos existen ondulaciones que hacen ver que, por lo menos, a través de este método, se obtienen cambios significativos en función de la frecuencia y K_{ij} no parece asociable a una constante.

Actualmente se están realizando los cálculos pertinentes, con cambios de masa controlados y evaluando la influencia del punto de medición respecto a la fuerza de excitación.

Agradecimientos

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

Referencias

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] ISO 10848-parts 1, 2 and 3. Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms.
- [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, 2006Pr. 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)