



**45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA  
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA  
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND  
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS**

**ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE LAS VIBRACIONES USANDO  
MODELOS A TAMAÑO REDUCIDO**

**PACS:** 43.40.r

**Autores:** Molina Pedro; Torres Jeniffer; Segovia Enrique; Ramis Jaime.

**Institución:** Universidad de Alicante

**Dirección:** Carretera San Vicente del Raspeig s/n - 03690 San Vicente del Raspeig - Alicante

**Población:** Alicante

**País:** España

**Tel:** +34 96 590 3400

**Fax:** +34 96 590 3464

**E-Mail:** jtr17@alu.ua.es

**RESUMEN**

En este trabajo se presenta un estudio experimental del comportamiento vibratorio de dos estructuras que simulan dos esquinas a tamaño reducido con el objeto de evaluar los efectos de instalación de un suelo flotante. La metodología experimental se basa en un sistema alternativo para la adquisición de datos y la incorporación de una fuente no convencional como elemento excitador: un actuador similar a los que se utilizan en altavoces de modos distribuidos. Los resultados se comparan con una modelo en elementos finitos logrando una gran correlación.

**STUDY OF VIBRATION TRANSMISSION EMPLOYING REDUCED SIZE  
MODELS**

**ABSTRACT**

In this paper, an experimental study about the vibrational behavior of two structures to simulate two corners a reduce size is presented. The principal goal of this study is evaluated the effects when a floating floor is installed. The experimental methodology is based in an alternative system in the data acquisition and the incorporation of a non-conventional source as exciter element; an actuator similar to the loudspeakers used in the electroacoustic systems of the distributed mode. The results are compared with a finite element model achieved a high correlation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La serie de normas técnicas UNE EN ISO 12354-1-2<sup>1,2</sup>, presenta un sistema, de ecuaciones para predecir el comportamiento acústico de distintos elementos constructivos en una edificación. Este modelo de cálculo está basado en la teoría del Análisis Estadístico de la Energía SEA por sus siglas en inglés (*Statistical Energy Analysis*)<sup>3</sup>. Como es sabido, esta es una técnica predictiva que tiene su origen hace más de 50 años y que se ha adoptado para resolver varios problemas en ingeniería dada su facilidad para resumir variables. A su vez, la norma UNE EN ISO 10848-1<sup>4</sup> presenta los requerimientos para medir *insitu* la transmisión por flancos, el cálculo de la diferencia de nivel de velocidad  $D_{vij}$  y el índice de reducción de vibraciones  $K_{ij}$ .

Al ser complejo el estudio en situaciones reales, este proyecto propone el estudio del fenómeno en estructuras a tamaño reducido<sup>5</sup>, con el fin de explicar el fenómeno físico de la transmisión de ondas sonoras en sistemas acoplados y cuando se adapta a estos una solución constructiva (este caso específico un piso flotante).

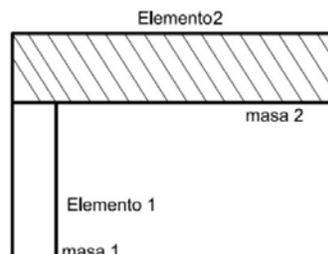
Para el análisis de las estructuras se propone un procedimiento experimental alternativo presentado en<sup>6,7,8</sup>, que se basa en la implementación de una fuente no convencional para medir vibración, como lo es un actuador. Este tipo de sistemas electro-acústicos son comúnmente usados en la tecnología llamada DML (*Distributed Mode loudspeakers*) y como señal de prueba se emplea la técnica de secuencias de máxima longitud (*MLS, Maximun Length Sequence*)<sup>9</sup>, el uso de esta técnica permite obtener parámetros como el tiempo de reverberación estructural y obtener las formas modales ya que permite tener correlación de fase entre los puntos de medida, haciendo posible observar fenómenos en el dominio del tiempo y del espacio para el sistema bajo estudio.

Finalmente, este trabajo expone los resultados obtenidos para el cálculo de la Diferencia de nivel de velocidad  $D_{vij}$  y del índice de reducción de vibraciones  $K_{ij}$  cuando se incorpora un sistema de suelo flotante en la base de estas estructuras. Así como un análisis modal exhaustivo para reconocer el límite en frecuencia de las estructuras y la influencia de las condiciones de contorno, para que los resultados tengan validez bajo los supuestos de SEA. Estos datos fueron comparados con modelos numéricos en FEM<sup>10</sup> obteniendo una alta correlación de datos.

## 2. CONCEPTOS

### 2.1 Modelo SEA en una unión

Para cualquier tipo de unión estructural donde existan dos placas o más conectadas entre sí, cada onda incidente en la articulación generará ondas en todas las placas conectadas. Para una articulación transversal, si cada placa se modela como un subsistema independiente y se supone que sólo admite ondas flexión, el modelo de SEA<sup>3</sup> es como se muestra en la figura 1.



**Figura 1:** Esquema del flujo de la energía entre dos placas conectadas transversal.

La placa fuente siempre se nombra con  $i$  o  $1$  y la placa receptora con  $j$  o  $2$ . SEA supone que todas las placas están hechas del mismo material pero tienen distintos espesores. También se supone que la unión entre las placas es fijo. Las placas están libres para rotar en las articulaciones, pero, debido a las fuerzas de las otras placas, no existen desplazamientos. Esta es una suposición razonable a baja frecuencia y como consecuencia no se generan ondas

longitudinales y solo se generan ondas flexión en la transmisión sonora. Estos supuestos se concluyen matemáticamente con la ecuación 1.

$$R_{12} = 10 \log \left( H_{12}^{\frac{5}{4}} + H_{21}^{-\frac{5}{4}} \right)^2 / 2 \quad (1)$$

donde  $H_{12}$  es la relación de espesores entre el elemento 1 y 2 y  $H_{21}$  es la relación de espesores entre el elemento 2 y 1.

La serie de normas UNE EN ISO 12354<sup>1,2</sup> se basan en estos supuestos para la estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos y la norma UNE EN ISO 18048-1<sup>4</sup> explica la forma de medir en laboratorio la transmisión por flancos del ruido aéreo y re ruido de impacto entre recintos adyacentes.

A continuación se explican conceptos de estas normas que obedecen a los cálculos efectuados en el proyecto.

### 2.2 Nivel de velocidad promedio.

El nivel de velocidad promedio es definido en la ecuación 2 como diez veces el logaritmo decimal del cociente de la velocidad normal cuadrática promediada espacio-temporalmente de un elemento y la velocidad de referencia al cuadrado.

$$L_v = 10 \log_{10} \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n v_0^2} \text{ dB} \quad (2)$$

donde  $v_1, v_2, v_n$  son las velocidades eficaces (cuadráticas medias) en  $n$  posiciones diferentes sobre el elemento que se está midiendo, en metros por segundo y  $v_0$  es la velocidad de referencia cuyo valor viene recomendado en la Norma ISO 1683<sup>11</sup> y es  $1 \times 10^{-6}$ , en metros por segundo.

### 2.3 Diferencia de nivel de velocidad.

La diferencia de nivel de velocidad, está definido por la diferencia entre el nivel de velocidad promedio de un elemento  $i$  y el de un elemento  $j$ , cuando solamente se está excitando el elemento  $i$ , como se explica en la ecuación 3..

$$D_{vij} = L_{vi} - L_{vj} \quad (3)$$

donde,  $L_{vi}$  Nivel de velocidad en el elemento excitado ( $i$ ),  $L_{vj}$  Nivel de velocidad en el elemento receptor ( $j$ )

### 2.4 Índice de reducción de vibración

El índice de reducción de vibraciones viene dado por la ecuación 4, en decibelios. Está definido en la Norma EN 12354-1<sup>1</sup> como una magnitud inalterable para caracterizar una unión entre elementos. Esta magnitud se basa en una simplificación de la teoría del análisis estadístico de la energía (SEA - *Statistical Energy Analysis*).<sup>3</sup>

Las principales hipótesis que hacen posible la utilización de esta magnitud, son:

- El acoplamiento entre los elementos  $i$  y  $j$  es débil. SEA considera que los caminos de transmisión descritos en el sistema se pueden considerar independientes.
- Los campos de vibración en los elementos son difusos. Es decir, debe haber un rango frecuencias donde el número de modos sea suficiente para poder considerar los campos acústicos y vibratorios en el sistema, como estadísticos.

Estas hipótesis son las limitaciones más importantes que pueden encontrarse a la hora de obtener mediciones fiables y precisas en un rango de frecuencias más o menos amplio.

$$K_{ij} = \overline{D_{vij}} + 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \quad (4)$$

donde  $\overline{D_{vij}}$  es la diferencia de niveles de velocidad promediados direccionalmente entre los elementos  $i$  y  $j$ , en decibelios y viene dado por la ecuación 5;  $l_{ij}$  es la longitud de la unión, en metros; y  $a_i$  y  $a_j$ , dados en la ecuación 6, son las longitudes de absorción equivalentes de los elementos  $i$  y  $j$  respectivamente, en metros.

$$\overline{D_{vij}} = \frac{1}{2} (D_{v,ij} + D_{v,ji}) \quad (5)$$

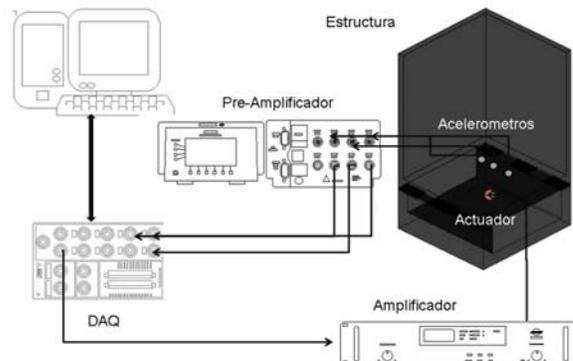
donde  $D_{v,ij}$  es la diferencia entre el nivel de velocidad promedio de un elemento  $i$ , excitado, y el de otro elemento  $j$ , actuando como receptor; y  $D_{v,ij}$  es la diferencia de velocidad promedio entre un elemento  $i$  y un elemento  $j$ , cuando únicamente el elemento  $i$  es excitado. Estas magnitudes se expresan en decibelios.

$$a_j = 2.2 \pi^2 S_j / T_{s,j} c_o \sqrt{\frac{f}{f_{ref}}} \quad (6)$$

donde  $S_j$  es el área superficial del elemento  $j$  en metros cuadrados,  $T_{s,j}$  es el tiempo de reverberación estructural,  $c_o$  velocidad de propagación de las ondas en el aire, en metros por segundo;  $f$  frecuencia en Hz y  $f_{ref}$  es la frecuencia de referencia igual 1000Hz.

### 3. MONTAJE EXPERIMENTAL

El flujo de señal se ilustra en la figura 2. Los métodos clásicos de medida de vibraciones utilizan dos técnicas para la excitación de la estructura; martillos y/o excitadores modales (*shakers*). En este caso, se usa un excitador electrodinámico, comúnmente usado en sistemas de audio casero conocido como DML (*Distributed Mode Loudspeaker*). La tabla 1 describe las características del excitador. La señal de entrada es una secuencia de máxima longitud conocida como MLS (*Maximun Length Sequence*<sup>9</sup>). La principal ventaja de esta técnica es la posibilidad de obtener la respuesta impulsiva en cada uno de los puntos de medida, así de esta manera lograr estudiar el sistema en régimen transitorio por medio de una medida estacionaria. Las propiedades de la secuencia usada en el experimento se describen en la tabla 2.



**Figura 2.** Esquema del montaje experimental usado en la metodología de medida.

Referencia Fabricante	Foto	Características
HIAX25C05-4		<b>Impedancia:</b> 4Ω <b>Dimensiones:</b> 52mm x 44mm <b>Espesor:</b> 14.5mm <b>Masa:</b> 60g <b>Fr:</b> 210 Hz.

Parámetro	Valor
Quantización (bits)	16
Rango de muestreo (fs) (kHz)	96
Longitud de la señal(L)	32768
Numero de secuencias (N)	16
Duración de la señal (s)	3

### 3.1 Propiedades mecánicas de los elementos usados

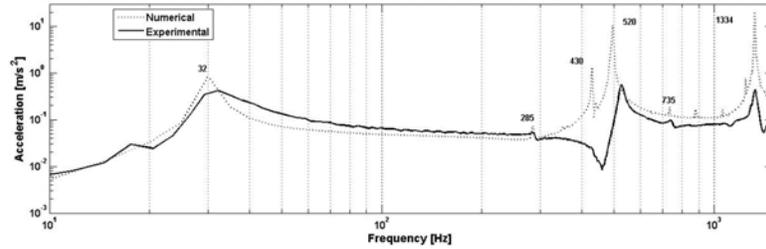
En la tabla 3 se presenta las propiedades mecánicas de los materiales usados en el estudio. La estructura está fabricada de una piedra arenisca llamada Bateig con propiedades similares al hormigón. La losa que hace de piso flotante es de mármol, en el estudio de han usado tres distintos espesores (1 cm, 1.5 cm y 2 cm) con el fin de estudiar las diferencias entre ellos cuando se hace el análisis del índice de reducción de la vibración. Después de realizar pruebas de rigidez dinámica <sup>12,13</sup> a 9 muestras comerciales de materiales visco-elásticos usados como inter-capa en la solución constructiva, se han elegido dos muestras denominadas Muestra 6 y Muestra 9.

Material	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Módulo de Young Pa	Coeficiente de Poisson
Piedra Bateig	2314.81	32(G)	0.23
Mármol	2655.6	80 (G)	0.30
Muestra 6	94.83	183330	0.00
Muestra 9	697.63	177490	0.00

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análisis Modal

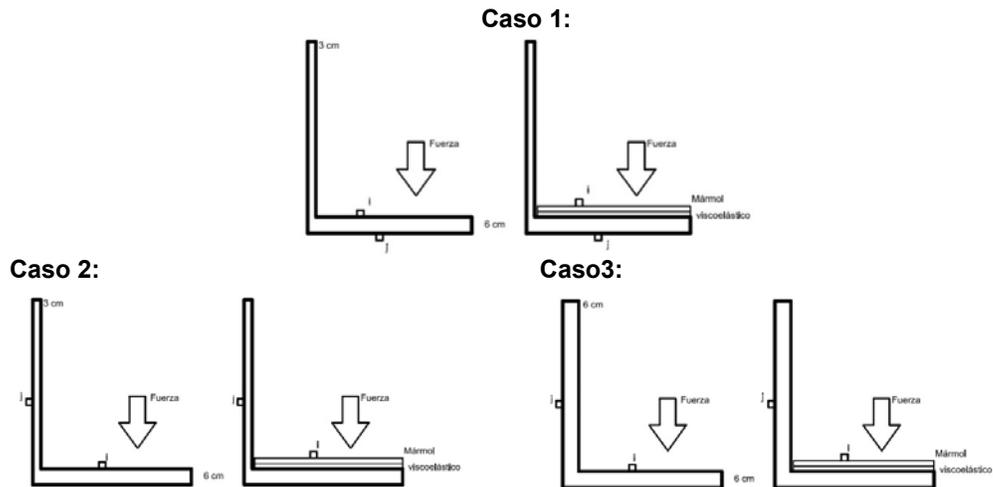
El principal inconveniente en el uso de estructuras a escala reducida son los modos de vibración (baja densidad modal) ya que predomina el movimiento de placa y se ve afectado por las condiciones de contorno<sup>14</sup>. Para validar la respuesta en frecuencia se hace un análisis modal y se compara con el modelo numérico en FEM <sup>10</sup>. Como se puede apreciar en la figura 3 la correlación entre los dos experimentos es alta. Además, permite comprender el comportamiento de la estructura y explicar porque por debajo de los 2kHz hacer un análisis estadístico de la estructura puede sugerir una desviación de los resultados alta, dado que predomina el comportamiento modal de la estructura.



**Figura 3.** Comparación del modelo numérico y experimental para la esquina desnuda.

#### 4.2. Casos de estudio

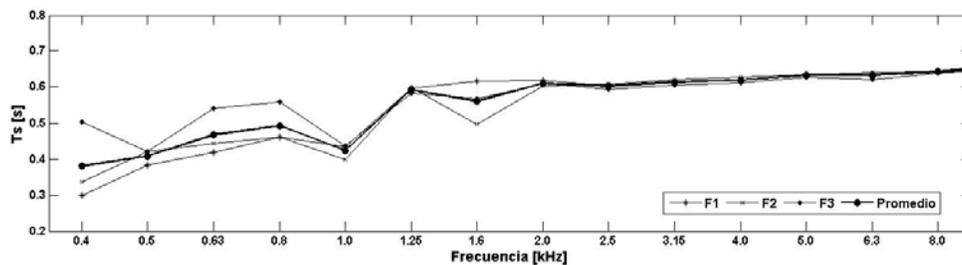
Se han propuesto 3 casos de estudio para la evaluación del  $D_{vij}$  y el  $K_{ij}$ . La figura 4 describe los 3 casos.



**Figura 4.** Ilustración de los casos de estudio.

#### 4.3 Tiempo de reverberación estructural $T_s$ .

Gracias a las ventajas de medir con señales MLS se puede obtener la curva de decaimiento y así obtener el tiempo de reverberación estructural.



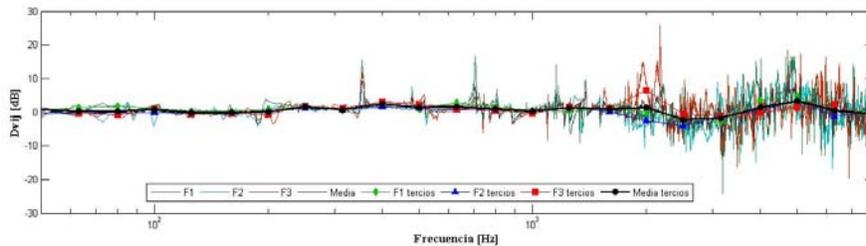
**Figura 5.** Tiempo de reverberación estructural de la placa de Bateig

Como se puede apreciar en la figura anterior, a baja frecuencia (antes de los 2000 Hz) el comportamiento es altamente modal, por lo que el  $T_s$  no es constante. En<sup>1</sup> se sugiere usar como  $T_s$  un valor de 0,5 segundos para materiales monolíticos (como el hormigón) en todas las frecuencias de tercio de octava para las que se hace el análisis (100Hz-5kHz) para estructuras reales. Se puede observar que esa tendencia existe cuando la densidad modal de la estructura es alta, por lo que la técnica propuesta es un acercamiento bastante valido como una técnica alternativa para la evaluación vibro-acústica de estructuras.

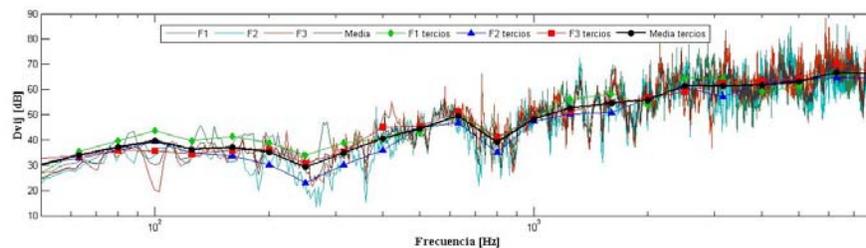
#### 4.4 Diferencia de nivel de velocidad $D_{vij}$

Usando las ecuaciones que aparecen en el apartado 2 de conceptos se calcula el  $D_{vij}$  para la esquina desnuda y con las soluciones constructivas propuestas. A modo de ejemplo se presenta en la figura 6 los resultados obtenidos para los tres casos de estudio (ver figura 4). El primer resultado (figura 6.a) corresponde a la estructura desnuda y las siguientes tres graficas el resultado del  $D_{vij}$  cuando le es adaptado a la estructura el sistema de suelo flotante el cual corresponde a la combinación de la inter-capa denominada muestra 6 y la losa de mármol de 2 cm. Todos los resultados corresponden a tres distintas posiciones de excitación en la parte superior de la losa que hace de piso, y al promedio de estas fuentes. Los resultados se presentan en full banda y por tercios de octava en el rango de 80Hz a 8kHz, el límite en baja frecuencia corresponde al actuador y el límite en alta frecuencia al acelerómetro.

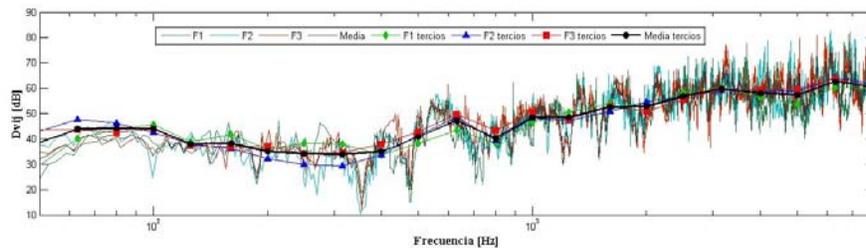
a.



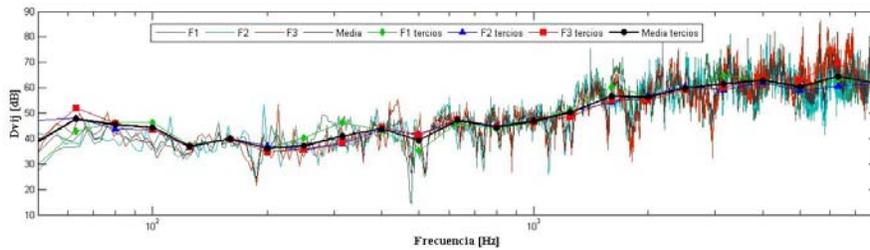
b.



c.



d.



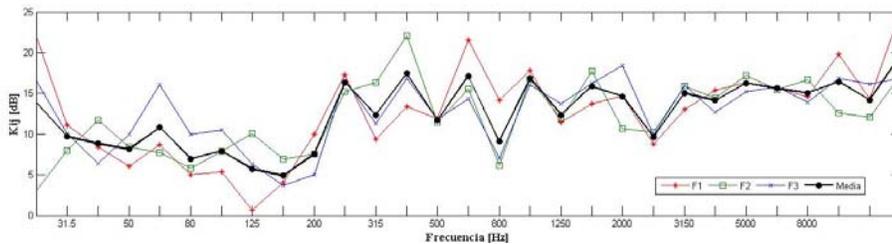
**Figura 6.** Diferencia de nivel de velocidad  $D_{vij}$  cuando las fuentes están en la placa base  
a. Estructura desnuda, b. Caso 1, c. Caso 2, d. Caso 3.

Como se puede apreciar en la anterior figura cuando la losa está desnuda la diferencia de nivel tiende a ser nula puesto que no hay pérdidas en el sistema. Cuando se incorpora la solución constructiva se puede ver claramente la tendencia de la curva a mejorar el rendimiento de la solución a alta frecuencia, mostrando alrededor de los 800 Hz la frecuencia de resonancia por ley de masa.

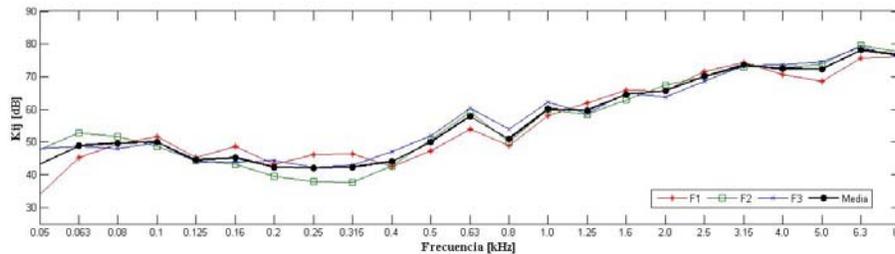
#### 4.5 Índice de reducción de la vibración $K_{ij}$

Ahora bien, como se comentó en el apartado de conceptos para el cálculo del  $K_{ij}$  es necesario obtener la diferencia de velocidades y el tiempo de reverberación estructural. A manera de ejemplo, en la figura 7 se presentan los resultados obtenidos al evaluar la estructura cuando la fuente está en la parte superior de la placa que hace de piso (elemento i) y la pared delgada (elemento j). Se evalúa tanto para la esquina desnuda como cuando se adapta la solución de losa flotante con la losa de mármol de 2 cm y el material nombrado Muestra 6.

a.



b.



**Figura 7.** Índice de reducción de las vibraciones  $K_{ij}$  cuando las fuentes están en la placa base a. Estructura desnuda, b. Caso 2

La figura 7 confirma la utilidad de la herramienta presentada para analizar el índice de reducción de las vibraciones en un gran rango de frecuencia así como el análisis

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio experimental, utilizando señales de prueba del tipo MLS y actuadores como elementos excitadores, del comportamiento vibratorio de dos estructuras que simulan dos esquinas a tamaño reducido con el objeto de evaluar los efectos de instalación de sistema constructivo de suelo flotante. Los resultados del análisis experimental se comparan con los ofrecidos por un modelo en elementos finitos logrando una gran correlación, así como el cálculo del  $D_{vij}$ ,  $T_s$  y  $K_{ij}$  dada la versatilidad de la técnica en cuanto relación señal a ruido y el amplio rango en frecuencia para el análisis (<80Hz-8Khz).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha podido realizar gracias a la ayuda concedida por la Generalitat Valenciana para la realización de proyectos de I+D para grupos de investigación emergentes (expediente GV/2013/019).

## 6. REFERENCIAS

- [1] UNE-EN-ISO 12354-1:2000. Acústica de la edificación, Estimación de las características acústicas de la edificación a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.(2000)
- [2] UNE-EN-ISO 12354-2:2000. Acústica de la edificación, Estimación de las características acústicas de la edificación a partir de las características de sus elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos.(2000)
- [3] Craik R. J. M., Sound Transmission through Buildings: using Statistical Energy Analysis, Gower, Aldershot, Hampshire, England. (1996)
- [4] UNE-EN ISO 10848-1:2006. Acústica, Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacente. (2007).
- [5] Kling C. Investigations into damping in building acoustics by use of downscaled models, Ph.D. Thesis, Aachen, Aachener Beiträge zur Technischen Akustik. (2008).
- [6] Ramis, J, Carbajo, J., Hervás, C., Alba, J. Una alternativa para la caracterización de la lámina flotante en suelos flotantes. 41º Congreso Nacional de Acústica 6º Congreso Ibérico de Acústica. Tecniacústica-León 2010. (2010)
- [7] Torres J. Cárdenas W, Carbajo J, Segovia E, Ramis J. Estudio de la radiación en vigas empleando la Técnica de Medición de Holografía Acústica de Campo Cercano. VIII Congreso Iberoamericano de Acústica -Evora, 2012
- [8] Segovia E. Torres J. Carbajo J. Ramis E. Comparación de Técnicas de Caracterización de Suelos Flotantes. 44º Congreso Español de Acústica. TecniAcústica 2013- Valladolid, (2013)
- [9] Rife D.D, Vanderkooy J., Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences, Journal. Audio Eng. Soc., Vol. 37(6):419-444, (1989).
- [10] COMSOL Multiphysics. COMSOL Documentation, CFD Module, version 4.3. (2011) UNE 9052:1989: Determinación de la rigidez dinámica. Parte1: materiales utilizados bajo suelos flotantes en viviendas. 1989.
- [11] ISO 1683: 2008. Acoustics -- Preferred reference values for acoustical and vibratory levels (2008)
- [12] UNE-EN ISO 29052-1 Acústica de la edificación. Determinación de la Rigidez Dinámica. Parte 1 Materiales usados bajos suelos flotantes en viviendas. (1994).
- [13] Neves A., António A., Nossa A. Resultados Experimentais da Rigidez Dinâmica de Materiais Usados sob Pavimentos Flutuantes. Universidade de Coimbra, Portugal 2008.
- [14] Fahy F., Garddonia P. Sound and Structural Vibration, radiation, transmission and response 2nd Ed. Academic Press. London UK. (2007).