

## VALIDACIÓN DE MODELOS FEM DE TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES EN BARRAS EN L

PACS: 43.40.Cw

Magdaleno, Jesús<sup>1</sup>; Enrique Segovia<sup>2</sup>, Ramis, Jaime<sup>2</sup>; Martín Bravo, M<sup>a</sup> Ángeles<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid

C/ Francisco Mendizábal nº 1

47014 Valladolid

Tel. 34 983 423 525

[magdal@uva.es](mailto:magdal@uva.es)

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidad de Alicante

Carretera San Vicente del Raspeig

03080, San Vicente del Raspeig, España

[jramis@ua.es](mailto:jramis@ua.es)

### ABSTRACT

The finite element method (FEM) is increasingly applied in vibroacoustic. The validation of these models is important to justify its reliability and accuracy, so efforts should be made to document it properly. This work summarizes an experience of model validation, about vibration transmission through L-junction of beams. The flow of energy is analyzed by mean of the velocity level difference. The validation is performed by comparing the results with those obtained experimentally, studying convergence and using 2D and 3D models.

### RESUMEN

La simulación con elementos finitos (FEM) es una metodología cada vez más empleada en vibroacústica. La validación de estos modelos es importante para justificar su fiabilidad y precisión, por lo que conviene dedicar esfuerzos para documentar este proceso adecuadamente. Este trabajo recoge una experiencia de validación de modelos de transmisión de vibraciones en barras unidas en L, analizando el flujo energía mediante la diferencias de nivel de velocidad. La validación se realiza comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente, estudiando la convergencia y realizando modelos 2D y 3D.

### 1. INTRODUCCIÓN

La simulación con elementos finitos (FEM, Finite Element Method) es una metodología cada vez más empleada en vibroacústica, consiguiendo aproximaciones al comportamiento real de las soluciones de diseño adoptadas que son más fiables que las obtenidas por otros métodos de cálculo. Entre las principales ventajas del FEM puede destacarse que son necesarios menos ensayos experimentales. La validación de los modelos FEM es importante para justificar su fiabilidad y precisión, por lo que conviene dedicar esfuerzos para documentar este proceso adecuadamente. Este trabajo recoge una experiencia de validación de modelos de transmisión de vibraciones en barras unidas en L, analizando el flujo energía mediante la diferencias de nivel de velocidad. La validación se realiza comparando los resultados de los modelos FEM con los obtenidos experimentalmente, estudiando la convergencia y realizando modelos con elementos 2D y 3D.

La transmisión vibroacústica en uniones ha sido estudiada por muchos autores a partir de las aportaciones de Cremer en 1948 y de Cremer, Heckl y Ungar en 1973 y 1988 [1]. Un método basado en una aproximación modal es propuesto por Guyader, Boisson y otros [2], aunque reconocen que sería necesario calcular unos 800 modos propios para modelos de estructuras de edificación relativamente simples. Para solventar este problema proponen un cálculo analítico de dichos modos.

El FEM es usado por Simmons [3] para estudiar la transmisión de energía entre placas unidas en L y H, con frecuencias en el rango de 10 a 2000 Hz y excitación mediante una fuerza puntual. Los resultados de transmisión de energía son similares a los obtenidos por métodos analíticos y experimentales. El promediado espacial y en bandas de frecuencia parece suficientemente preciso para estimar la energía vibratoria en las placas. Para calcular la energía cinética utiliza los resultados de desplazamientos en varios puntos. También Mace y Shorter [4] utilizan el FEM para analizar el flujo de energía, incluyendo el postprocesado de resultados.

La verificación y validación es importante para justificar la fiabilidad y precisión de los cálculos realizados con modelos FEM [5]. También es necesaria en los modelos analíticos, puesto que la materialización de estos modelos en rutinas de cálculo en ordenadores puede dar lugar a diferentes resultados, ya sea por las características de dichas rutinas o por errores en su programación. La verificación de estas rutinas es difícil a partir de las gráficas publicadas en revistas, por lo que los grupos de investigación pueden intercambiar datos para verificar sus modelos e incluso establecer referencias formales para la verificación y validación de los modelos, como la descrita en [6]. Esta publicación incluye resultados de pérdida de transmisión, orientados al uso del SEA, para varios tipos de uniones de placas semi-infinitas, isótropas, delgadas y planas que soportan ondas de flexión, longitudinales y transversales en el plano.

La transmisión de potencia vibratoria a través de la unión entre elementos estructurales puede valorarse a través del nivel de velocidad y la diferencia de nivel de velocidad. Estos parámetros pueden determinarse tomando como referencia lo indicado en la norma EN ISO 10848-1:2007 [7]. Para excitación estacionaria, estructural o aérea, el promedio espacial del nivel de velocidad se calcula con la Ec. 1, donde  $v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2$  son las velocidades eficaces (cuadráticas medias) en n posiciones diferentes sobre el elemento, en m/s.

$$L_v = 10 \cdot \log \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n \cdot v_0^2} \text{ dB} \quad \text{Ec. 1}$$

A partir de  $L_v$  se determina la diferencia de niveles de velocidad  $D_{v,ij}$  con la Ec. 2.

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \quad \text{Ec. 2}$$

## 2. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

Se estudiarán dos casos con barras unidas perpendicularmente. La primera unión está formada por barras de sección nominal 82 mm × 60 mm y se denominará LG (L gruesa) (Figura 1a). La segunda unión está formada por una barra de sección 80 mm × 59 mm y otra barra de sección 80 mm × 29 mm (Figura 1b). Se denominará LF (L fina). La barra excitada se identificara con la letra "u" y será la barra horizontal inferior de las imágenes. La barra no excitada se identificará con la letra "d" y será la barra vertical de las imágenes. El programa utilizado ha sido I-DEAS™.

El material utilizado es un tipo de piedra arenisca, denominado piedra Bateig. Las propiedades físicas nominales son semejantes a las del hormigón [8] [9] [10]. Algunas de las propiedades han sido ajustadas para mejorar los resultados de los análisis FEM, durante la calibración del modelo. Para ello se han estudiado modificaciones en el módulo de Young y en la densidad. En

los modelos, el material se denominará Bateig, añadiendo una codificación según las propiedades utilizadas. Un resumen de las denominaciones y propiedades empleadas puede verse en la Tabla 1.

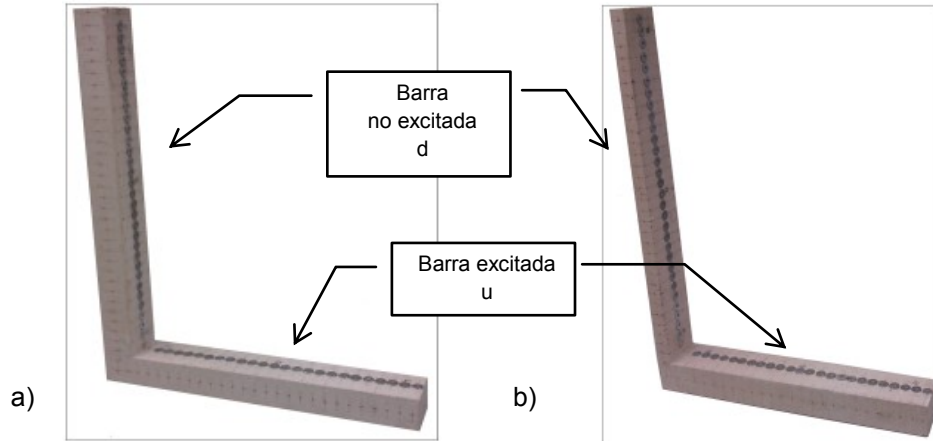


Figura 1: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

Tabla 1: Resumen de los diferentes datos de piedra Bateig utilizados.

	Modulo de Young (E) GPa	Coef. de Poisson ( $\nu$ )	Densidad ( $\rho$ ) Kg/m <sup>3</sup>	Coefficiente de amortiguamiento estructural
Bateig32	32	0,23	2315	0,01
Bateig27	27	0,23	2315	0,01
Bateig25	25	0,23	2315	0,01
Bateig25_02	25	0,23	2400	0,01
Bateig25_03	25	0,23	2315	0

Las especificaciones de las mallas utilizadas se resumen en la Tabla 2 para las uniones LG y en la Tabla 3 para las uniones LF. Unos ejemplos se muestran en la Figura 2 y en la Figura 3.

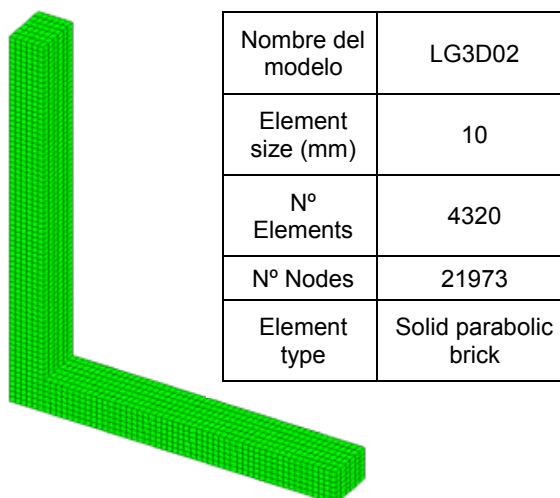


Figura 2: Malla del modelo LG3D02.

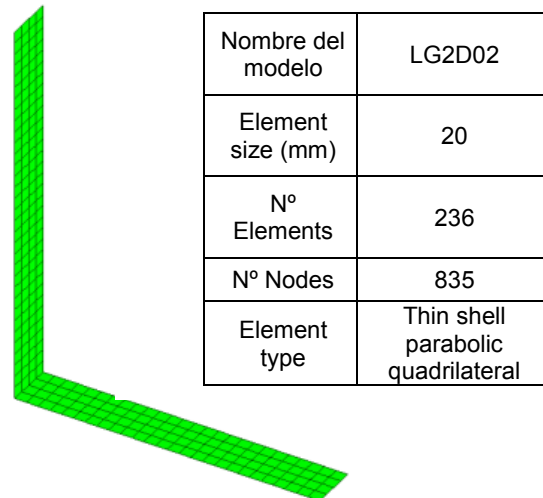


Figura 3: Malla del modelo LG2D02.

Tabla 2: Resumen de las mallas utilizadas en las uniones LG.

Nombre del modelo	Element size (mm)	Nº Elements	Nº Nodes	Element type
LG3D02	10	4320	21973	Solid parabolic brick
LG3D03	5	19456	91585	Solid parabolic brick
LG3D04	16	1152	6545	Solid parabolic brick
LG3D05	25	784	4475	Solid parabolic brick
LG2D02	20	236	835	Thin shell parabolic quadrilateral
LG2D03	10	960	3137	Thin shell parabolic quadrilateral

Tabla 3: Resumen de las mallas utilizadas en las uniones LF.

Nombre del modelo	Element size (mm)	Nº Elements	Nº Nodes	Element type
LF3D02	10	3060	16243	Solid parabolic brick
LF3D03	5	12800	62257	Solid parabolic brick
LF2D02	20	240	849	Thin shell parabolic quadrilateral
LF2D03	10	952	3111	Thin shell parabolic quadrilateral

Las medidas experimentales se han realizado situando la muestra sobre un material que permite los movimientos de la superficie de apoyo, por lo que se ha estimado como más apropiado suponer en los cálculos un modelo de sólido libre, sin ninguna restricción de movimiento.

En cuanto a la excitación, en los modelos FEM se utiliza una carga de impacto, estudiando la respuesta para dos posiciones, denominadas F1 y F2. Se simula un impacto perpendicular a la superficie con un objeto externo con las características necesarias para que la respuesta tenga una amplitud semejante a la obtenida en los experimentos. En las medidas experimentales se ha utilizado la excitación producida por un actuador de tipo electrodinámico, como los que se utilizan en Altavoces de Modos Distribuidos (DML). La señal de entrada es una secuencia de máxima longitud (Maximun Length Sequence, MLS) [10].

### 3. VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

Los diferentes casos se identificarán según se indica en la Figura 4. Para facilitar la lectura y no duplicar la información, con denominaciones largas, se podrá omitir alguna de las partes. Por ejemplo, cuando no sea necesaria la identificación de la excitación, el material y la barra en la que se toman las medidas, o estén identificados por el contexto, la denominación puede ser LG2D02.

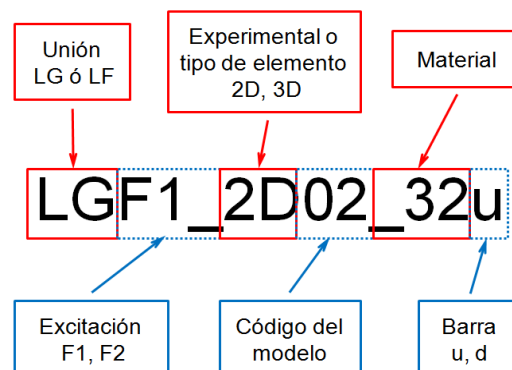


Figura 4: Denominación de los casos de las barras unidas en L.

Los resultados de las simulaciones realizadas con modelos LG2D y LG3D, utilizando los datos originales de las propiedades del material (Bateig32), muestran cierto desfase en las frecuencias propias respecto a los valores medidos en los ensayos, siendo similar tanto en la barra excitada (u) (Figura 5), como en la barra no excitada (d). Puede influir en la diferencia de resultados el hecho de que el modelo FEM considere un material continuo, y el modelo experimental tenga las barras unidas por adhesivo.

En las mismas figuras se puede apreciar que los modelos LG2D y LG3D proporcionan una respuesta bastante similar, por lo que se utilizará la barra excitada del modelo LG2D como referencia para analizar posibles modificaciones para el ajuste del modelo. Como parámetros de ajuste se utilizarán el módulo de Young y la densidad. En base a los resultados mostrados en la Figura 6, se tomarán como datos de referencia los del material Bateig25.

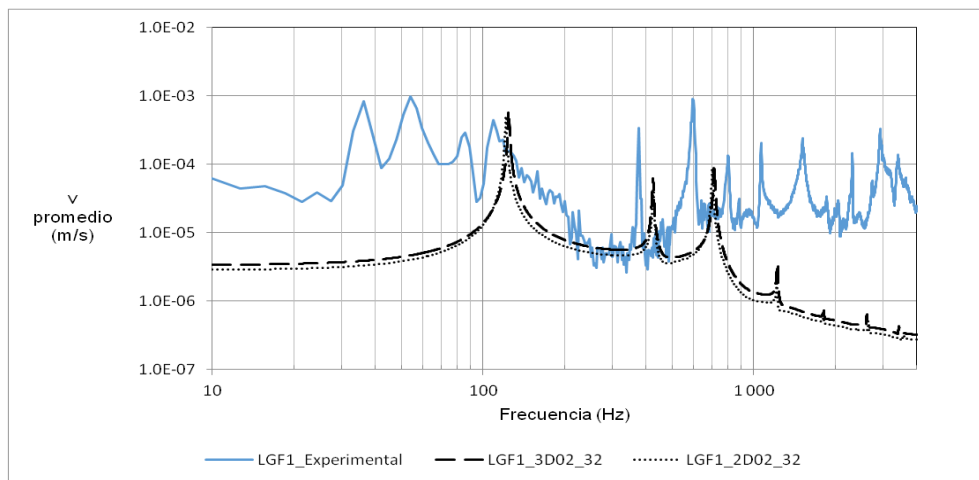


Figura 5: Comparación de la respuesta para F1 en la barra excitada (u) entre los valores experimentales y los modelos LGF1\_3D02\_32 y LGF1\_2D02\_32 (Bateig32).

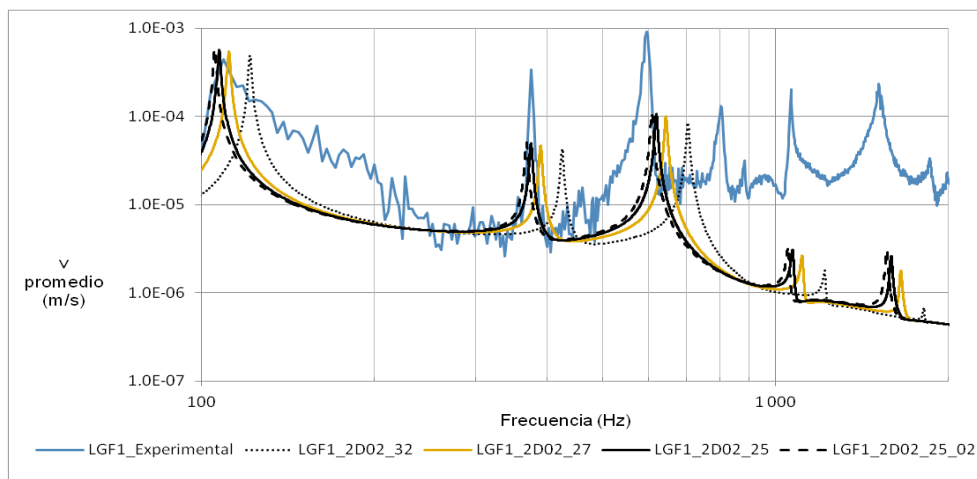


Figura 6: Comparación de la respuesta para F1 en la barra excitada (u) entre los valores experimentales y diferentes modelos LGF1\_2D02 (módulos de Young y densidades).

La calidad de la malla se ha analizado con los resultados de las frecuencias propias para los primeros 24 modos. Se observan unos resultados similares, pero para analizar mejor esa similitud se valoran los porcentajes de variación en modelos. En la Figura 7 se muestran los porcentajes de variación en modelos LF2D02 y LF3D02, respecto al modelo LF2D03, tomado como referencia. Estos porcentajes son similares en todos los modos para los diferentes modelos.

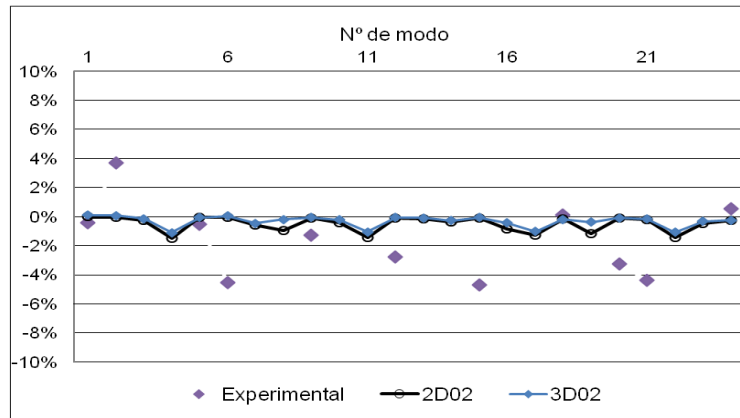


Figura 7: Diferencias en las frecuencias de los primeros 24 modos para las medidas experimentales y los modelos de LF respecto a la referencia de mayor número de nodos (LF2D03).

#### 4. RESULTADOS

En este apartado se analizarán el nivel de velocidad ( $L_v$ ) y la diferencia de nivel de velocidad entre la barra excitada y la barra no excitada ( $D_{v,ud}$ ), en bandas de un tercio de octava. En el caso de  $D_{v,ud}$ , también se calculará un valor único, promediado en frecuencia, como comparación global, de forma semejante a lo que se puede hacer con  $K_{ij}$ . El análisis se realizará para las uniones LG y LF.

En los modelos FEM LG, los resultados de la diferencia del nivel de velocidad son semejantes entre sí (Figura 8), sobre todo en frecuencias bajas, lo que confirma que la elección del modelo 2D parece adecuada. Las barras de error (valores máximo y mínimo) de los resultados del modelo de referencia, 2D02, muestran que los valores son bastante estables, sobre todo a frecuencias bajas. Respecto a los resultados experimentales, los valores también son similares, salvo en algunas bandas de frecuencias bajas.

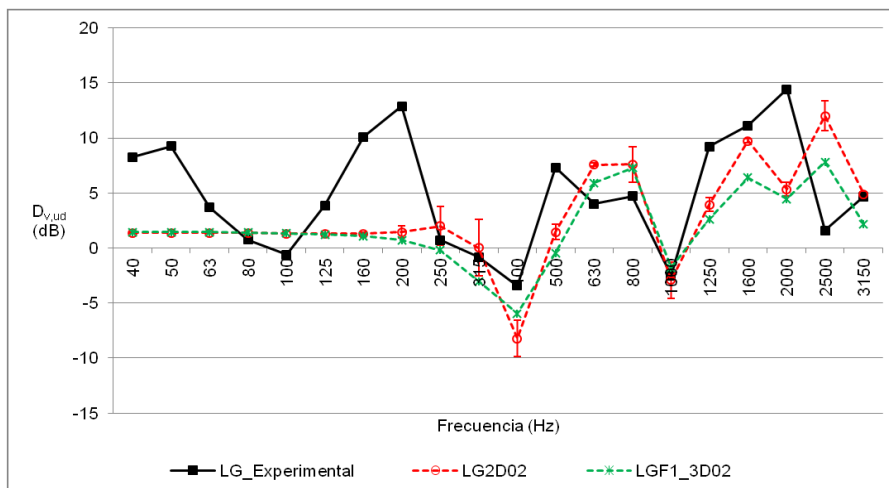


Figura 8: Diferencia de nivel de velocidad promedio en los resultados experimentales y en los modelos LG2D02 (promedio y valores máximo y mínimo) y LGF1\_3D02.

En la unión LF, los resultados de la diferencia del nivel de velocidad entre las barras (u) y (d), en bandas de un tercio de octava, pueden verse en la Figura 9. Los valores experimentales y los del modelo de referencia (LF\_2D02) son similares, salvo para bandas de frecuencias bajas. Las bandas de error del modelo LF\_2D02 (valores máximos y mínimos) son mayores en frecuencias medias. El modelo LFF1\_2D02\_03, con un material con un coeficiente de amortiguamiento estructural nulo (Bateig25\_03), no aporta mejores resultados.

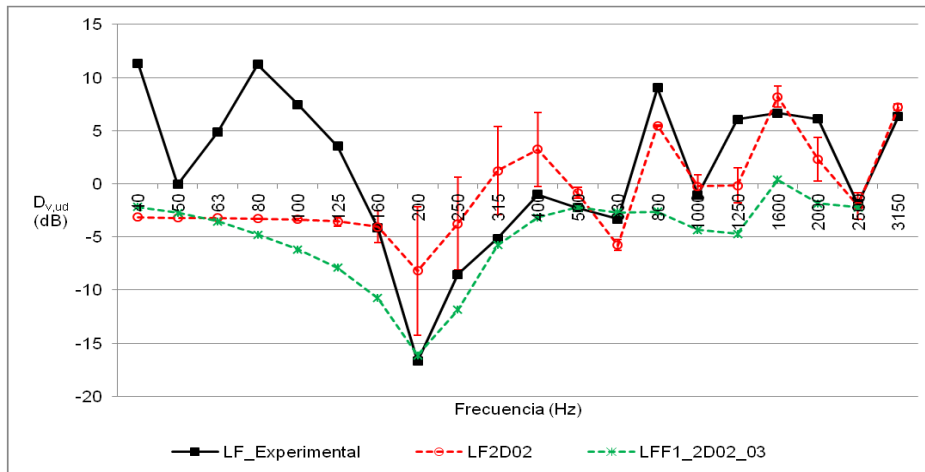


Figura 9: Diferencia de nivel de velocidad promedio en los resultados experimentales y en los modelos LF2D02 (promedio y valores máximo y mínimo) y LGF1\_2D02\_03.

Para seguir con la comparación de los resultados, se realizará un promediado en frecuencia de la diferencia de nivel de velocidad, para obtener un valor único. Se utilizarán dos rangos de promediado, uno será rango de frecuencias estudiado (40-3150 Hz) y el otro excluirá las bandas de frecuencias bajas que no suelen ser usadas en la normativa (100-3150 Hz). Los resultados muestran diferencias menores de 0,6 dB entre los dos rangos (Figura 10). Se tomarán como referencia los resultados del rango 100-3150 Hz, por ser el incluido en la normativa.

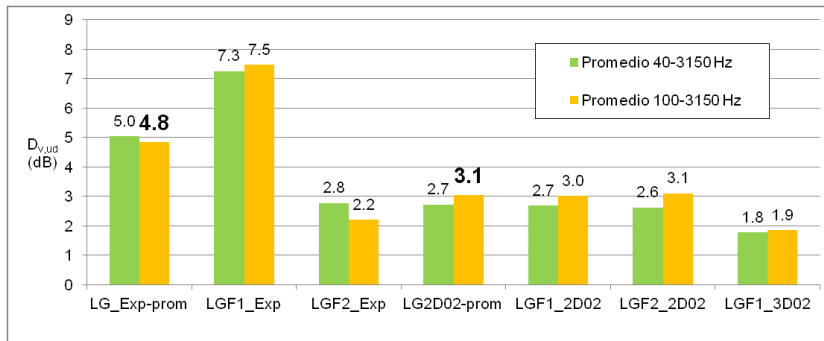


Figura 10: Diferencia de nivel de velocidad promediada en frecuencias en la unión LG. Valores experimentales y de modelos FEM, para diferentes excitaciones y promediados.

Los resultados promediados en frecuencias de la diferencia de nivel de velocidad, considerando las mismas bandas de tercio de octava que para la unión LG, se muestran en la Figura 11. Los resultados entre ambos rangos muestran diferencias que, en el caso de las medidas experimentales, es superior a 1 dB.

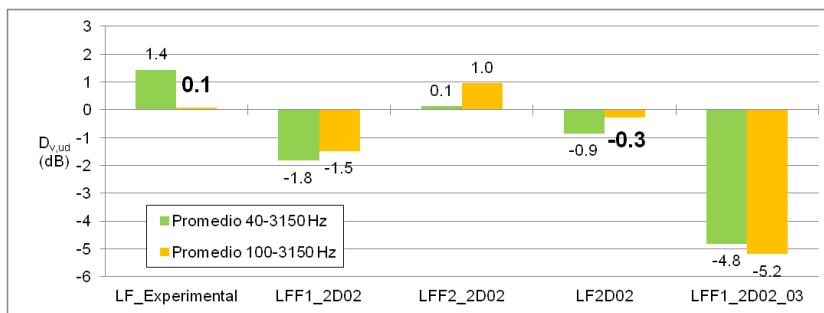


Figura 11: Diferencia de nivel de velocidad promediada en frecuencias en la unión LF. Valores experimentales y de modelos FEM, para diferentes excitaciones y promediados.

## 5. CONCLUSIONES

Como conclusión, puede decirse que los modelos LG2D02 y LF2D02, con material Bateig25, proporcionan resultados de la diferencia de nivel de velocidad, promedia en frecuencias, similares a los obtenidos experimentalmente. La diferencia es inferior a 1,7 dB, y podría ser menor ajustando los modelos en relación con este parámetro.

En cuanto a la evolución de la diferencia de nivel de velocidad con la frecuencia, aunque los resultados experimentales y FEM son semejantes, se detectan algunas diferencias significativas en las bandas de frecuencias bajas, tanto en LG como en LF. También se detectan diferencias significativas puntuales en algunos casos. Las diferencias entre el modelo experimental y el modelo FEM, en cuanto al uso de distintos tipos de excitaciones, condiciones de contorno de movimiento y la continuidad del modelo, podrían explicar las diferencias de resultados entre ambos, sobre todo en frecuencias bajas.

En todo caso, a la vista de los valores obtenidos, la aproximación conseguida con los modelos FEM se considera buena, y se podrían utilizar estos modelos para evaluar la influencia, en la diferencia de velocidad, de otros parámetros, como el material y dimensiones de las barras. El uso de modelos 2D ha permitido conseguir resultados aceptables con una simplificación significativa del modelo.

## REFERENCIAS

- [1] Cremer, L., Heckl, M., & Petersson, B. A. (2005). Structure-borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies Springer.
- [2] Guyader, J. L., Boisson, C., & Lesueur, C. (1982). Energy transmission in finite coupled plates, part I: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 81(1), 81-92.
- [3] Simmons, C. (1991). Structure-borne sound transmission through plate junctions and estimates of sea coupling loss factors using the finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 144(2), 215-227.
- [4] Mace, B. R., & Shorter, P. J. (2000). Energy flow models from finite element analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 233(3), 369-389.
- [5] Martín-Bravo, M., Magdaleno, J., García-Terán, J., & Tarrero, F. (2014). Aplicaciones del método de los elementos finitos en la transmisión estructural del sonido en edificios. *Tecnia Acústica 2014*, Murcia. pp. 931.
- [6] Craik, R. J. M., Bosmans, I., Cabos, C., Heron, K. H., Sarradj, E., Steel, J. A., et al. (2004). Structural transmission at line junctions: A benchmarking exercise. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), 1086-1096.
- [7] UNE-EN ISO 10848-1:2007. Acústica. Medida En Laboratorio De La Transmisión Por Flancos Del Ruido Aéreo y Del Ruido De Impacto Entre Recintos Adyacentes. Parte1: Documento Marco, (2007)
- [8] Torres, J., Cárdenas, W., Carbajo, J., Segovia, E., & Ramis, J. (2012). Estudio de la radiación en vigas utilizando la técnicas de medición de holografía de campo cercano. *VIII Congreso Ibero-Americano De Acústica*,
- [9] Segovia, E., Torres, J., Carbajo, J., & Ramis, J. (2013). Comparación de técnicas de caracterización de suelos flotantes. *Tecnia Acústica 2013*, Valladolid.
- [10] Molina, P., Torres, J., Segovia, E., & Ramis, J. (2014). Estudio de la transmisión de las vibraciones usando modelos a tamaño reducido. *Tecnia Acústica 2014*, Murcia.