



CALCULO NUMÉRICO DEL INDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL

PACS: 43.40+s

Alfonso Rodríguez Molares¹, Manuel A. Sobreira Seoane,
Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Grupo Sonitum
E.T.S.I. de Telecomunicación, Universidad de Vigo
Lagoas-Marcosende, 36200 Vigo

Abstract

Following UNE 10848:2007 specifications, the vibration reduction index of cross-joints can be measured in laboratory. Due to its recent publication and the high cost of facilities and equipment there are not yet, in Spain, available laboratories offering such measurement.

Numerical calculation is a clear alternative to the measurement, allowing saving cost and time, although an experimental validation is needed to provide reliable data. This communication presents a numerical model for the calculation of K_{ij} . The results are compared against measurements in a scale model of the facilities described by the norm.

Resumen

Siguiendo las directrices de las normas UNE 10848:2007 es posible medir en laboratorio el índice de reducción vibracional de encuentros entre elementos constructivos. Dada su reciente publicación y el elevado coste de las instalaciones no existen aún, en España, laboratorios que oferten esa medición.

El cálculo numérico constituye una alternativa a la medición, ya que permite abaratar costes y tiempos. Es necesaria sin embargo una validación experimental para la obtención de datos fiables. Esta comunicación presenta un modelo numérico para el cálculo de las K_{ij} . Los resultados son comparados con mediciones en modelo a escala de las instalaciones descritas en la norma.

¹amolares@gts.tsc.uvigo.es

1. Introducción

Las normas UNE 10848 [1] especifican los métodos experimentales que han de emplearse para caracterizar los índices de reducción vibracional K_{ij} en un laboratorio de ensayo. Para ello debe disponerse de unas instalaciones con unos elevados requisitos técnicos que aseguren que sólo existe propagación vibracional a través de la arista bajo estudio. Debe disponerse además del equipamiento preciso para realizar la medición en dos elementos constructivos simultáneamente, así como de excitadores apropiados. Solamente por los requisitos que se acaban de exponer, el ensayo descrito en la UNE 10848-1:2007 implica ya un coste superior a los de la familia UNE 140 [2] para la medición del aislamiento aéreo.

Debe tenerse en cuenta que la medición de la UNE 10848-1:2007 [1] da lugar a un único valor del índice K_{ij} sobre el eje de relación de masas. Por ello una sola medición representa un único punto de las curvas expuestas en el apéndice E de la UNE 12354-1:2000 [3]. Para llegar a estimar la curva del índice de reducción vibracional de una determinada combinación de soluciones constructivas, tal y como hizo Gerretsen [4, 5], es necesario realizar un número suficiente de mediciones, construyendo, para cada ensayo, probetas con diferentes grosores. Es este coste, el de montaje y desmontaje de las probetas, el que ha frenado una rápida implantación del ensayo UNE 10848 en los laboratorios en España.

Una alternativa a la medición estaría representada por los métodos de la acústica numérica. Si las propiedades elementales de los materiales que constituyen la solución constructiva son conocidas (densidad ρ , módulo de elasticidad E , coeficiente de Poisson ν y coeficiente de pérdidas internas η) es posible simular el proceso expuesto en la UNE 10848-1:2007 [1] mediante, por ejemplo, el método de los elementos finitos y llegar al valor de índice de reducción vibracional de la unión estudiada. De este modo el largo y costoso proceso de obtención de la curva completa puede ser reducido a un mero cálculo por ordenador que puede verificarse en puntos de test escogidos.

2. Modelado Numérico

En el apartado 6 de la Norma UNE 10848-1:2007 [1] aparecen los requisitos para las muestras y recintos de ensayo. Se especifica que todas las muestras han de tener una longitud de entre $3,5 m$ y $6 m$ y que la arista ha de presentar una longitud mínima de $2,3 m$ como mínimo. Para evitar un acoplamiento modal perfecto entre los diferentes elementos, la longitud de cada uno de ellos ha de diferenciarse en, como mínimo, un 10%.

Las condiciones de contorno que se deben aplicar pueden derivarse de lo expuesto en el apartado 8 de la Norma, en el que se especifican las características que deben verificar las instalaciones de ensayo para que tengan una mínima influencia en la medición. Según recoge la Norma “la diferencia de nivel de velocidad debería ser lo más grande posible”. También añade que esto puede conseguirse “utilizando construcciones en la instalación de ensayo que sean mucho más pesadas que las construcciones sometidas a ensayo”. La traducción de esta condición al ámbito de la simulación numérica es la de una condición Dirichlet homogénea sobre la velocidad en aquellos contornos de la muestra en contacto con la instalación, es decir $\mathbf{v}|_{\Gamma_D} = 0$ donde \mathbf{v} es el vector de velocidad en cualquier punto del sólido Ω_S y Γ_D es aquella parte de su frontera que está en contacto con las instalaciones de ensayo.

El acoplamiento entre los elementos bajo estudio y el fluido acústico podría ser aproximado mediante una condición Neumann homogénea $\partial\mathbf{v}/\partial\mathbf{n} = 0$ tal como se ha realizado en trabajos numéricos anteriores [6]. Siguiendo tal aproximación, la influencia de los modos naturales de los recintos involucrados no sería tenida en cuenta ni tampoco la transmisión de energía a través del aire. La norma especifica que la fracción de la energía que es transmitida a través del aire debería ser insignificante en comparación con la energía transmitida total. Esta condición se cumple fácilmente

si las muestras de ensayo son suficientemente gruesas y pesadas o si presentan un amortiguamiento suficientemente alto. En el transcurso de este estudio se ha observado que la influencia de los modos propios de los recintos es insignificante, al menos para los modelos a escala sobre los que se ha investigado. Más adelante, en el apartado 2.2, se realiza la comparación de los resultados de tres diferentes aproximaciones llegando a la conclusión de que la consideración del fluido no altera de una forma notable la evaluación de la diferencia de nivel de velocidad. No obstante debe recordarse que esta observación se encuentra restringida a modelos a escala. Para la realización de este estudio se decide afrontar el problema acoplado a fin de tener una perspectiva más general de la respuesta de las salas ante los modos de vibración de la estructura. En este caso, la formulación fuerte del problema es,

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Div } \mathbf{C}(\mathbf{v}^S) + \omega^2 \rho_S \mathbf{v}^S = \mathbf{0} & \text{en } \Omega_S, \\ \frac{1}{\rho_F} \Delta p + \frac{1}{\rho_F c_0^2} \omega^2 p = 0 & \text{en } \Omega_F, \\ \mathbf{C}(\mathbf{v}^S) \mathbf{n} = -p \mathbf{n} & \text{en } \Gamma_I, \\ \mathbf{v}^S \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{\rho_F \omega^2} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} & \text{en } \Gamma_I, \\ \mathbf{v}^S \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} & \text{en } \Gamma_D, \\ \frac{1}{\rho_F \omega^2} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{0} & \text{en } \Gamma_D, \\ \mathbf{v}^S \cdot \mathbf{n} = V_0 & \text{en } \Phi_E. \end{array} \right.$$

donde p es la presión sonora en cualquier punto del fluido Ω_F , Γ_I es la frontera entre el dominio fluido y el sólido Ω_S y Φ_E es el punto de excitación, donde se impone una velocidad normal a la superficie de amplitud V_0 . En la figura 1 se muestran las mallas utilizadas para resolver el problema en ambos dominios, el sólido Ω_S y el fluido Ω_F .

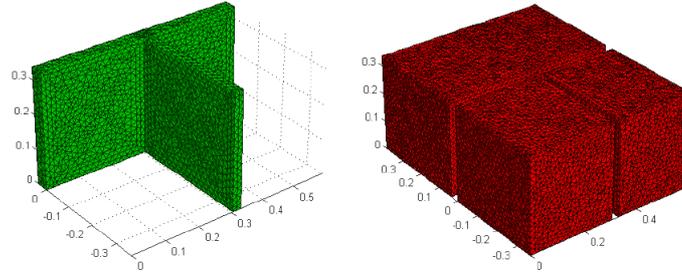


Figura 1: Dominio sólido y fluido del modelo numérico empleado

Dentro de cada paramento se incibe un rectángulo (más claramente visible en la figura 2) que delimita la zona en la que es posible realizar la evaluación del nivel de velocidad. Siguiendo las especificaciones de la norma en su sección 7.2.4, los trasductores de medición de la velocidad no deben disponerse a menos de 25 cm del borde de la muestra de ensayo (2.5 cm en nuestro modelo a escala) y no deben estar a más de 3.5 m respecto de la unión que se pretende medir (35 cm en nuestro modelo). También el punto de excitación se encuentra rodeado por una circunferencia de 10 cm en nuestro modelo (véase la figura 2). Esta circunferencia delimita la zona en la que

la velocidad no debe ser evaluada sobre el elemento excitado, ya que, como se especifica en la sección 7.2.4 del estándar, ningún acelerómetro puede ser dispuesto a menos de 1 m de la fuente de vibración para no sesgar la medida sobrestimando el nivel de vibración en el elemento excitado $L_{v,i}$ y por tanto la diferencia de niveles $D_{v,ij}$.

Existe, no obstante, una especificación de la norma UNE 10848-1 [1] que no ha sido respetada, la que fija la separación mínima que debe existir entre cada acelerómetro. El propósito de este requisito es impedir que se sesgue el promedio espacial de la medida de la velocidad concentrando todos los transductores en una región reducida de la muestra de ensayo. En nuestro caso esta precaución es innecesaria ya que el cálculo numérico nos permite realizar el promediado espacial mediante una integración bilineal de la solución sobre la superficie del dominio sólido. Para las resoluciones de malla que se han usado durante este estudio, esta integración es equivalente a realizar la medición de la velocidad con más de una centena de acelerómetros.

2.1. Obtención de la diferencia de nivel de velocidad

La norma UNE 10848-1 [1] define el nivel de velocidad promedio L_v como,

$$L_v = 10 \log \frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} v^2(t) dt}{v_0^2}, \quad (1)$$

donde v es la parte real de la velocidad normal a la superficie, T_m es el período de integración temporal y v_0 es la velocidad de referencia ($v_0 = 1 \cdot 10^{-9} m/s$). La norma no incluye una expresión general para el promediado espacial de la velocidad sobre las superficies de los elementos, aunque recoge una versión discreta de dicho promediado dado por la media aritmética de la velocidad cuadrática media en diferentes puntos sobre cada elemento. Como ya se apuntaba antes, el cálculo numérico nos permite realizar un promediado espacial muy preciso a partir de la integración bilineal de la velocidad sobre la superficie de la muestra de ensayo.

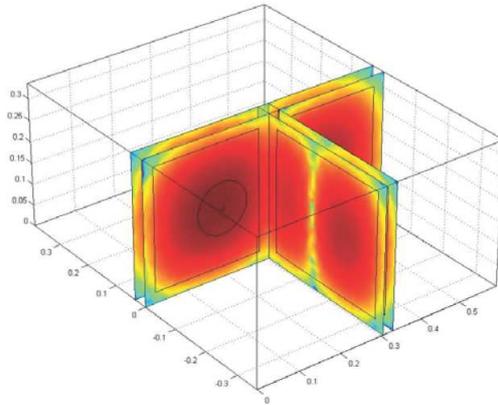


Figura 2: Nivel de velocidad L_v en las caras de los elementos bajo ensayo

Para resolver el problema numérico se ha utilizado el paquete comercial COMSOL 3.4. El tamaño máximo de los elementos de la malla h ha sido escogido para asegurar una baja polución numérica en todo el rango de frecuencias de interés, manteniendo la relación $kh/2p < 0,5$, de Ihlenburg [7], siendo $k = 2\pi f/c_0$ el número de onda y p el orden de los elementos de la malla. El

nivel de velocidad en las caras del dominio sólido, obtenidas para una única posición de la fuente sobre el elemento 1, puede verse en la figura 2.

Tras aplicar la integración bilineal se obtiene el nivel de velocidad medio en cada cara de los elementos, a partir de la expresión,

$$L_{v,i} = 20 \log \left(\frac{1}{v_0} \frac{1}{S_i} \int_{\Gamma} \frac{\|\mathbf{v}\|}{\sqrt{2}} \right). \quad (2)$$

La figura 3 muestra el nivel de velocidad promedio evaluado conforme a la expresión (2).

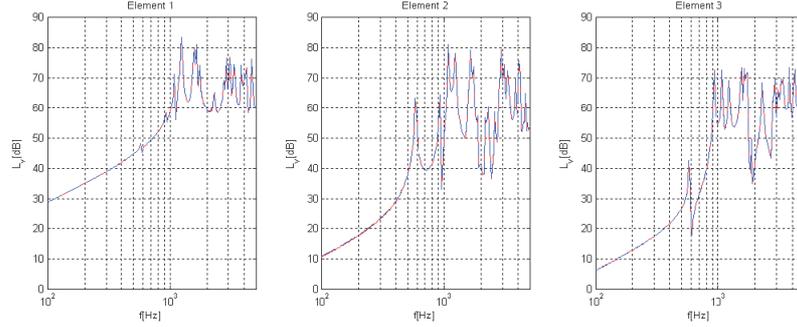


Figura 3: Nivel de velocidad medio L_v en cada caras de los elementos bajo ensayo

Como era esperable, el nivel de velocidad es mayor en el elemento excitado (el elemento 1). Se observa también que existe una concordancia perfecta entre los niveles a ambos lado del cada elemento, lo que implica que la recomendación de la norma de disponer los acelerómetros en el lado opuesto de los elementos no es realmente necesaria, al menos en el ámbito del cálculo numérico y para materiales homogéneos e isotrópos. Como era esperable en un modelo tan pequeño, se observa que la densidad modal de los elementos es bastante baja incluso a frecuencias medias. Como hizo notar Pedersen [8], para obtener una estimación fiable del índice de reducción vibracional se ha de verificar que los elementos presenten al menos entre 3 y 5 modos por banda de frecuencia. Sobre este comentario de Pedersen se volverá más adelante a la hora de discutir los resultados obtenidos.

La sección 7.2.4 de la norma UNE 10848 especifica que se deben usar, al menos, tres posiciones de fuente, debido a que la respuesta modal de cada elemento depende fuertemente del punto de excitación escogido. Como bien es sabido si el punto de excitación cae cerca de una de las líneas nodales de un modo determinado, dicho modo no será excitado o lo será en muy menor grado. Es pues necesario mover el punto de excitación para que la excitación sea lo más difusa posible.

2.2. Sobre la consideración del dominio fluido

Como ya se ha adelantado, la influencia de los modos de los recintos no es significativa para la evaluación de los índices de reducción vibracional en modelos a escala. En la figura 4 se muestran los resultados de tres modelos dintintos. El primero de ellos comprende unicamente el dominio sólido y el contacto con el fluido es aproximado mediante una condición Neumann homogénea ($\partial \mathbf{v} / \partial \mathbf{n} = 0$). El segundo modelo discretiza el dominio sólido y la parte del dominio fluido compuesta por los dos volúmenes encerrados por la unión de ensayo. El contacto de la unión de ensayo con el volumen confinado por las instalaciones del laboratorio es aproximado mediante una condición Neumann homogénea. En el tercer modelo se incluye también el dominio fluido confinado por los muros del laboratorio de ensayo.

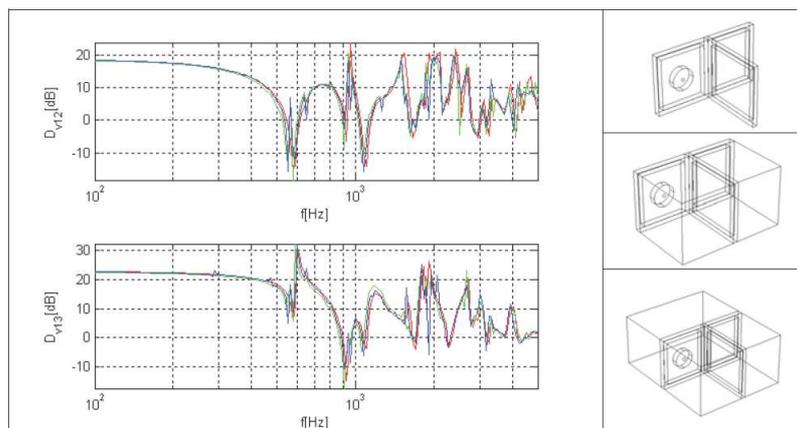


Figura 4: Comparación de diferentes aproximaciones para la consideración del dominio fluido.

3. Estudio experimental

Para poder validar los resultados del modelo numérico se construyó un modelo a escala de las instalaciones de ensayo descritas en la norma UNE 10838-1 [1]. Dicho modelo debía cumplir, “a escala”, las especificaciones recogidas en la UNE-EN ISO 10848-1 [1]. Debía constar de dos partes diferenciadas: los soportes rígidos y másicos que contituirían las paredes del propio laboratorio y el elemento a ensayar, sensiblemente más ligero y fino a fin de evitar el acoplamiento entre la estructura del laboratorio a escala y el material a ensayar. Las instalaciones del laboratorio debían por un lado confinar los dos recintos a un espacio dado, de modo que tuvieran un volumen perfectamente definido y permitir el acceso al instrumental necesario para realizar la medición.



Figura 5: Modelo a escala con el tabique separador.

La solución escogida constaba de una caja de hormigón, y una unión en T en yeso que se acoplaría a la estructura de hormigón. Dos huecos superiores de $15 \times 15 \text{ cm}$ se reservarían en el forjado de la estructura de hormigón a fin de facilitar el acceso a las caras interiores y el paso de los cables de los sistemas de medida. En base a los diseños elaborados, se forjó la estructura de

hormigón empleando cemento armado con varilla metálica, con una proporción de arena de 3 a 1. Se dejó secar la estructura durante 12 días en un ambiente seco, tras lo cual se retiró el encofrado. Una vez construida la estructura de las instalaciones se procedió al forjado de los dos tabiques de yeso que constituirían el objeto de estudio. Ambos tabiques fueron realizados con yeso convencional y montados sobre la estructura de hormigón. En la figura 5 puede apreciarse el tabique separador de 2.5 cm tras ser forjado en la propia estructura de las instalaciones de ensayo.



Figura 6: Forjado del tabique de flanco.

Debido a lo arriesgado de forjar el segundo tabique directamente sobre la estructura de hormigón se optó por realizar un encofrado independiente y unirlo posteriormente a la estructura. En la figura 6 se muestra el proceso de pegado del segundo tabique.



Figura 7: Montaje experimental

3.1. Apparatus experimental

Para la realización de las mediciones fue necesario diseñar una fuente de vibración que permitiese excitar los elementos del modelo a escala. Para una mayor completitud se optó por utilizar dos tipos de excitaciones distintas, ambas admitidas por la UNE 10848-1 [1]: una armónica y otra transitoria.

La fuente armónica consistió en un vibrador, realizado con un motor eléctrico que hacía girar una masa descentrada de su eje de rotación. La fuente transitoria consistió en un solenoide monoestable comercial, que, accionando un émbolo de acero, impactaba sobre los elementos a ensayar con una elevada repetibilidad. En este caso, para reducir al mínimo la incertidumbre, se realizó la medida integrando la respuesta de un elevado número de pulsos generados automáticamente.

Para las medidas de los niveles medios de velocidad se emplearon 3 acelerómetros monoaxiales Delta Shear B & K Type 4514-B con una sensibilidad de 10 mV/g y como sistema de adquisición el PULSE B & K Type 3560-B-130 (vease la figura 7).

4. Resultados

Los resultados obtenidos del procedimiento experimental se muestran en la figura 8 conjuntamente con los resultados numéricos.

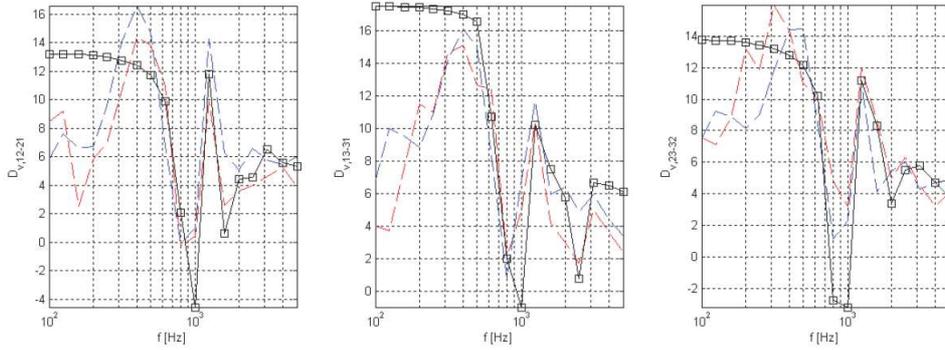


Figura 8: Comparación de los resultados numéricos y experimentales. Línea azul discontinua: medición mediante excitación armónica; línea roja discontinua: medición mediante excitación transitoria; línea negra con marcadores cuadrados: resultado del cálculo numérico.

Se observa un razonable acuerdo entre ambas fuentes de datos, salvo para la baja frecuencia debido, probablemente, a la baja densidad modal de los elementos ensayados, hecho que concuerda con la observación que Pedersen realiza [8] sobre la obtención de una cierta sobreestimación del método predictivo para bajos valores del coeficiente de densidad modal.

Este hecho, junto con una clara subestimación en los valles, declaran la necesidad de un mayor esfuerzo para lograr una validación completa del modelo. Es necesaria una mejor caracterización del factor de pérdidas del material, así como del factor de amortiguamiento modal de las placas que, para este estudio han sido considerados contantes en frecuencia.

5. Conclusiones

El procedimiento descrito en la UNE 10848 [1] ha venido a cubrir una importante laguna procedimental que impedía la aplicación del método de predicción de aislamiento acústico descrito en la UNE 12354-1 [3] en un gran número de encuentros reales. No obstante, la ingente cantidad de soluciones constructivas y de tipos distintos de encuentros existentes dificultan, aún hoy, el objetivo de alcanzar una caracterización completa de todas las uniones que existen en las edificaciones actuales. Es impensable llegar a tal caracterización solamente mediante procedimientos experimentales ya que el número de laboratorios con capacidad para realizar la medición de la UNE 10848 es, todavía, escaso.

En este trabajo se ha presentado una primera confirmación experimental de la validez de los modelos numéricos como un método práctico para la obtención de los índices de reducción vibracional K_{ij} de uniones entre elementos de la construcción. La validación presentada es aún parcial ya que la comparación fue realizada contra mediciones en un modelo a escala. No obstante, los prometedores resultados obtenidos impulsan a que se invierta un mayor esfuerzo en la investigación de esta alternativa.

6. Agradecimientos

Queremos agradecer la colaboración de Martín Sabajanes y Xoan García por la dedicación mostrada en la implementación del trabajo experimental utilizado en este estudio.

Referencias

- [1] *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. Parte 1: Documento marco.* International Organization for Standardisation, 2006.
- [2] *UNE EN ISO 140-1:1998, Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Requisitos de las instalaciones del laboratorio sin transmisiones indirectas.* International Organization for Standardisation, 1998.
- [3] *UNE EN ISO 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.* International Organization for Standardisation, 2000.
- [4] E. Gerretsen, “Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures,” *Applied Acoustics*, vol. 12, pp. 413–433, 1979.
- [5] E. Gerretsen, “Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings,” *Applied Acoustics*, vol. 19, pp. 245–264, 1986.
- [6] A. Rodríguez-Molares and M. A. Sobreira-Seoane, “Resultados previos en la simulación numérica de elementos de la construcción,” *Proceedings of Acustica 2008, Coimbra*, 2008.
- [7] F. Ihlenburg, *Finite element analysis of acoustic scattering*. New York Inc: Springer-Verlag, 1998.
- [8] D. B. Pedersen, “Estimation of vibration attenuation through junctions of building structures,” *Applied Acoustics*, vol. 46, pp. 285–305, 1995.