

METODO MATRICIAL PARA LA INGENIERÍA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO

PACS: 43.55.Ti

José Antonio Aniorte Pérez; Salvador Domingo Bets
Reticular Noise, S. L.
Thomas Alva Edison, 7
Parc Tecnològic,
46980 Paterna, Valencia
Tel: 963 943 486
Fax: 961 318 127
E-mail: info@reticularnoise.com

ABSTRACT

Matricial method is a new technology dedicated to the acoustic insulation between enclosures. This technique allows to measure with an in situ test the behavior of the different surfaces that build the enclosures providing the acoustical transfer matrix between them. From this matrix is possible to design corrective measures not only for the main separating surface, but also the adequate measure to treat each surface or flank. The repercussion of each of the corrective measures is calculated and synthesized separately wherefore it is possible to analyze the obtained improvement/cost performance after the application of each of the corrective measures. The whole analysis, design and synthesis is executed though internet, making this technology an easy application tool.

RESUMEN

El método matricial es una nueva tecnología dedicada al aislamiento acústico entre recintos. Esta técnica permite medir mediante ensayo in situ el comportamiento de los diferentes paramentos que conforman los recintos de forma que se determina la matriz de transferencia acústica entre ellos. A partir de esta matriz es posible diseñar medidas correctoras no solo para el paramento principal de separación, sino también las medidas adecuadas para tratar cada flanco. La repercusión de cada una de las medidas correctoras es calculada y sintetizada separadamente por lo que se puede analizar el rendimiento progreso/coste obtenido tras la aplicación de cada medida correctora.

1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento acústico entre recintos es un problema que se estudia a partir del comportamiento del paramento principal que los separa. La influencia del resto de paramentos se estudia en segundo plano y su repercusión se mide en función del paramento principal.

Fuera del laboratorio el paramento principal no puede comportarse sólo según sus características físicas porque debe responder a las limitaciones que impone su confinamiento en la red de paramentos al que pertenece.

Por este motivo el aislamiento acústico entre recintos debe ser estudiado a partir de un conjunto de paramentos conectados en forma de red que reciben un *INPUT* de ruido aéreo o mecánico y genera un *OUTPUT* o respuesta en el recinto colindante.

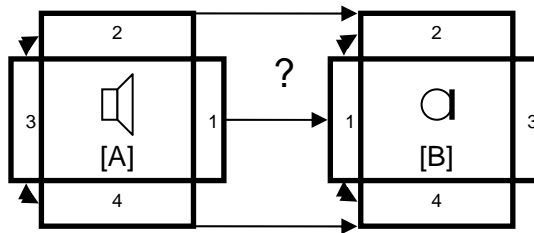


Figura 1 – El problema en dos dimensiones, recintos [A] y [B] con paramentos 1 a 4

2. MEDICIÓN IN SITU

El comportamiento acústico de un paramento confinado en una red responde a las siguientes necesidades:

- Composición (ley de masas)
- Construcción o forma en que se han dispuesto los materiales que lo componen (formas de propagación de las ondas acústicas).
- Contorno; relación de aspecto y dimensiones físicas que lo delimitan (modos resonantes propios).
- Entorno o forma en que el paramento interactúa con sus colindantes (leyes de inercia).

La medición *in situ* debe aportar una información que contenga todos los aspectos anteriores.

La forma natural de caracterizar el comportamiento de una malla de paramentos es mediante modelos matriciales.

Así pues la medición debe permitir la obtención de esta matriz de transferencia acústica, donde el paramento principal es un simple elemento más.

2.1. Aspectos generales del ensayo

El ensayo debe contemplar una serie de condiciones de ejecución para que sea eficaz.

Aspectos como la precisión y duración del mismo deben ser ponderados para evitar largas sesiones de ensayo que aportan datos redundantes o de escaso interés.

- Duración. Teniendo en cuenta que interesa medir a partir de un “input” de ruido aéreo y que se trata por lo tanto de un ensayo molesto a causa del fuerte nivel sonoro necesario, se recomienda no prolongar la toma de datos “in situ” más allá de una hora y media. En este sentido interesa empezar por la recogida de datos más relevantes, dejando los menos significativos para el final de la medición.
- Precisión. El ensayo debe aportar información que permita acotar la precisión.

- Densidad de muestreo: Para un problema típico de aislamiento podemos encontrarnos con un recinto [A] de 90 m² de planta y superficie de paramentos en torno a los 400 m², por el otro lado, un recinto [B] típico puede ser un dormitorio de 4x4=16 m² de planta y superficie de paramentos en torno a 40 m² (supuesto una altura de 2,5 m). Una densidad de muestreo de 1 muestra/m² resultaría en el recinto [A] en 400 muestras que precisarían 2 horas y 15 minutos, mientras que en el [B], la misma densidad supondría la toma de 40 muestras en unos 15 minutos. Este ejemplo pone de manifiesto la prioridad en la recogida de información.

2.2. Elección del punto de ensayo

La elección del punto de ensayo responde a un compromiso entre las siguientes necesidades:

- Debilidad. Interesa adaptar las medidas correctoras para corregir el caso peor. Para las demás zonas se obtendrá un aislamiento mayor al deseado.
- Representatividad. La zona de ensayo debe incluir el mayor número de paramentos estructuralmente importantes que sea posible. Habitualmente el punto de ensayo que implica un mayor número de elementos estructurales presenta el aislamiento más débil.
- Evaluación. Los resultados del ensayo deben ser comparables a los que se evaluarían con normas de la serie ISO-140 para asegurar la conformidad de los resultados. Por este motivo se deben respetar algunos aspectos de ubicación de fuentes sonoras de ensayo contenidos en estas normas.

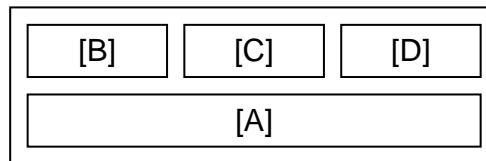


Figura 2 – Para aislar el recinto [A] de sus colindantes el ensayo [A]»[B] aporta más información que el [A]»[C] porque incluye el muro de fachada

Como guía práctica debe darse prioridad a los emplazamientos donde confluyen en mayor medida los siguientes elementos arquitectónicos:

- Forjados
- Muros medianeros. Más todavía si son de carga, pero incluso en edificios con estructura portante el envejecimiento estructural va trasladando protagonismo acústico a los muros medianeros en detrimento de los pilares.
- Fachadas, cobran especial protagonismo cuando el forjado es unidireccional en sentido hacia fachada. Son de casi obligatoria presencia en el ensayo cuando tratamos edificios antiguos en que la fachada es un elemento arquitectónico singular (se podría retirar el edificio dejando la fachada en pie).
- Muros de cerramiento de zonas comunes. Pueden ser muy importantes en el caso de cerramientos de cajas de escalera y huecos de ascensor.
- Pilares.

2.3. Elección de los elementos a medir

Cada uno de los paramentos de la figura 3 tendrá su vector individual en la matriz resultante porque cada uno de ellos se comporta de forma distinta y ese comportamiento debe ser evaluado por separado.

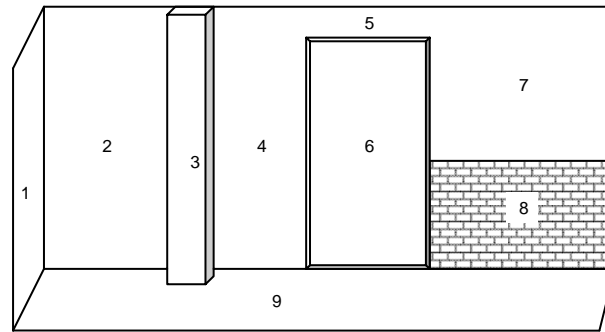


Figura 3 – Ejemplo de cómo diferenciar los elementos

Se debe diferenciar cada paramento a medir del resto de paramentos en función de:

- **Composición.** Paramentos con materiales distintos deben ser considerados como paramentos distintos. Una pared de ladrillo con una puerta y una ventana no es un paramento, son tres: la pared de ladrillo, la puerta y la ventana.
- **Construcción.** Paramentos contruidos de forma distinta deben ser considerados paramentos distintos. Una pared acabada de distinta forma en su parte superior (pintura) e inferior (ladrillo a vista) no es un paramento sino dos.
- **Contorno.** Paramentos con singularidades de contorno deben ser considerados por separado, delimitando un paramento antes de la discontinuidad y otro posterior a la misma. Una pared que aloja un pilar empotrado no es un paramento sino tres: la pared a un lado del pilar, el pilar y la pared al otro lado del pilar.
- **Entorno.** Un paramento que presenta entornos diferentes a lo largo de su extensión debe ser ensayado por separado. Una pared que a lo largo de su longitud deja de establecer unión con el forjado no se debe ensayar como un paramento sino como dos: la pared con unión al forjado y la pared sin unión al forjado.

2.4. Muestreo

Para cada uno de los paramentos se establece un muestreo homogéneo de forma que se obtenga un vector representativo del comportamiento global de dicho paramento y su contribución al aislamiento acústico entre los recintos.

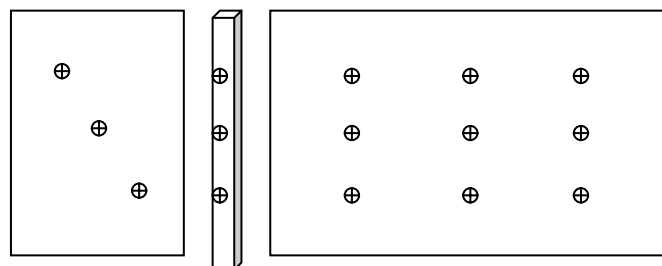


Figura 4 – Puntos de muestreo. El pilar se ha muestreado de forma incorrecta porque no se ha recogido información relativa a la transferencia de las superficies laterales

En la confluencia entre paramentos se presentan formas modales de propagación que desaparecen a medida que nos alejamos de la arista de unión. Es la prolongación de los modos de propagación del paramento vecino lo que aparece en las proximidades de la arista de unión. Estos modos se atenúan con rapidez, por lo que su muestreo no es representativo en la mayoría de los casos. Así pues aparece una analogía con la norma UNE EN ISO 140-4 en lo referente a distancias mínima de separación entre el sensor y los límites del recinto; en nuestro caso la distancia mínima estaría referida a la arista que delimita el paramento.

3. ANÁLISIS

Como resultado del procesado numérico de los datos aportados por el ensayo se obtiene una matriz de transferencia acústica entre los recintos.

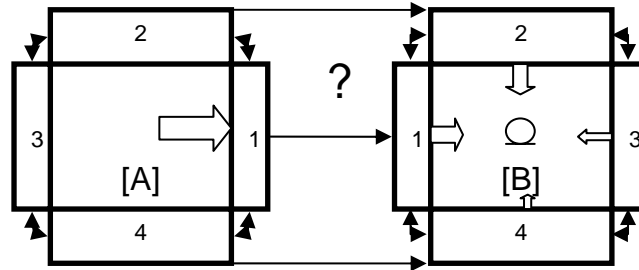


Figura 5 – transferencia entre el paramento 1 del recinto [A] y el recinto [B]

Supuesto que se genera un input aislado sobre el elemento 1 del recinto [A], el sistema responde con un nivel sonoro en [B] que se puede expresar como suma de las contribuciones individuales de cada uno de los elementos que forman el recinto [B] de la siguiente forma:

$$l_{[B]} = p_{(1)} \times (\tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{14}) \quad (1)$$

Donde: $l_{[B]}$ es el nivel sonoro en [B]; $p_{(1)}$ es la presión aplicada en el paramento 1 del recinto emisor [A]; τ_{i} es el coeficiente de transferencia entre el paramento 1 del recinto [A] y el paramento respectivo del recinto [B].

Considerando una excitación global del recinto [A] podemos presentar una ecuación algebraica de la forma:

$$(l_{(1)} \quad l_{(2)} \quad l_{(3)} \quad l_{(4)}) = (p_{(1)} \quad p_{(2)} \quad p_{(3)} \quad p_{(4)}) \times \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} & \tau_{14} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} & \tau_{24} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} & \tau_{34} \\ \tau_{41} & \tau_{42} & \tau_{43} & \tau_{44} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$l_{[B]} = l_{(1)} + l_{(2)} + l_{(3)} + l_{(4)} \quad (3)$$

Este tipo de matrices se puede transformar de dos formas distintas:

- Reorganización. Modifica el tamaño de la matriz agrupando varios vectores en otros equivalentes favoreciendo el trabajo de análisis y diseño.
- Reconversión. Modifica la utilidad de la información para adaptarla a los criterios de diseño que se deseen.

3.1. Reorganización de la matriz

La matriz se puede reorganizar mediante proceso algebraico según las necesidades o preferencias del usuario.

Esto hace posible que los paramentos que componen la matriz se reagrupen en la forma que más interese al usuario de la siguiente forma:

- Agrupación por funcionalidad. Paramentos con la misma funcionalidad que están dispersos en el recinto emisor se pueden reorganizar en un solo paramento equivalente que recoge el comportamiento global, de estos, respecto al recinto receptor. Por ejemplo se puede reagrupar todos los pilares del recinto emisor en un pilar equivalente.
- Agrupación por proximidad. Paramentos que conforman una unidad superior se pueden agrupar en un paramento equivalente representativo del comportamiento equivalente de los anteriores. Por ejemplo el vector de una puerta, una ventana, el muro que los contiene y el pilar empotrado en el muro se pueden agrupar en un vector equivalente de “fachada”.
- Agrupación por relevancia. Paramentos que no presentan un comportamiento relevante frente a los paramentos principales se pueden agrupar para aligerar el proceso de diseño. Así por ejemplo en un recinto con un suelo inerte, en cuanto a transmisión acústica, y diferentes elementos de tabiquería, unidos exclusivamente a él, como barras y pantallas pueden pasar a agruparse en un nuevo paramento equivalente favoreciendo el diseño.

A modo de ejemplo reorganizamos la ecuación (2) agrupando el paramento 2 y 4 del recinto [A] de la figura 5 en un paramento 2 equivalente que pasa a representar a los dos.

Como primer paso hay que determinar la relación entre $p_{(4)}$ y $p_{(2)}$ de la forma:

$$\sigma = \frac{p_{(4)}}{p_{(2)}} \quad (4)$$

Por lo que la ecuación (2) resulta en la siguiente equivalente:

$$\begin{pmatrix} l_{(1)} & l_{(2)} & l_{(3)} & l_{(4)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{(1)} & p_{(2)} & p_{(3)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} & \tau_{14} \\ \tau'_{21} & \tau'_{22} & \tau'_{23} & \tau'_{24} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} & \tau_{34} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Donde los coeficientes τ'_{2i} son:

$$\tau'_{2i} = \tau_{2i} + \sigma \cdot \tau_{4i} \quad (6)$$

Como ejemplo del resultado de la reorganización un conjunto de 40 vectores, correspondientes a 40 paramentos, se puede reorganizar en 8 paramentos equivalentes. Por ejemplo el recinto emisor se puede reducir a {suelos} + {techos} + {medianeros} + {fachadas} + {comunitarios} + {instalaciones} + {partición a sala de máquinas} + {inertes} permitiendo evaluar las medidas correctoras convenientes para cada caso.

3.2. Reconversión de la matriz

A partir de la información contenida en la matriz se pueden abordar diferentes tipos de análisis en función de la naturaleza de la fuente sonora.

Así pues hay que reconvertir la matriz para que acepte la información o *INPUT* de la fuente sonora en el recinto emisor y calcule un *OUTPUT* en el recinto receptor.

Atendiendo a los *INPUTS* en el recinto emisor [A] y los *OUTPUTS* en el recinto receptor [B] deseados se pueden establecer 4 tipos de reconversión de la matriz:

- Estructural [A] » Estructural [B]. Permite abordar todos los problemas de vibraciones originados por maquinaria en funcionamiento.
- Estructural [A] » Aéreo [B]. Permite abordar todos los problemas de inmisión sonora ocasionados por maquinaria en funcionamiento.
- Aéreo [A] » Aéreo [B]. Permite abordar todos los problemas de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.
- Aéreo [A] » Estructural [B]. Problemas de aislamiento estructural a ruido aéreo.

3.3. Transformación

Aplicando reorganización y reconversión se puede transformar la información de la matriz y compararla con la información que se obtiene a través de otros métodos de ensayo como los de la norma ISO 140-x lo que permite:

- Comparar. El ensayo reticular noise puede usar otros ensayos normalizados como medio de comparar la información que maneja y acotar errores.
- Calibrar. El análisis reticular noise puede reintroducir la información de otros métodos de ensayo como los de la norma ISO 140-x en la matriz de transferencia acústica para calibrar los resultados de un ensayo reticular.
- Resolver indeterminaciones. El método de análisis y la funcionalidad de la matriz permite resolver ensayos a ruido reticular con un elemento sin evaluar.

4. DISEÑO

A partir de los datos del ensayo es posible diseñar un programa de cálculo automatizado capaz de resolver con un simple "clic" cualquier problema de ingeniería de aislamiento acústico.

Hay que recordar que estamos diseñando medidas correctoras sobre paramentos equivalentes, no reales, en base a su comportamiento reticular, no individual.

Los métodos de diseño que se emplean en la actualidad están pensados para ser aplicados a paramentos singulares conocidos por su composición.

Este nuevo método de diseño no se basa en estimaciones sino en comportamientos de grupo.

4.1. Datos de entrada

A partir de la información obtenida por el ensayo se puede lanzar el proceso de diseño, de forma automática si así se desea, con los siguientes datos:

- Normativa de aplicación: Debería aportar dos valores; el aislamiento en graves, típicamente D(125) y el aislamiento global DnT o similar. En el caso de que la normativa solo aporte el aislamiento global necesario se aconseja adoptar como criterio de calidad un D(125) no inferior al valor global en más de 15 dB.
- Margen de seguridad: Hay que recordar que la posterior evaluación tiene una incertidumbre de evaluación, típicamente ± 1.5 dB, que hay que añadir al margen de incertidumbre del método de ensayo de ruido reticular y al margen de error de diseño. Así por ejemplo un diseño que vaya a generar un incremento de aislamiento de 15 dB debe tomar un margen de error de ± 1.5 dB para el ensayo y diseño en método reticular más otro margen de ± 1.5 dB para la incertidumbre de evaluación, resultando un margen total de ± 3 dB.
- Margen de confort. Se entiende que se aplica en aquellos casos donde el cliente precisa mejorar la normativa atendiendo a necesidades puntuales.

El software permite manejar por el momento la matriz reconvertida que acepta como *INPUT* ruido aéreo generado en el recinto emisor [A] y obtiene como *OUTPUT* ruido aéreo generado en el recinto receptor [B]. El software permite diseñar el aislamiento global frente a ruido aéreo entre ambos recintos, actuando de forma diferenciada sobre cada uno de los paramentos definidos en el recinto emisor [A].

Futuras versiones del software permitirán también el manejo del resto de matrices reconvertidas explicadas en el punto 3.2; y por lo tanto, el diseño de soluciones de aislamiento acústico para cada tándem de tipos de señal de ruido *INPUT-OUTPUT* consideradas.

4.2. Diseño de medidas correctoras

El software permite el diseño de medidas correctoras sobre los diferentes vectores de parámetros de la matriz reconvertida; cuyo fin es incrementar el aislamiento global entre los recintos bajo análisis.

También es un objetivo definir diferentes *INPUT* de fuentes sonoras en el recinto emisor [A] para comprobar qué *OUTPUT* ofrecen en conjunto en el recinto receptor [B], tras aplicar medidas correctoras sobre la matriz reconvertida.

Así el usuario cuenta como criterios de diseño tanto con los niveles de aislamiento global que se van obteniendo como con los niveles de inmisión sonora que se prevén en el recinto [B].

Dado que la única matriz reconvertida que se maneja por ahora en el software es la de ruido aéreo; se habilita un interfaz que posibilita el diseño de medidas correctoras para incrementar el aislamiento a ruido aéreo de parámetros de forma individual o por grupos, basado en la teoría del aislamiento acústico de paredes dobles. No se considera el diseño de paredes triples porque a igualdad de materiales y espesores prácticos de cavidades las paredes triples no mejoran el aislamiento de las dobles; referencia [1] pag. 137.

El interfaz del software posibilita la selección de diversas soluciones constructivas, así como la definición de la cámara del doble cerramiento. La variación obtenida en el aislamiento futuro, tanto del paramento sobre el que se aplica la solución, como del aislamiento global resultante, se visualiza gráficamente de forma inmediata; facilitando un diseño intuitivo.

4.3. Criterios de diseño de aislamiento a ruido aéreo

Existen tres criterios a considerar en el diseño de medidas correctoras de aislamiento acústico:

- Medioambiental. Las medidas correctoras deben ser respetuosas con el medio ambiente facilitando la sostenibilidad del mismo. Esta primera condición debe primar sobre las restantes porque es un sinsentido intentar mejorar el medioambiente en base a su destrucción.
- Económico. El diseño debe ser lo más económico posible puesto que de esta manera será viable. Un menor coste de las medidas correctoras supone una mayor implantación social.
- Espacial. El coste espacial es el más ecológico de los gastos posibles porque no genera residuos ni demanda de materiales, es por ello el mejor criterio de partida ya que suma los dos anteriores.

4.4. Proceso automatizado de diseño

En base a los datos de entrada y con los criterios expuestos se procede de la siguiente forma:

- Selección del número de parámetros (reales o equivalentes) que precisan mejorar en frecuencias graves y determinación de los espesores de cámara que se deben aplicar a cada uno de ellos para obtener un resultado homogéneo. Basta para ello ordenar los vectores de transferencia de la matriz de aislamiento en función de sus prestaciones en graves.
- Determinación de los espesores de cámara necesarios para cada tipo de paramento para que el resultante cumpla las necesidades.
- Selección de los vectores que precisan ser mejorados para cumplir los objetivos de aislamiento global. De nuevo se reordenan los vectores de transferencia de la matriz de aislamiento para proceder después con el diseño de los refuerzos de masa trasdosada y relleno de cámara.
- Revisión con el cliente de los costes económicos y espaciales propuestos por el programa para determinar la viabilidad del proyecto. En este punto se necesita un acceso "on line" que permita la revisión del proyecto en cualquier momento y lugar con la única condición de acceso a internet,

4.5. Resultados

El software permite obtener *online* en cualquier momento un documento que recoge toda la información que se está manejando: datos de partida, medidas correctoras aplicadas, resultados, definición de ruidos en el recinto emisor [A], ruidos en el recinto receptor [B].

El diseño queda estructurado de forma que se puede evaluar por actuaciones parciales. Esto permite la certificación del progreso adecuado de las obras. Así por ejemplo se puede acometer una fase correctora y a su finalización verificar los resultados obtenidos contrastándolos posteriormente con los esperados.

Para terminar se debe resaltar la escalabilidad de los resultados. El usuario puede conocer de antemano como y donde invertir su dinero para rentabilizar al máximo cada inversión parcial que vaya acometiendo y los límites del recinto para implantar una actividad.

5. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento de las redes de paramentos permitirá el diseño de aislamiento acústico con menores costes económicos y ambientales.

El resultado de la implantación de esta tecnología en la sociedad comportará beneficios para la misma porque:

- Facilita la rehabilitación acústica de inmuebles.
- Abarata costes.
- Elimina la incertidumbre de los resultados esperados, que pasan a ser evaluables progresivamente a lo largo del proyecto.
- Determinará la responsabilidad de cada una de las partes involucradas en el proyecto.
- Favorecerá el desarrollo del sector revertiendo beneficios ambientales y económicos a la sociedad.

Referencias

- [1] Higinio Arau. *ABC de la Acústica Arquitectónica*, ediciones CEAC, Barcelona, 1999.
- [2] E. A. Guillemin. *Mathematics of Circuits Analysis*, Jhon Wiley, 1949.
- [3] H. J. Carlin, & A. B. Giordano. *Network Theory*, Prentice Hall. 1964.
- [4] W.R. Le Page & S. Seely. *General Network Analysis*, Mc Graw-Hill Book Co. 1952.