



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Estudio de las mediciones del aislamiento acústico a baja frecuencia basados en mediciones en ventanas con distinto acristalamiento.

D. Caballol¹; M. A. Navacerrada¹; D. De la Prida¹; A. Pedrero¹; E. Latorre¹.

¹ Grupo de Acústica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid, Spain,

david.caballol@upm.es;mdelosangeles.navacerrada@upm.es;danidelaprida@gmail.com;antonio.pedrero@upm.es;eduardo.latorre.iglesi
as@upm.es

Resumen

La parte 3 de la norma ISO 16283 describe el procedimiento para determinar el aislamiento acústico de una fachada. El procedimiento se aplica a salas con volúmenes comprendidos entre 10 m³ y 250 m³ en el rango de frecuencias entre 50 y 5000 Hz. Para un volumen de la sala receptora superior a 25 m³, no es obligatorio utilizar el procedimiento de baja frecuencia para las bandas de octava de 50, 63 Hz y 80 Hz. Basta con que la fuente sonora sea capaz de generar un nivel suficiente a partir de 50 Hz. En este trabajo se han realizado mediciones in situ y en laboratorio en recintos con un volumen superior a 25 m³ utilizando y no utilizando el procedimiento de baja frecuencia para responder a la pregunta de si, aunque no sea obligatorio, es conveniente calcular el nivel de presión sonora teniendo en cuenta el valor máximo de presión sonora medido en las esquinas del recinto. Los resultados obtenidos, tanto in situ como en laboratorio sugieren que el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L2 obtiene una reducción considerable del aislamiento acústico de baja frecuencia al compararlo con el procedimiento por defecto.

Palabras clave: fachada, aislamiento acústico, baja frecuencia, ensayos in situ, ensayos en laboratorio.

PACS: 43.55-n; 43.58-e; 43.20.Ye.

Abstract

Part 3 of ISO 16283 describes the procedure for determining the sound insulation of a facade. The procedure applies to rooms with volumes between 10 m³ and 250 m³ in the frequency range between 50 and 5000 Hz. For a receiving room volume greater than 25 m³, it is not mandatory to use the low frequency procedure for the 50, 63 Hz and 80 Hz octave bands. It is sufficient that the sound source was able to generate a sufficient level at 50 Hz and above. In this work, in situ and laboratory measurements have been carried out in enclosures with a volume greater than 25 m³ using and not using the low frequency procedure to answer the question of whether, although it is not mandatory, it is convenient to calculate the sound pressure level taking into account the maximum sound pressure value measured at the corners of the enclosure.

The results obtained, in situ and in the laboratory, suggest that the low frequency (corner) method for L1 obtains a considerable reduction of the low frequency sound insulation when compared to the default procedure.

Keywords: facade, acoustic insulation, low frequency, in situ tests, laboratory tests.



1. INTRODUCCIÓN

La repetibilidad y la reproducibilidad en las mediciones de aislamiento acústico deben estar garantizadas para evitar problemas legales, muy especialmente cuando los resultados de las mediciones se acercan a los límites de aislamiento acústico especificados en la normativa. Los procedimientos de medición de bajas frecuencias descritos en la serie de normas ISO 140, (hoy sustituidas por la serie de normas ISO 16283), no dieron buenos resultados [1]. Las partes 4 y 7 de la serie de normas ISO 140, que se ocupaban de la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo y de impacto, incluían anexos que proporcionaban orientación sobre cómo realizar mediciones en las bandas de bajas frecuencias, pero los requisitos eran a veces difíciles de cumplir en espacios reducidos. Sin embargo, la norma ISO 140-5, que se refiere a la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas, no incluía un anexo similar, a pesar de que las bandas de baja frecuencia suelen ser relevantes en este caso para muchas fuentes de ruido ambiente [2].

La norma ISO 16283-3 [3], que revisa y sustituye a la antigua ISO 140-5, trata de la medición del aislamiento acústico de las fachadas. Esta norma describe un método de medición para el rango de baja frecuencia que debe utilizarse si el volumen de la sala receptora es inferior a 25 m^3 . Este volumen (es decir, 25 m^3) se determinó durante la redacción de la norma, ya que era necesario identificar un volumen máximo al que se debe aplicar el procedimiento de baja frecuencia. Finalmente, este volumen se fijó en 25 m^3 , aunque inicialmente el procedimiento de baja frecuencia se diseñó para volúmenes inferiores a 50 m^3 .

La elección de este volumen límite (es decir, 50 m^3) se basó en la distribución de los modos en salas con volúmenes pequeños y dimensiones desfavorables, en las que al menos una dimensión de la sala coincide con la longitud de onda y otra coincide con al menos la mitad de la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de frecuencia más baja. Sobre esta base, y teniendo en cuenta que la banda de 1/3 de octava más baja cubierta por las normas es de

50 Hz, una de las dimensiones de la sala debería ser al menos de 6,88 m y la otra de 3,44 m. Teniendo en cuenta estas dimensiones y dado que la altura de un recinto oscila entre 2 y 2,3 m, el volumen de la sala debería ser al menos de 50 m^3 para evitar el uso del método de baja frecuencia.

Sin embargo, la utilización de este volumen, calculado sobre la base de principios físicos, presentaba inconvenientes prácticos. La mayoría de las habitaciones de las viviendas que actualmente se construyen en Europa, tendrían un volumen inferior a 50 m^3 [4], lo que obligaba a utilizar constantemente el procedimiento de baja frecuencia y aumentaba considerablemente la duración de las mediciones. En consecuencia, el volumen máximo del recinto se redujo de los 50 m^3 previstos inicialmente, a exactamente la mitad, es decir los 25 m^3 .

El procedimiento de baja frecuencia, que implica la medición en las esquinas, se basa en el hecho de que el campo sonoro no es difuso en recintos regulares y pequeños. Por lo tanto, el método pretende mejorar la repetibilidad y reducir la incertidumbre en las bajas frecuencias, lo que puede repercutir directamente en el confort del ocupante de una habitación pequeña. Hay que tener en cuenta que es habitual que las personas duerman con la cabeza cerca de las paredes o incluso de una esquina, donde los niveles de presión sonora tienden a ser significativamente más altos que en la zona central de la habitación.

El procedimiento de baja frecuencia sigue ofreciendo una serie de incógnitas que necesitan ser resueltas, especialmente si se considera que tanto la duración de una medición de aislamiento acústico como su posterior análisis aumentan considerablemente, lo que implica que un operario no suele realizar mediciones mediante el procedimiento de baja frecuencia si el volumen de la habitación es superior a 25 m^3 . Además, en la mayoría de los países, las mediciones con fines reglamentarios sólo se exigen entre las bandas de 1/3 de octava comprendidas entre 100 y 3150 Hz [2].

Sobre el uso del procedimiento de medición de baja frecuencia, es posible encontrar varias

referencias. Por ejemplo, en lo relativo al aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos, se ha investigado cómo estos procedimientos de baja frecuencia se ven afectados por el tipo de excitación en la habitación emisora o por la presencia de mobiliario en la habitación receptora [5]. En lo relativo a las fachadas, existen estudios sobre mediciones en edificios con estructura de madera [6] que comparan los resultados de la medición por defecto y la medición con el procedimiento específico de baja frecuencia en salas con un volumen inferior a 25 m³. En estas mediciones, la referencia se realizó tomando el valor medio del nivel de presión sonora medido en cinco posiciones de micrófono en la zona central de la sala siguiendo el procedimiento por defecto. A continuación, el valor de referencia se comparó con los obtenidos en las esquinas. Se comprobó que la diferencia de nivel de presión sonora al comparar las mediciones en las distintas esquinas puede ser de hasta 10 dB para bandas de 1/3 de octava por debajo de 500 Hz.

En general, en España, la superficie media de los dormitorios individuales oscila entre 9 y 11 m². Teniendo en cuenta que la mayoría de las normativas locales fijan la altura libre mínima en 2,5 m, el volumen de estas habitaciones oscila entre 22,5 y 27,5 m³, lo que sitúa a un dormitorio típico en un rango incierto para la aplicación del método específico de baja frecuencia.

En este trabajo se han realizado mediciones de aislamiento acústico a ruido aéreo en fachada en el rango entre 50 y 5000 Hz en recintos con un volumen superior a 25 m³ utilizando tanto el procedimiento por defecto como el específico de baja frecuencia de la norma ISO 16283-3:2016. Se analizaron las implicaciones de emplear el procedimiento específico de baja frecuencia para la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo en fachadas. Además, también se analizó cómo afecta a la magnitud global que describe el aislamiento, el hecho de considerar el nivel de presión sonora medio medido en las esquinas en lugar del valor máximo para el cálculo del nivel en la sala receptora (L₂) para las bandas de 50, 63 y 80

Hz, como se indica actualmente en la norma ISO 16283-3:2016.

Actualmente, el grupo de Acústica Arquitectónica de la UPM está realizando una campaña de mediciones de aislamiento acústico a ruido aéreo de una ventana con distintos tipos de acristalamiento entre 50 y 5000 Hz en laboratorio. Para ello se utiliza tanto el procedimiento por defecto como el específico de baja frecuencia de la norma ISO 16283-3:2016. [3] Estos ensayos, están enmarcados dentro del proyecto RTI2018-094656-B-I00 y cuyo objetivo principal es analizar la contribución de las bajas frecuencias a las magnitudes globales y en su grado de molestia. Los ensayos realizados también serán de utilidad para comprobar en un entorno controlado, los resultados de las mediciones in situ

En resumen, se han podido encontrar diferencias significativas entre las mediciones realizadas in situ con ambos métodos, siendo el aislamiento acústico en las bandas de baja frecuencia menor cuando se incluye el procedimiento específico de baja frecuencia.

Diferencias en el aislamiento en el mismo sentido se encuentran en los primeros resultados obtenidos al realizar mediciones en laboratorio con ambos métodos, siendo el aislamiento acústico en las bandas de baja frecuencia menor en todos los casos estudiados, cuando se incluye el procedimiento específico de baja frecuencia.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

2.1 In situ

Se midieron tres habitaciones, dos situadas en viviendas de construcción tradicional y la tercera en una vivienda construida con contenedores marítimos. Las habitaciones en las que se realizaron las mediciones eran rectangulares en los tres casos.

Todas las fachadas tenían ventanas con cerco y precerco de policloruro de vinilo (PVC) con doble acristalamiento de vidrios laminares asimétricos de 8 y 6 mm con cámara de aire de 16 mm 4+4(16)3+3. Las mediciones en todos los casos se realizaron con las persianas subidas.



La tabla I muestra el volumen, el tipo de construcción y el tiempo medio de reverberación de cada una de las tres habitaciones, así como la superficie de sus huecos de ventana.

Tabla I. Descripción de las tres salas medidas (H1, H2 y H3), incluyendo su volumen, tipo de construcción y tiempo medio de reverberación, así como el área de sus ventanas.

Hab	Vol (m ³)	Ventanas (m ²)	T ₂₀ (s)	Tipo
H1	29,0	4,4	0,56	Contenedor marítimo
H2	28,1	3,4	1,38	Tradicional
H3	37,3	4,4	1,53	Tradicional

Las mediciones se realizaron según las especificaciones de la norma ISO 16283-3:2016 entre las bandas de 1/3 de octava de 50 y 5000 Hz. Para las mediciones se utilizó un micrófono montado en trípode fijo, movido manualmente a cada una de las posiciones del micrófono (en el espacio y en la esquina).

El equipo empleado fue el siguiente:

-Fuente sonora direccional Brüel & Kjaer tipo 4224 colocada a un ángulo de 45° respecto a la fachada a ensayar, generando ruido de banda ancha entre 50 y 5000 Hz. Las mediciones de directividad y el cálculo del nivel sonoro directo radiado en un elemento de la fachada cumplieron las especificaciones exigidas por la norma en una superficie de 4 x 3 m², lo que permitió realizar la medición con una única posición de la fuente.

-Analizador de espectro y nivel sonoro Brüel & Kjaer tipo 2270.

-Fuente sonora omnidireccional Brüel & Kjaer tipo 4196 para la medición del tiempo de reverberación, según el método de ruido interrumpido descrito en la norma ISO 3382-2:2008.

Para el procedimiento de medición por defecto se utilizaron cinco posiciones de micrófono, distribuidas en el espacio disponible en cada una de las salas. Estas posiciones se eligieron de

acuerdo con las distancias límite entre las posiciones de los micrófonos y las paredes especificadas en la norma.

Para el caso de la medición según el procedimiento específico de bajas frecuencias, el nivel de presión sonora se midió en cuatro esquinas con el micrófono fijado mediante un trípode, con dos esquinas cercanas al suelo y dos esquinas cercanas al techo. La distancia a las tres superficies que forman las esquinas se fijó con el trípode entre 0,3 y 0,4 m, como se indica en la norma. Para cada una de las mediciones en la sala de recepción (L2), se realizó inmediatamente después una medición del ruido de fondo (B2). De este modo, se podía esperar una alta correlación entre el ruido de fondo medido y el ruido de fondo existente durante la medición de cada observación L2.

El nivel de ruido exterior (L1) se midió a una distancia de 2 metros del centro de la fachada.

Se utilizaron los siguientes métodos de cálculo para calcular el nivel L2, LF para las bandas de 50, 63 y 80 Hz:

1)El método por defecto especificado por la norma cuando el volumen del recinto es superior a 25 m³: media energética de los valores de nivel de presión sonora medidos en las cinco posiciones del micrófono distribuidas uniformemente por la superficie del recinto.

2)El procedimiento de cálculo de bajas frecuencias especificado en la norma según la expresión (1), donde L_{2, corner} es el máximo de los niveles de presión sonora medidos en todas las esquinas para las bandas de 50, 63 y 80 Hz:

$$L_{2,LF} = 10 \log \left[\frac{10^{0.1L_{2,Corner}} + (2 \cdot 10^{0.1L_2})}{3} \right] \quad (1)$$

3)Según la expresión (1) pero siendo L_{2, corner} la media energética de los niveles de presión sonora medidos en las cuatro esquinas para las bandas de 50, 63 y 80 Hz.

2.2 En laboratorio

Las medidas acústicas fueron realizadas en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

El laboratorio cuenta con dos cámaras de ensayo a ruido aéreo conforme a la normativa Norma ISO 10140-5 que determina las características técnicas y geométricas que deben cumplir dichas cámaras de ensayo.

Las aberturas de ensayo específicas de tamaño pequeño, como las empleadas para ubicar las ventanas de esta investigación, tienen un ancho de 1250 mm y una altura de 1500 mm, con

una tolerancia permitida en cada medida de 50 mm. La abertura de ensayo tiene una profundidad de 500 mm, con nichos escalonados con un acabado reflectante. El nicho más grande admitido es entre 60 mm y 65 mm, más ancho únicamente en los lados y en la parte superior. Estas dimensiones cumplen las exigencias establecidas por la norma ISO 10140, donde se indica que la distancia mínima entre la abertura de ensayo de tamaño pequeño y cualquier pared, suelo o techo de cualquiera de los recintos debe ser de 500 mm, recomendando que la abertura no debería ser simétrica en la pared de separación.

La pared con la abertura de ensayo está construida a partir de un elemento de dos hojas de aproximadamente igual espesor con una densidad de al menos 1800 kg/m³. El hueco entre las dos paredes está relleno de lana mineral y cubierto con un material reflectante hermético.

El equipo empleado en laboratorio fue el siguiente:

- Fuente sonora direccional JBL EON 618S
- Analizador de espectro y nivel sonoro Brüel & Kjaer tipo 2270 montado sobre trípode giratorio
- Fuente sonora omnidireccional Brüel & Kjaer tipo 4196

En la actualidad se están realizando mediciones de aislamiento acústico en ventanas con diferentes tipos de acristalamiento. El trabajo se encuentra en desarrollo, habiéndose completado las siguientes mediciones con ventana abatible

de doble hoja de cloruro de polivinilo (PVC) de 1,5 m² y con acristalamientos de dimensiones 103 x 41,3 cm.

Mediciones entre 50 y 5000 Hz, mediante el procedimiento por defecto:

- Doble acristalamiento de vidrios sencillos simétricos de 4 mm con cámara de aire de 12 mm de espesor. 4(12)4
- Doble acristalamiento de vidrio sencillos asimétricos de 4 y 8 mm con cámara de aire de 12 mm de espesor. 4(12)8
- Doble acristalamiento de vidrio sencillo de 4 mm y laminar normal de 6 mm con cámara de aire de 12 mm de espesor. 4(12)3+3
- Doble acristalamiento de vidrio sencillo y laminar de 8 mm con cámara de argón al 90 % de 12 mm de espesor. 4(12AR)4+4
- Triple acristalamiento de vidrios sencillos de 4 mm con cámaras de aire de 6 mm 4(6)4(6)4
- Acristalamiento sencillo de 10 mm

Mediciones entre 50 y 5000 Hz, mediante el procedimiento de bajas frecuencias (método en esquinas):

- Acristalamiento sencillo de 10 mm

Y con la intención de continuar midiendo en esquinas, con los tipos de vidrio anteriormente descritos.

Para poder comparar con los resultados obtenidos in situ, todas las mediciones se realizaron siguiendo las especificaciones de las normas ISO 16283-3 [3], empleando tanto el método general, como el método en esquinas.

- Procedimiento por defecto entre las bandas de 1/3 de octava de 50 y 5000 Hz:

Se obtiene el nivel de presión acústica energético medio utilizando un micrófono en continuo movimiento y el sonido se genera en el recinto emisor por medio de altavoces omnidireccionales en dos posiciones.



Se mide el nivel de presión acústica tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor.

Se calcula el nivel de presión acústica energético medio tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor, corrigiendo para el ruido de fondo.

Se mide el tiempo de reverberación en el recinto receptor, mediante el método de ruido interrumpido y finalmente, se determina el índice de reducción acústica.

- Procedimiento para bajas frecuencias (Método en esquinas):

Para poder comparar con los resultados obtenidos in situ, se extrapola el método de ensayo para bajas frecuencias definido en la norma ISO 16283-3 (método en esquinas), a pesar de que las dimensiones de las cámaras de ensayo son superiores a 25 m³.

Se obtiene el nivel de presión acústica energético medio utilizando un micrófono fijo en cuatro esquinas del recinto (dos en suelo y dos en techo) a una distancia de 0,3 m a 0,4 m de cada esquina.

Para las bandas de un tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz, se calcula el nivel de presión acústica de baja frecuencia promediado energéticamente con un tiempo de 15 segundos.

El altavoz direccional utilizado garantiza que el sonido generado en el recinto es estable y tiene espectro continuo al menos sobre el rango de frecuencias cubierto por la banda de octava de 63 Hz.

Se mide el nivel de presión acústica tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor.

Se calcula el nivel de presión acústica energético medio tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor, corrigiendo para el ruido de fondo.

Se mide el tiempo de reverberación en el recinto receptor, mediante el método de ruido interrumpido en la banda de octava de 63 Hz en vez de en las bandas de un tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz y este valor único medido

se utiliza para representar las bandas de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz y finalmente, se determina el índice de reducción acústica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al hacer las mediciones in situ, se ha comprobado que en las bajas frecuencias (bandas de 50, 63 y 80 Hz), para las mediciones realizadas, no siempre se ha podido cumplir que L₂ esté 10 dB por encima de B₂, tanto para el método de medición por defecto como para el procedimiento de medición de bajas frecuencias.

A modo de ejemplo, el cuadro II muestra los valores de L₂ y B₂ para una de las tres salas y las bandas de 50, 63 y 80 Hz siguiendo tanto el procedimiento por defecto como el específico de baja frecuencia. Para el procedimiento de baja frecuencia, como se ha comentado anteriormente, se han realizado dos cálculos. Por un lado, el cálculo descrito en la norma, seleccionando el nivel máximo de los medidos en las esquinas como L_{2,corner}. En esa situación, se tomó como B_{2,corner} el valor medido en la esquina donde se midió el máximo L₂. Por otra parte, también se obtuvo un L_{2,corner} tomando la media de los L₂ medidos en todas las esquinas. En ese caso, B_{2,corner} también se calculó como la media energética de los niveles medidos en las cuatro esquinas.

Como puede verse en la Tabla II, para la sala de ejemplo, siguiendo el método por defecto, la diferencia entre L₂ y B₂ era inferior a 10 dB para algunas de las bandas de baja frecuencia que, por tanto, requerían una corrección del ruido de fondo. Sin embargo, esta diferencia aumenta significativamente a medida que se aplica el procedimiento específico de bajas frecuencias, tanto para el cálculo descrito en la norma como para el cálculo medio. En particular, todas las bandas de baja frecuencia presentan diferencias superiores a 10 dB para el cálculo basado en el máximo, ocurriendo lo mismo para el cálculo medio, excepto para la banda de 50 Hz.

Tabla II. Valores de L₂ y B₂ para las bandas de baja frecuencia y cada método de cálculo: el cálculo por defecto para volúmenes superiores a 25 m³, el cálculo de baja frecuencia como se describe en la

norma (es decir, tomando el máximo) y el cálculo medio de baja frecuencia (es decir, tomando la media en lugar del máximo).

H _z	L _{2def}	B _{2def}	L _{2cmax}	B _{2cmax}	L _{2cavg}	L _{2cavg}
50	41,6	37,4	48,3	37,6	44,2	38,3
63	45,5	36,6	55	41	52,8	40,1
80	40,1	24,9	49,2	31,5	47,7	32,5

Las figuras 1, 2 y 3 muestran, para cada una de las salas, el valor de $D_{ls,2m,nT}$ en bandas de tercio de octava, presentando además el aislamiento acústico resultante de cada uno de los tres métodos descritos para el cálculo de L_{2,LF} en bajas frecuencias. En los tres recintos, como se puede observar en las figuras 1-3, el menor aislamiento se encuentra cuando se calcula L_{2,LF} mediante el procedimiento de bajas frecuencias especificado en la norma ISO 16283-3:2016. El valor del aislamiento acústico disminuye entre 3 y 12 dB en las bandas de 50, 63 y 80 Hz cuando se considera el procedimiento específico de baja frecuencia en todas las salas, que tenían volúmenes superiores a 25 m³, en comparación con los resultados obtenidos utilizando el procedimiento por defecto. Este resultado, además, no parece depender del tipo de construcción (es decir, tradicional o con contenedores de transporte), ni de que la sala receptora esté amueblada o vacía durante la medición. En particular, como puede verse en la figura 1, la sala construida con contenedores mostró un aislamiento de baja frecuencia inferior al de las salas construidas tradicionalmente, probablemente debido a su menor peso. En cualquier caso, para ambos tipos de construcción el aislamiento acústico disminuyó significativamente al considerar el procedimiento específico de baja frecuencia.

También se encontraron diferencias en el valor $D_{ls,2m,nT}$, entre 1 y 4 dB en este caso, dependiendo de si para el procedimiento de baja frecuencia el cálculo del L_{2,corner} se basaba en el valor máximo o en el valor medio de los medidos en las cuatro esquinas. Además de la curva de aislamiento acústico de cada sala, se han incluido en las Figuras 1-3 los valores medidos en cada una de las cuatro esquinas para las bandas de 50, 63 y 80 Hz para mostrar la variabilidad de L₂ en las esquinas.

Figura 1: Sala H1. Izquierda - Aislamiento acústico (es decir, $D_{ls,2m,nT}$) derivado tras los tres cálculos: método por defecto, procedimiento normalizado de frecuencias bajas y procedimiento medio de frecuencias bajas. Derecha - L₂ medido en cada una de las cuatro esquinas, así como el valor medio para las bandas de 50, 63 y 80 Hz.

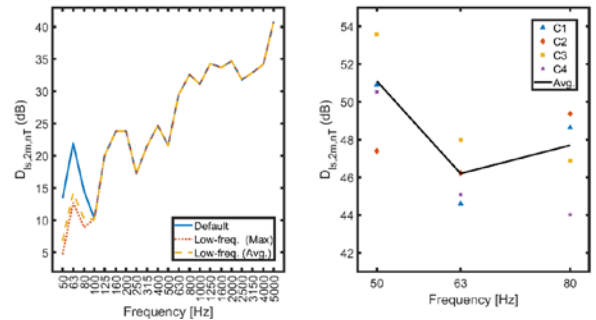


Figura 2: Sala R2. Izquierda - Aislamiento acústico (es decir, $D_{ls,2m,nT}$) derivado tras los tres cálculos: método por defecto, procedimiento normalizado de frecuencias bajas y procedimiento medio de frecuencias bajas. Derecha - L₂ medido en cada una de las cuatro esquinas, así como el valor medio para las bandas de 50, 63 y 80 Hz.

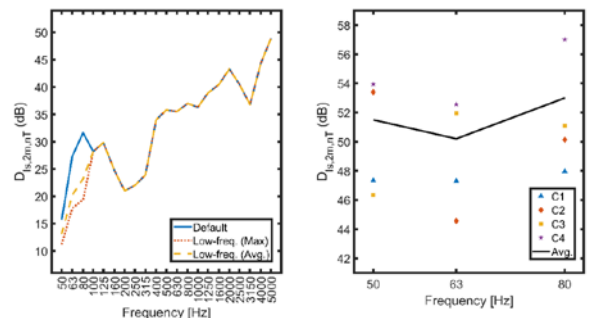
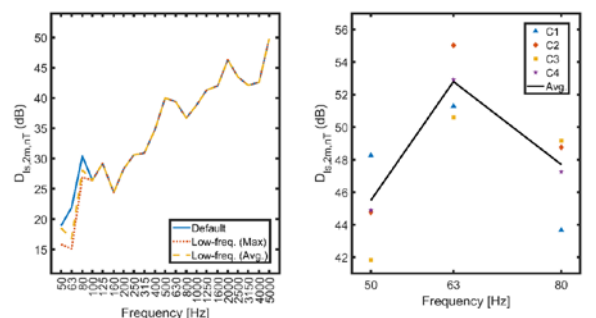


Figura 3: Sala R3. Izquierda - Aislamiento acústico (es decir, $D_{ls,2m,nT}$) derivado tras los tres cálculos: método por defecto, procedimiento normalizado de frecuencias bajas y procedimiento medio de frecuencias bajas. Derecha - L₂ medido en cada una de las cuatro esquinas, así como el valor medio para las bandas de 50, 63 y 80 Hz.



Parece razonable pensar que la medición del aislamiento acústico en las bandas de 50, 63 y



80 Hz sería más precisa si se tuviese en cuenta el procedimiento específico de baja frecuencia, incluso en recintos con volúmenes superiores a 25 m^3 , al tener en cuenta explícitamente la falta de difusividad del campo sonoro a bajas frecuencias. Además, cabría esperar que los resultados obtenidos con el procedimiento por defecto y el procedimiento específico de baja frecuencia fueran equivalentes, aunque más precisos en el caso del procedimiento de baja frecuencia. Sin embargo, para las mediciones realizadas durante esta investigación, los valores de aislamiento acústico obtenidos con los procedimientos por defecto y de baja frecuencia difieren significativamente, con una reducción considerable del aislamiento acústico de baja frecuencia si se emplea el procedimiento específico de baja frecuencia, como se muestra en los cuadros de la izquierda de las Figuras 1-3. Además, parece necesario considerar qué

enfoque del procedimiento de baja frecuencia es mejor, el que toma el valor máximo de los medidos en las esquinas (es decir, el método normalizado) o el que toma el valor medio. Aunque la diferencia entre ambos suele ser pequeña, en algunos casos puede ser bastante elevada, llegando a ser de 4 dB en algunos de los resultados obtenidos. Por lo tanto, parece pertinente evaluar cuál de los dos enfoques representa más fielmente el aislamiento acústico real de la fachada.

Resultados similares y que confirman los resultados obtenidos in situ se están obteniendo en las primeras mediciones realizadas en laboratorio.

En la Figura 4 se pueden observar los resultados de los ensayos realizados hasta el momento mediante el método por defecto

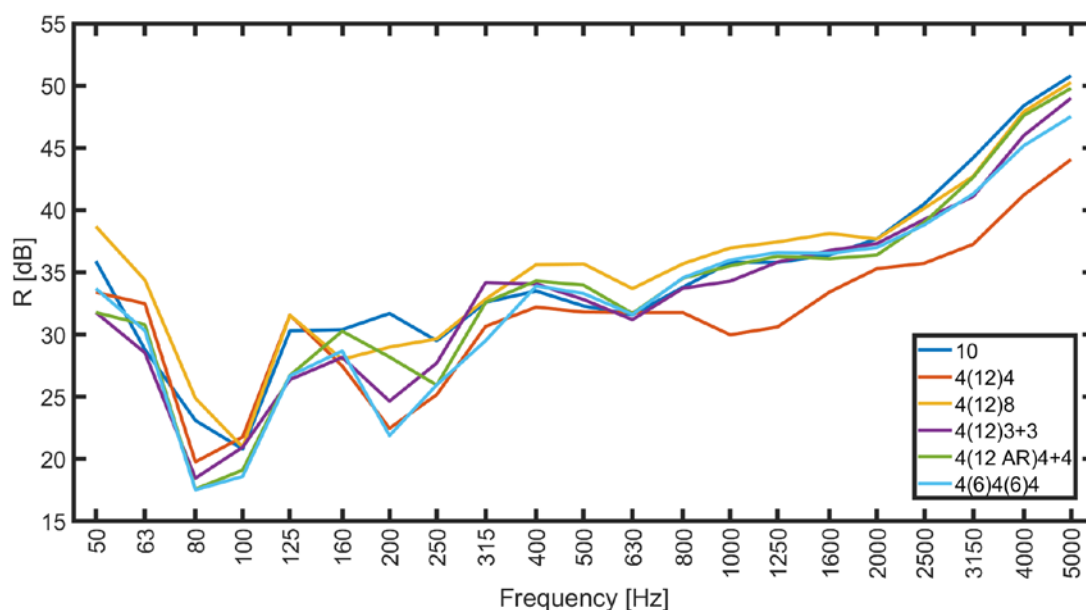


Figura 4: Índice de reducción acústica (R) obtenido para los diferentes tipos de vidrio mediante el método por defecto.

Resultados que no destacan especialmente, y que se encuentran dentro de lo que se podría esperar para este tipo de vidrios con resultados con cierta similitud entre ellos en las bandas de un tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz.

Sin embargo, al comparar un mismo tipo de vidrio (monolítico de 10 mm de espesor) con distintos métodos de medición, aparecen diferencias similares a las obtenidas en los ensayos realizados in situ.

Para ello se realizan las siguientes cuatro medidas:

- 1- Procedimiento por defecto (Def)
- 2- Procedimiento de Bajas frecuencias, realizando la medición en esquinas tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor (BF L1 L2)
- 3- Procedimiento de Bajas frecuencias, realizando la medición en esquinas únicamente en el recinto emisor (BF L1)
- 4- Procedimiento de Bajas frecuencias, realizando la medición en esquinas únicamente en el recinto receptor (BF L2)

Las situaciones que más se asemejan a las situaciones reales que se pueden encontrar in situ son la primera y la cuarta de las anteriormente descritas. El primer caso porque es el procedimiento por defecto para ensayar fachadas con recintos de volúmenes superiores a 25 m³. El ultimo, porque es el caso más

parecido a la situación real cuando se utiliza in situ el procedimiento de bajas frecuencias para ensayar fachadas, ya que el recinto emisor (L1) es en realidad el exterior de la fachada y es inviable su medición en esquinas. Recordemos que el procedimiento de baja frecuencia se debe utilizar para las bandas de un tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz en el recinto cuando su volumen es inferior a 25 m³, pero la normativa no especifica impedimento alguno para la utilización de este método (que supuestamente ha de ser más preciso en bajas frecuencias) en recintos de volumen superior.

En la Figura 5 se pueden observar una comparativa de los resultados de los ensayos realizados hasta el momento mediante los cuatro procedimientos indicados. En la gráfica se observa claramente como el resultado no varía apenas entre las bandas de un tercio de octava de 100 y 5000 Hz. Por el contrario, en las bandas de un tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz las diferencias son notables y se analizan con más detalle a continuación.

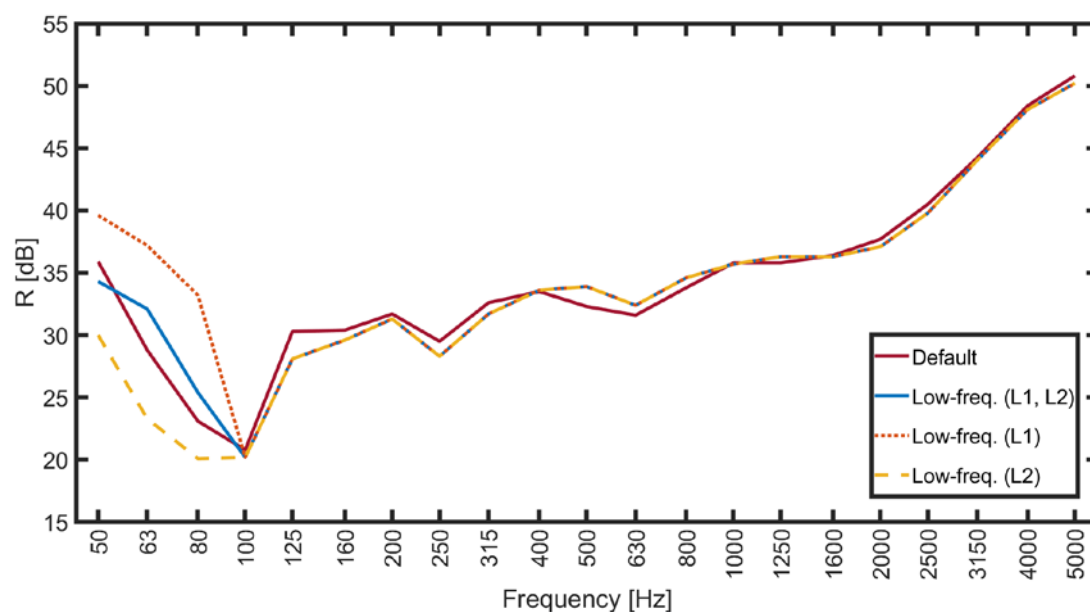


Figura 5: Índice de reducción acústica (R) obtenido para vidrio monolítico de 10 mm mediante cuatro métodos: por defecto; baja frecuencia con L1 y L2 en esquinas; L2 por defecto y L1 en esquinas; L2 en esquinas y L1 por defecto.

Si se utiliza el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L1 y L2 el resultado se asemeja en gran medida al procedimiento por defecto. Por el contrario, si solo se mide por el método de baja frecuencia en el recinto emisor (L1),

entonces el aislamiento a bajas frecuencias es comparativamente mayor que en los dos casos anteriores. En el caso de que solo se mida por el método de baja frecuencia en el recinto receptor (L2), el aislamiento es comparativamente menor que en todos casos anteriores.



Sucede, por tanto, lo mismo que se pudo observar, al realizar las mediciones in situ.

En la Tabla III podemos observar los datos en las bandas de un tercio de octava de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz, para los cuatro procedimientos. De nuevo, aunque esta cantidad debería presentarse normalmente redondeada, aquí se presenta con un decimal para facilitar la visualización de las diferencias.

Tabla III. Valor de R entre 50 y 80 Hz para los cuatro procedimientos de medición.

Frecuencia [Hz]	Por defecto	Baja Frecuencia L1 y L2	Baja Frecuencia L1 y L2 por defecto	Baja Frecuencia L2 y L1 por defecto
50	35,9	34,3	39,6	30
63	28,8	32,1	37,2	23,3
80	23,1	25,4	33,2	20,1

Cabría esperar que los resultados obtenidos con el procedimiento por defecto y el procedimiento específico de baja frecuencia fueran equivalentes, aunque más precisos en el caso del procedimiento de baja frecuencia. Sin embargo, y como se observa en la Tabla IV, los valores de aislamiento acústico obtenidos con el procedimiento por defecto y de baja frecuencia en algunos casos difieren significativamente.

Las diferencias entre el procedimiento por defecto y método de bajas frecuencias (en esquinas) para L1 y L2, no se pueden considerar concluyentes. Disminuyendo levemente (-2 dB) el aislamiento en la banda de tercio de octava de 50 Hz al medir mediante el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L1 y L2 y aumentando en las bandas de 63 y 80 Hz (+3 y +2 dB respectivamente).

Sin embargo, el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L1 produce un incremento considerable del aislamiento acústico de baja frecuencia al compararlo con el procedimiento por defecto. Con incrementos que oscilan entre 4 dB en la banda de tercio de octava de 50 Hz y 10 dB en la banda de 80 Hz.

Al igual que sucedía en los casos estudiados in situ, el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L2 obtiene una reducción considerable del aislamiento acústico de baja frecuencia al compararlo con el procedimiento por defecto. Con decrementos que oscilan entre 6 dB en la banda de tercio de octava de 50 Hz y 3 dB en la de 80 Hz.

4. CONCLUSIONES

Se han mostrado las implicaciones de utilizar el procedimiento específico de baja frecuencia descrito en la norma ISO 16283- 3:2016 [3] para la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo de fachadas en recintos con volúmenes superiores a 25 m³.

Se ha demostrado la diferencia en los resultados según se utilice el procedimiento por defecto o el de baja frecuencia. En particular, se ha comprobado que el procedimiento de baja frecuencia conduce a valores $D_{ls,2m,nT}$ más bajos que utilizando el procedimiento por defecto para las bandas de 50, 63 y 80 Hz, oscilando estas diferencias entre 3 y 12 dB. En lo que respecta a la cantidad de un solo número $D_{2m,nT,Atr}$ (ampliada a la banda de 50 a 5000 Hz) se pudieron encontrar diferencias de entre 1 y 2 dB según se empleara el procedimiento de baja frecuencia por defecto o el específico para el cálculo de la $D_{ls,2m,nT}$ de baja frecuencia. No obstante, se considera necesario realizar más pruebas para determinar si estas diferencias pueden ser diferentes en función de las distintas condiciones (por ejemplo, el tipo de construcción, el tipo de material aislante, etc.).

Con los ensayos en laboratorio se confirma que también existen importantes diferencias en los resultados según se utilice el procedimiento por defecto o el de baja frecuencia. Cuando se utiliza el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L1 y L2 el resultado se asemeja en gran medida al procedimiento por defecto. Por el contrario, si solo se mide por el método de baja frecuencia en el recinto emisor (L1), entonces el aislamiento a bajas frecuencias es comparativamente mayor que en los dos casos anteriores. En el caso de que solo se mida por el método de baja frecuencia en el recinto emisor

(L2), el aislamiento es comparativamente menor que en todos casos anteriores.

El procedimiento de bajas frecuencias, realizando la medición en esquinas únicamente en el recinto receptor (L2) es el que más se asemeja al procedimiento de bajas frecuencias empleado in situ, ya que en estos casos el recinto emisor (L1) es en el exterior de la fachada.

Al igual que sucedía en los casos estudiados in situ, el método de bajas frecuencias (en esquinas) para L2 obtiene una reducción considerable del aislamiento acústico de baja frecuencia al compararlo con el procedimiento por defecto. Con decaimientos que en este caso oscilan entre 6 dB en la banda de tercio de octava de 50 Hz y 3 dB en la de 80 Hz.

En cualquier caso, estos resultados ponen de manifiesto la importancia de revisar la conveniencia de medir el aislamiento acústico de las fachadas siguiendo el procedimiento específico de baja frecuencia para recintos con volúmenes superiores a 25 m³, dado que su uso podría repercutir en la precisión de las evaluaciones de baja frecuencia.

Aunque los resultados de esta publicación muestran que existen diferencias entre los procedimientos, se considera necesario realizar más mediciones para confirmar estos resultados, así como verificar si las conclusiones extraídas con respecto al aislamiento acústico de fachadas pueden extenderse a otros tipos de mediciones de aislamiento acústico, como el aislamiento acústico a ruido aéreo entre viviendas o el aislamiento acústico a ruido de impacto. Por último, confirmar si las conclusiones se mantienen o varían significativamente si se aumenta notablemente el volumen de la sala receptora.

Es necesario tener claro cuál es el mejor procedimiento de medición del aislamiento acústico por debajo de 100 Hz tanto para recintos de volumen inferior como superior a 25 m³. Investigaciones anteriores basadas en pruebas de escucha ya indicaron la necesidad de ampliar el rango de frecuencias, incluso hasta los 20 Hz, para evaluar el aislamiento acústico al impacto [10].

Por último, conocer el aislamiento acústico de la fachada y saber si el procedimiento de medición es adecuado es crucial en el diseño de las fachadas de los edificios. Por ejemplo, hoy en día existe una tendencia en la construcción de edificios hacia los sistemas de construcción ligera, que ofrecen la posibilidad de prefabricación, como las viviendas basadas en contenedores, que se clasifican como más rentables y sostenibles que el hormigón y la construcción tradicional. Sin embargo, estos sistemas de construcción emergentes suelen tener un peor comportamiento a bajas frecuencias que la construcción tradicional debido a su menor masa y a las resonancias que presentan en el caso de los elementos de varias láminas. Por lo tanto, es muy importante establecer si es necesario incluir el rango de bajas frecuencias para lograr una alta percepción de confort acústico cuando se pretende aumentar la protección de los ocupantes del edificio contra el ruido exterior. En consecuencia, el estudio de la necesidad de estas bandas de baja frecuencia y su correcta evaluación debería ser un punto de atención de los grupos de trabajo que se ocupan de la medición y de los requisitos de aislamiento acústico en los reglamentos y normas de construcción.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del proyecto [RTI2018-094656-B-I00].

REFERENCIAS

- [1] Hopkins C.; Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non -diffuse sound fields at low frequencies, *Applied Acoustics* 66, 2005, pp. 1339-1382
- [2] Hopkins C. Revision of international standards on field measurements of airborne, impact and façade sound insulation to form ISO 16283 series, *Building and Environment* 92, 2015, pp. 703-712.
- [3] ISO 16283-3:2016. Acoustics - Field Measurement of sound insulation in buildings and building element. International Organization for Standardization, Geneva, 2016.
- [4] EU statistics on income and living conditions (EU-SILC).
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/microdata/european-union-statistics-on-income-and-living-conditions>



[5] Schoenwald S.; Zemp A.; Pedersoli S. Applicability of measurement method according to ISO 16283 in small rooms at low frequencies, Proceedings of 45th international congress and exposition on noise control engineering, INTERNOISE 2016.

[6] Liu J.; Inoue N.; Sakuma T. Experimental study on low-frequency averaging of indoor sound pressure level in façade sound insulation measurement, Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, 2019.

[7] Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación Español. <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/ProteccionRuido.html>

[8] Miskinis K.; Oguc M.; Scamoni F. Analysis of façade sound insulation field measurements – Comparison of different performance descriptors and influence of low frequencies extension, Proceedings of international congress in noise control for quality of life, INTERNOSIE 2013.

[9] ISO/TS 19488:2021. Acoustics – Acoustic classification of dwellings. International Organization for Standardization, Geneva, 2021.

[10] Oqvist R. Walking-sound annoyance vs impact sound insulation from 20 Hz, Applied Acoustics 135, 2019, pp. 1-7.