

AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO EN BAJA FRECUENCIA: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÉTODO POR DEFECTO Y EL MÉTODO DE ESQUINAS

PACS: 43.55. Rg

De la Prida, Daniel¹; Caballol, David¹; Navacerrada, María Ángeles¹; Díaz-Chyla, Alexander¹; Pedrero, Antonio¹; Latorre, Eduardo¹.

¹Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

Palabras Clave: aislamiento acústico, baja frecuencia, magnitudes globales

ABSTRACT.

In order to make a decision on whether to include the low frequency bands (50, 63 and 80 Hz) in the calculation of the Single-Number Quantities, it is key to have accurate measurements in this range. The low frequency or corner measurement method is mandatory when the volume of the enclosure is less than 25 m³. The volume of most enclosures in dwellings is above this value. For this reason, and considering the significant increase in measurement time, technicians have not considered this method. To contribute to this discussion, this paper presents results of insulation measurements on façades and between enclosures in volumes greater than 25 m³ carried out following the default and corner methods. Since the level measured in corners is higher than that measured in the positions established by the default method, in façades, the insulation calculated with the corner method is mainly lower than that calculated with the default method. In the case of airborne sound insulation, it depends on whether the low frequency method is applied in the transmitting room, in the receiving room or in both.

RESUMEN.

Para tomar una decisión sobre si hay que incluir las bandas de baja frecuencia (50, 63 y 80 Hz) en el cálculo de los índices globales de aislamiento es clave disponer de mediciones precisas en este rango. El método de medición de baja frecuencia o esquinas es obligatorio cuando el volumen del recinto es inferior a 25 m³. El volumen de la mayoría de los recintos en viviendas se encuentra por encima de este valor, de manera que, por tiempo, el técnico no considera este método. Para contribuir a esta discusión en este trabajo se presentan resultados de mediciones de aislamiento de fachadas y entre recintos en volúmenes superiores a 25 m³ realizadas siguiendo el método por defecto y el de esquinas. Dado que el nivel que se mide en esquinas es mayor que el medido en las posiciones que establece el método por defecto, en fachadas, el aislamiento que se calcula con el método de esquinas es generalmente menor que el calculado con el método por defecto. En aislamiento acústico entre recintos, el sentido de esta comparación depende de si el método de baja frecuencia se aplica en el recinto emisor, en el recinto receptor o en ambos.

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.

El conjunto de normas ISO 16283 (partes 1, 2 y 3) [1-3] incluye un método de medición para el rango de baja frecuencia que se debe utilizar para las bandas de tercio de octava de 50, 63 y 80 Hz en el recinto emisor y/o en el recinto receptor cuando su volumen es inferior a 25 m³. Para las mediciones de aislamiento a ruido de impacto y aislamiento a ruido aéreo de fachada el método de baja frecuencia solo se llevaría a cabo en la sala receptora si su volumen es inferior a 25 m³. Las mediciones del nivel de presión sonora se realizan cerca de las esquinas del recinto para identificar la esquina con el nivel más elevado en cada banda.

El procedimiento de baja frecuencia se basa en el hecho de que el campo sonoro no es difuso en recintos regulares y pequeños. El objetivo inicial del método era mejorar la repetibilidad de las mediciones de aislamiento acústico a baja frecuencia. Aunque inicialmente el procedimiento de baja frecuencia se diseñó para volúmenes inferiores a 50 m³, finalmente este volumen se fijó en 25 m³. La utilización de un volumen de 50 m³, calculado sobre la base de principios físicos, presentaba inconvenientes prácticos. La mayoría de las habitaciones de las viviendas que actualmente se construyen en Europa tienen un volumen inferior a 50 m³ [4, 5], 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 m³ previstos inicialmente y calculado sobre la base de principios físicos, a exactamente la mitad, esto es, los 25 m³ actuales, por inconvenientes prácticos. 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 la mayoría de los países, las mediciones con fines reglamentarios sólo se exigen entre las bandas de tercio de octava de 100 y 3150 Hz [6]. Los resultados indican que los valores de las magnitudes globales no cambian considerablemente cuando se incluyen las bajas frecuencias. Sin embargo, se encuentra que la incertidumbre del procedimiento de baja frecuencia es mayor que la del procedimiento por defecto y que esta incertidumbre no se refleja bien en la incertidumbre de los índices globales [7].

En este trabajo se realiza una comparación entre el procedimiento de medición por defecto y el procedimiento de baja frecuencia, en mediciones de aislamiento acústico de fachadas y a ruido aéreo entre recintos, para recintos con volúmenes mayores que 25 m³. Para el procedimiento de baja frecuencia, las mediciones del nivel de presión sonora se tomaron cerca de esquinas de la habitación para identificar la esquina con el nivel más alto en cada banda. Se midió el nivel en un mínimo de cuatro esquinas, dos al nivel del suelo y dos al nivel del techo. Se calcularon las magnitudes de aislamiento en tercios de octava siguiendo tres procedimientos: (1) el método de medición por defecto; (2) el procedimiento de baja frecuencia; y (3) el procedimiento de baja frecuencia pero considerando el valor promedio del nivel de presión sonora medido cerca de esquinas en lugar del valor máximo. El estudio del efecto de las bandas de baja frecuencia (50, 63, 80 Hz) se completa con el cálculo comparativo de las magnitudes globales para las bandas entre 50 y 3150 Hz y para las bandas entre 100 y 3150 Hz.

Los resultados indican que, en el aislamiento acústico de fachadas, el aislamiento que se mide a baja frecuencia es menor si se sigue el método de baja frecuencia. En el caso de aislamiento a ruido aéreo entre recintos el aislamiento depende de si se utiliza el método de baja frecuencia sólo en una de las salas, emisora o receptora, o en ambas. Los resultados indican que el procedimiento de baja frecuencia sigue ofreciendo una serie de incógnitas que necesitan ser resueltas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Medición in situ del aislamiento acústico de fachadas

Se llevaron a cabo mediciones en cinco fachadas en construcciones de distintos tipos (tradicional y ligera) y con distintos tipos de ventanas. La Tabla I resume los valores del volumen y el tiempo de reverberación promedio del recinto receptor y el área de la ventana, para cada uno de los recintos. El valor del tiempo de reverberación es el promedio de los valores obtenidos en las bandas de tercio de octava de 500, 1000 y 2000 Hz. El tiempo de reverberación más alto de los recintos R2 y R3 se explica porque no estaban amueblados.

Tabla I. Volumen, área de hueco y tiempo de reverberación promedio de cada recinto receptor.

Recinto	Volumen (m ³)	Área hueco (m ²)	T (s)
R1	29,0	4,4	0,56
R2	28,1	3,4	1,38
R3	37,3	4,4	1,53
R4	55,0	3,6	0,57
R5	70,0	3,6	0,60

Las mediciones se llevaron a cabo según las especificaciones de la norma ISO 16283-3 [3]. Para todo el rango de frecuencias, entre 50 y 5000 Hz, las mediciones fueron llevadas a cabo con el micrófono montado sobre un trípode fijo. Este trípode, cuyo montaje se ilustra en la Figura 1, se desplazaba de manera manual y secuencial a cada una de las sucesivas posiciones microfónicas, tanto las medidas dentro del espacio del recinto, como las medidas en las esquinas de este.

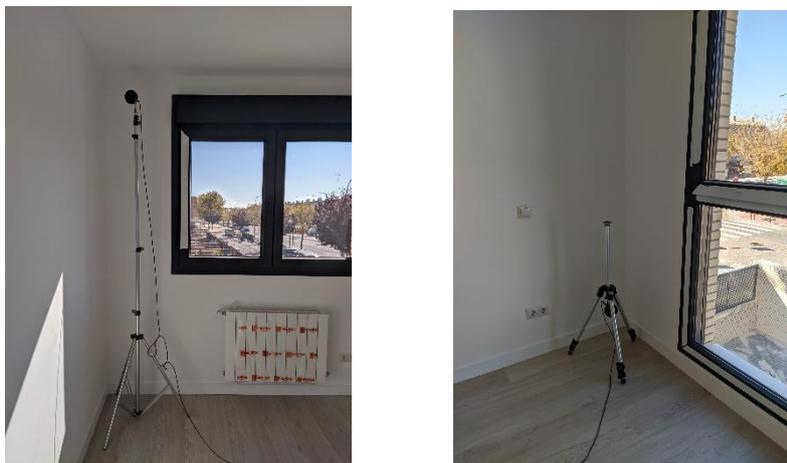


Figura 1. Detalles del interior de los recintos R2 y R3 durante las mediciones. Se pueden apreciar la disposición del micrófono en los trípodes para la medición del nivel de presión sonora en esquinas superiores e inferiores del recinto.

Para las mediciones se usaron los siguientes equipos:

- una fuente directiva modelo 4224 de Brüel & Kjaer colocada según especifica la norma y formando un ángulo de 45° con la fachada para generar ruido entre 50 y 5000 Hz. Las medidas de directividad y de cálculo del nivel sonoro directo radiado sobre un elemento de fachada se adecuan a las especificaciones que exige la norma sobre una superficie de 4 x 3 m², lo que permitió llevar a cabo la medición con una sola posición de fuente,
- un analizador sonoro modelo 2270 de Brüel & Kjaer,
- una fuente omnidireccional modelo 4196 de Brüel & Kjaer, para la medición del tiempo de reverberación según la norma UNE-EN ISO 3382-2 [8], utilizando el método de ruido interrumpido.

Para el procedimiento por defecto se utilizaron cinco posiciones de micrófono repartidas uniformemente en el espacio disponible en el recinto receptor y fijadas de tal manera que se

cumpliesen las distancias límite entre posiciones de micrófono y las paredes que especifica la norma. Para el procedimiento específico de esquinas, se midió en cuatro esquinas, dos de ellas cerca del suelo y otras dos cerca del techo. La distancia a las tres superficies que formaban las esquinas fue fijada con el trípode entre 0,3 y 0,4 m, tal y como indica la norma. Durante la medida se llevaron a cabo mediciones del nivel de ruido de fondo (B_2) después de cada medida con la fuente encendida en el recinto receptor (L_2) tanto para las mediciones en el espacio del recinto como en las esquinas, con la finalidad de obtener mediciones del ruido de fondo altamente correladas con cada medición de L_2 .

El nivel de ruido exterior (L_1) se midió a 2 metros del centro de la fachada.

A partir de las mediciones se determinaron los índices espectrales $D_{1s,2m,nT}$ y de banda ancha $D_{1s,2m,nT,w}$ (C ; C_{tr}).

2.2. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de ventanas



Figura 2. Fotos de las salas receptora y emisora de las cámaras de transmisión horizontal

Las medidas se realizaron en las cámaras de transmisión horizontal del Laboratorio de Acústica y Vibraciones (Arquilav) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 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 según la norma UNE-EN ISO 10140 [9]. La abertura de ensayo tiene una profundidad de 500 mm, con nichos escalonados con un acabado reflectante. 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/m^3 . En el hueco se encuentra instalada una ventana abatible de doble hoja con perfil de cloruro de polivinilo (PVC) de $1,5 \text{ m}^2$, con persiana integrada y acristalamientos de dimensiones $103 \times 41,3 \text{ cm}$. Se realizaron mediciones utilizando tres tipos de acristalamiento, cuyos detalles se describen en la Tabla II.

Tabla II. Descripción de los tres tipos de acristalamiento usados para las mediciones en la cámara de transmisión horizontal.

Tipo de vidrio	Descripción
Monolítico 10 mm	Acristalamiento sencillo de 10 mm
4-12-8	Doble acristalamiento de vidrios sencillos asimétricos de 4 y 8 mm de espesor, con cámara de aire de 12 mm de espesor
4-6-4-6-4	Triple acristalamiento de vidrios sencillos de 4 mm de espesor, con cámaras de aire de 6 mm

El equipamiento empleado para las mediciones en laboratorio fue el siguiente:

- fuente sonora omnidireccional Brüel & Kjaer tipo 4196,
- fuente sonora direccional JBL EON 618S. Esta fuente funcionaba de manera simultánea a la omnidireccional, para una correcta excitación de las bajas frecuencias, de manera que se cumpliesen los requisitos relativos a la planicie espectral,
- jirafas giratorias de Brüel and Kjaer modelo 3923 para las mediciones con micrófonos en movimiento continuo en las salas receptora y emisora,
- sistema de adquisición de datos Pulse (versión 18), con la plantilla para mediciones de aislamiento acústico mediante jirafas,
- un analizador sonoro modelo 2270 de Brüel & Kjaer para las mediciones del nivel de presión sonora en esquinas.

Se midió el aislamiento acústico del elemento de fachada (la ventana) con los tres tipos de acristalamiento descritos en la Tabla 2 según los siguientes procedimientos:

- Medición del aislamiento a ruido aéreo según la norma UNE-EN ISO 10140-2 [10] entre 50 y 5000 Hz según el procedimiento de micrófono en movimiento continuo. El tiempo de reverberación en el recinto receptor se midió mediante el método de ruido interrumpido descrito en la UNE-EN ISO 3382-2 [8].
- Medición del aislamiento a ruido aéreo mediante la medición del nivel de presión sonora en las salas receptora (L_2) y emisora (L_1) y el tiempo de reverberación en las bandas de tercio de octava de 50, 63 y 80 Hz según el procedimiento para bajas frecuencias descrito en la norma ISO 16283-1 [1].

A partir de las mediciones se determinaron tanto el índice de reducción sonora R y como la magnitud global R_w (C ; C_{tr}).

2.3. Cálculos a baja frecuencia

Los niveles de presión sonora en las bandas de 50, 63 y 80 Hz en el recinto receptor (L_2) en las mediciones de las fachadas, y en los recintos emisor y receptor (L_1 y L_2) para las mediciones en laboratorio, se calcularon como se describe a continuación:

- 1) El método por defecto cuando el volumen del recinto está por encima de los 25 m³: promedio energético de los valores del nivel de presión sonora medidos en posiciones de micrófono individuales en la superficie del recinto o el valor promedio obtenido en el barrido continuo.
- 2) El método de cálculo de baja frecuencia según la expresión (1), siendo L_i el valor máximo del nivel de presión sonora medido en las esquinas (del recinto emisor (L_1) o receptor (L_2)) para cada una de las bandas de tercio de octava de baja frecuencia:

$$L_{iLF} = 10 \lg \left[\frac{10^{0,1L_{i,esquina}} + (2 \cdot 10^{0,1L_i})}{3} \right] \quad (1)$$

- 3) Según la expresión (1) escogiendo como valor para L_i el valor promediado energéticamente de los medidos en las cuatro esquinas para cada frecuencia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 3 (a) y 3 (b) representan los valores de $D_{is,2m,nT}$ medidos en bandas de tercio de octava entre 50 y 5000 Hz para las mediciones realizadas in situ en los recintos R1 y R2,

respetivamente. Las tres curvas en las bandas de 50, 63 y 80 Hz corresponden a 1) el aislamiento calculado a partir del método de medición por defecto, 2) el aislamiento calculado por el método de medición de baja frecuencia y el valor máximo de L_2 medido en esquinas y 3) el aislamiento calculado por el método de medición de baja frecuencia y el valor promedio de L_2 medido en esquinas.

Como se puede observar, el aislamiento obtenido en baja frecuencia depende tanto del método de medición como del método de cálculo. La estimación es menor cuando se mide según el método de baja frecuencia de la norma ISO 16283-3 [3]. Este resultado es el resultado esperado, si se tiene en cuenta que en la medida del aislamiento acústico de fachadas el método de medida del nivel de presión sonora en el exterior, L_1 , es el mismo para todos los métodos de medición y/o cálculo de baja frecuencia. De esta manera, cuanto mayor sea el valor de L_2 medido para la baja frecuencia menor será el aislamiento que se calcule. Es esperable que los valores de aislamiento calculados mediante los tres métodos sean comparables cuando el volumen del recinto sea tal que coincidan los niveles de presión sonora medidos en las esquinas con los resultados del promedio energético que indica el método por defecto.

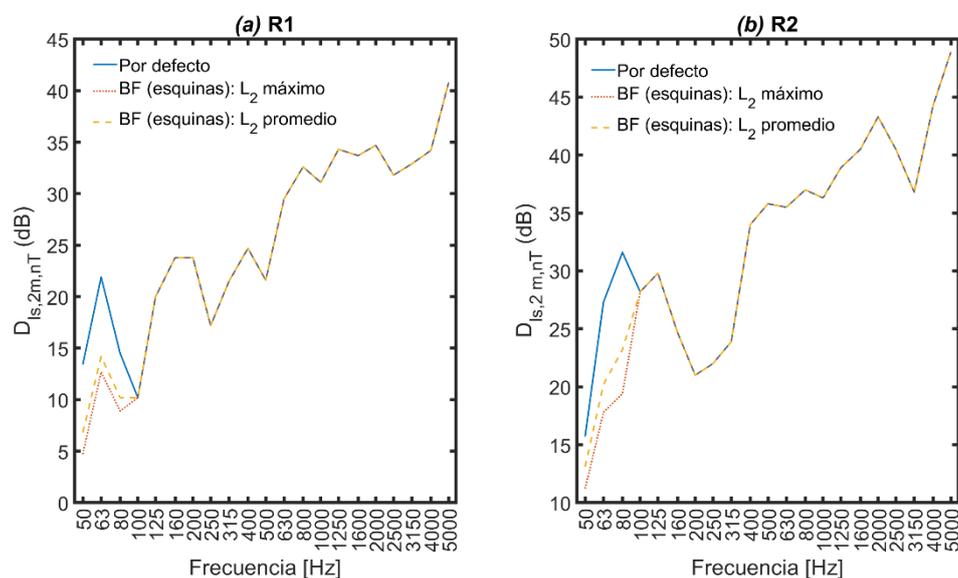


Figura 3. Curvas de aislamiento en función de la frecuencia para dos de los recintos medidos R1 (a) y R2 (b).

A modo de resumen, la Tabla III indica, para el recinto R2, los valores de L_2 usados en los cálculos del aislamiento en las bajas de tercio de octava de 50, 63 y 80 Hz mediante los diferentes métodos. Este resultado es equivalente para las cinco fachadas medidas, independientemente del tipo de construcción y el tipo de cerramiento del hueco. Este resultado se corresponde con el descrito por otros autores [7]. Para todos los recintos la frecuencia de Schroeder estaría por encima de los 250 Hz indicativo de la baja densidad modal y de la no difusividad del campo sonoro en los recintos medidos a tales frecuencias.

Tabla III. Valores de L_2 obtenidos por los diferentes métodos para la fachada del recinto R2.

Frecuencia (Hz)	L_2 por defecto (dB)	L_2 , esquina max (dB)	L_2 , esquina promedio (dB)
50	41,6	48,3	44,2
63	45,5	55,0	52,8
80	40,1	49,2	47,7

Asimismo, se han realizado mediciones llevadas a cabo en laboratorio, para complementar las mediciones in situ y asegurar que, bajo condiciones controladas, los resultados siguen la misma tendencia. En este sentido, la Figura 4 muestran los resultados de medición siguiendo tanto el método por defecto, como las dos variantes del método de esquinas ya descritas, para los tres

tipos de acristalamiento. De nuevo, independientemente del acristalamiento, el valor del aislamiento a baja frecuencia es menor si se utiliza el método por defecto que si se utiliza el método de baja frecuencia con esquinas para L_1 y L_2 , siendo el aislamiento que se calcula muy similar independientemente de si en esquinas se toma el nivel máximo o el promedio.

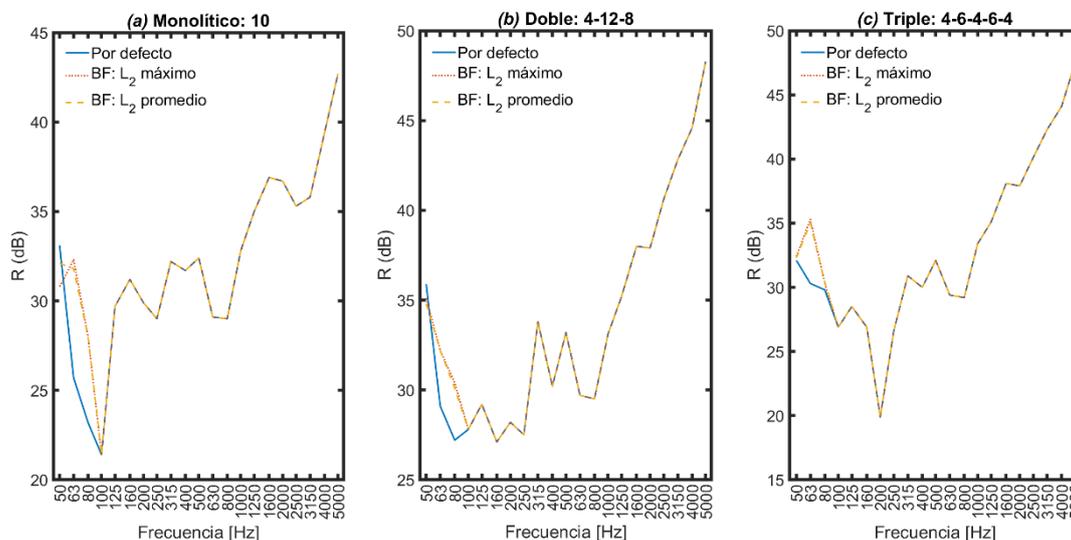


Figura 4. Índice de reducción sonora, R, en tercios de octava, entre 50 y 5000 Hz.

En el caso de aislamiento a ruido aéreo entre recintos la norma UNE-EN ISO 16283-1 indica que el método de baja frecuencia con medición en esquinas es el que debe seguirse obligatoriamente en el recinto receptor y/o recinto emisor si su volumen es inferior a 25 m^3 . La Figura 5 muestra, para el doble acristalamiento 4-12-8, los índices de reducción sonora calculados: (1) mediante el método por defecto, (2) considerando que la medición de L_1 se ha llevado a cabo por el método de esquinas y el L_2 por defecto, (3) su inversa (es decir, si la medición de L_1 se ha llevado a cabo por defecto y L_2 por el método de esquinas), y por último, (4) mediante el cálculo del aislamiento si la medición tanto de L_1 y L_2 se llevado a cabo por el método de esquinas. Como se puede observar, existen diferencias considerables en los resultados para los diferentes métodos. Teniendo en cuenta que el nivel de presión sonora que se mide en las esquinas es mayor que el que se mide si se utiliza en el método por defecto, el resultado indica que el aislamiento que se calcula es mayor si L_1 se mide por el método de esquinas y es menor si es L_2 el nivel de presión sonora el que es medido por el método de las esquinas.

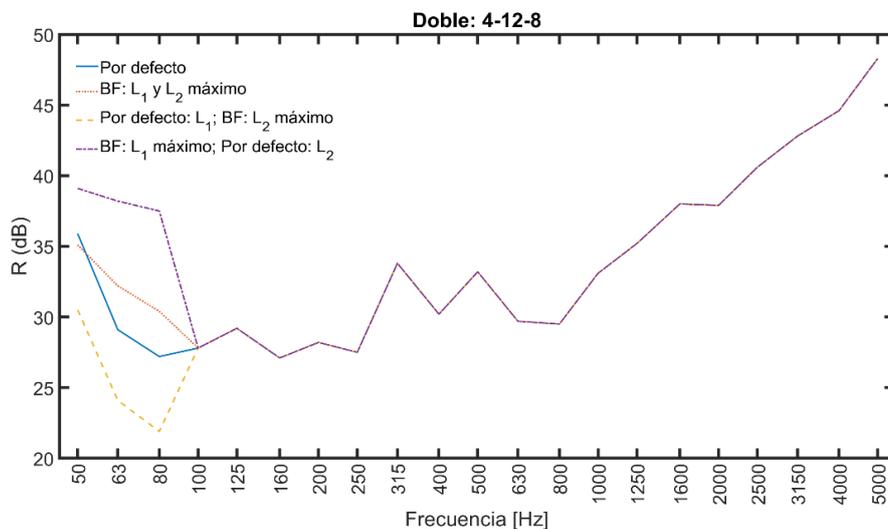


Figura 5. Diferentes métodos de cálculo para el vidrio de doble acristalamiento (4-12-8)

A la vista de estos resultados, parece también conveniente analizar cómo afecta a los valores de banda ancha y los términos de adaptación espectral la utilización, o no, del método de esquinas. En este sentido, se han calculado las siguientes magnitudes globales y términos de adaptación espectral para la medición por defecto y de baja frecuencia con el valor máximo medido en esquinas.

- Fachadas in situ: $D_{Is,2m,nT,w}$ (C; C_{tr} ; $C_{50-3150}$; $C_{tr50-3150}$)
- Ventana en laboratorio (cámaras de transmisión): R_w (C; C_{tr} ; $C_{50-3150}$; $C_{tr50-3150}$)

Tal y como se puede observar, para analizar el efecto de la inclusión de las bajas frecuencias en el cálculo de los indicadores de banda ancha, se ha utilizado el rango extendido de baja frecuencia (de 50 a 3150 Hz). Las Tablas IV y V muestran los valores de las magnitudes globales y los términos de adaptación espectral, para las mediciones in situ y en laboratorio, respectivamente.

Tabla IV. Valores de $D_{Is,2m,nT,w}$ (C; C_{tr} ; $C_{50-3150}$; $C_{tr50-3150}$) para los diferentes tipos de medición llevados a cabo en las fachadas.

$D_{Is,2m,nT,w}$ (C; C_{tr} ; $C_{50-3150}$; $C_{tr50-3150}$)		
	Por defecto	Método BF
R1	34(-6; -9; -6; -10)	34(-6; -9; -6; -10)
R2	36(-2; -5; -2; -6)	36(-2; -5; -2; -7)
R3	40(-2; -5; -2; -6)	40(-2; -5; -2; -7)
R4	42(-1; -2; -1; -2)	42(-1; -2; -1; -4)
R5	37(-2; -3; -2; -3)	37(-2; -3; -2; -3)

Los resultados de la Tabla IV indican que:

1. Los valores de los términos de adaptación espectral C y $C_{50-3150}$ son iguales en las cinco fachadas, independientemente de si se usa el método por defecto o el método de baja frecuencia con los valores máximos medidos en esquinas. Los cálculos con los valores promedio de L_2 coinciden con los que se obtienen con el valor máximo.
2. Para los términos de adaptación espectral C_{tr} y $C_{tr50-3150}$ el resultado no es tan claro. En un caso, (R5), no hay diferencia entre ambos términos para ninguno de los dos métodos de medición a baja frecuencia, para R4 no hay diferencia en los índices si el método de medida es el de por defecto y hay una diferencia de 2 dB si el método de medida es el método de baja frecuencia. Para el resto de casos, R1, R2 y R3, hay diferencias de 1 dB entre los índices C_{tr} y $C_{tr50-3150}$ para el método por defecto y de 1 o 2 dB si el método de medición es el de baja frecuencia.

Parece razonable que existan diferencias entre los índices de adaptación espectral C_{tr} y $C_{tr50-3150}$ y que el valor del término dependa del rango espectral en el que se extiende su cálculo teniendo en cuenta que son términos para fuentes de ruido que emiten principalmente en el rango de bajas frecuencias.

En el caso de las mediciones en las cámaras de transmisión, en la Tabla V se han incluido los cálculos para el método de medición por defecto, y del método de baja frecuencia (con valores máximos) aplicado a la medida de L_1 y L_2 , de sólo L_2 o de sólo L_1 . Únicamente se encuentran diferencias entre los términos de adaptación espectral en el caso del vidrio monolítico de 10 mm. Se calculan diferencias de 1 dB entre C_{tr} y $C_{tr50-3150}$ para todos los métodos de medición excepto en el caso en el que L_1 es medido por el método de baja frecuencia y L_2 por el método por defecto (cuarta columna) para el que los términos de adaptación espectral que se calculan son iguales para los dos rangos de frecuencia. De nuevo parece razonable que las diferencias se den en el índice de adaptación espectral específico para fuentes de ruido que emiten principalmente en el rango de bajas frecuencias. No obstante, conviene resaltar que la relevancia del efecto de la

inclusión de las bandas de baja frecuencia en el término de adaptación espectral viene también influenciada por los valores de aislamiento del elemento en bandas de tercio de octava y la contribución del aislamiento en cada banda al término $-10 \log \sum 10^{(L_{i,j}-X_i)/10}$, para el cálculo de los términos de adaptación espectral según la norma UNE-EN ISO 717-1 [11].

Tabla V. Valores de R_w (C ; C_{tr} ; $C_{50-3150}$; $C_{tr50-3150}$) para los diferentes tipos de medición llevados a cabo para los tres tipos de acristalamiento en las cámaras de transmisión horizontal.

$R_w(C; C_{tr}; C_{50-3150}; C_{tr50-3150})$	Por defecto	Método BF; L_2 y L_1	BF: L_2 ; L_1 por defecto	BF: L_1 ; L_2 por defecto
10 mm	34(-1; -2; -1; -3)	34(-1; -2; -1; -3)	34(-1; -2; -1; -3)	34(-1; -2; -1; -2)
4-12-8	35(-1; -3; -1; -3)	35(-1; -3; -1; -3)	35(-1; -3; -1; -3)	35(-1; -3; -1; -3)
4-6-4-6-4	34(-1; -4; -1; -4)	34(-1; -4; -1; -4)	34(-1; -4; -1; -4)	34(-1; -4; -1; -4)

4. CONCLUSIONES

Se han mostrado las implicaciones de usar el procedimiento específico de bajas frecuencias en la medición del aislamiento acústico in situ de fachadas y el aislamiento a ruido aéreo entre recintos aprovechando medidas llevadas a cabo en laboratorio para distintos tipos de acristalamiento en recintos de volumen mayor que 25 m³. En los resultados del espectro de aislamiento en bandas de un tercio de octava, se encontró que el procedimiento de baja frecuencia reduce, para todos los casos estudiados, los valores del aislamiento acústico en el caso de las mediciones en fachada. En las mediciones en laboratorio los valores de aislamiento acústico con el método de esquinas se encuentran por encima o por debajo del medido con el método por defecto, dependiendo de si en la medición de bajas frecuencias se incluyen sólo L_1 , sólo L_2 o ambos.

Con respecto a las magnitudes globales, los dos métodos, por defecto y de baja frecuencia, divergen entre 1 y 2 dB en algún caso. Estas divergencias dependen del tipo de medición y son más evidentes para el término de adaptación espectral C_{tr} . Los resultados parecen indicar que el procedimiento de baja frecuencia tiene más efecto en las mediciones de fachada. No obstante, este efecto dependerá del aislamiento que se mide a baja frecuencia y cómo se compara con el aislamiento que se mide para ese elemento en otras bandas de octava. El valor del aislamiento que se mide en cada banda de tercio de octava contribuye al cálculo del término de adaptación en el sumatorio $-10 \log \sum 10^{(L_{i,j}-X_i)/10}$. De esta manera, la contribución de la baja frecuencia depende también de cómo se comparen entre sí los valores de aislamiento que se miden a esta frecuencia con los que se miden en otras bandas. Para el mismo aislamiento medido a baja frecuencia, su efecto en el término de adaptación espectral será menor cuanto mayor sea el aislamiento en el resto de las bandas.

La conveniencia de considerar estas bandas de frecuencia a la hora de caracterizar el aislamiento acústico, así como las particularidades de su medición, deberían ser el foco de los grupos de trabajo e investigación del aislamiento acústico en edificios, puesto que podrían requerirse en poco tiempo en las normativas de edificación. Asimismo, se deberían realizar ejercicios de intercomparación para establecer la incertidumbre en las mediciones de baja frecuencia y observar las dificultades logísticas y posibles casuísticas de la inclusión de las bajas frecuencias. Aunque dependiendo del tipo de aislamiento acústico podría ser conveniente la incorporación de las bandas de tercio de octava de baja frecuencia en la determinación de los índices globales, parece necesario, en primer lugar, determinar de una manera clara cuál es el mejor método de medición por debajo de 100 Hz en recintos con volúmenes reducidos, pero con volúmenes tanto por encima como por debajo de 25 m³.

Adicionalmente a la caracterización objetiva del aislamiento acústico a baja frecuencia, parece imprescindible evaluar cómo se correlacionan las magnitudes globales que incluyen las bajas frecuencias en su cálculo con la percepción subjetiva de las personas. Sin embargo, para poder llevar a cabo estas evaluaciones correctamente, es muy importante conocer qué cálculo del aislamiento acústico de baja frecuencia es el más apropiado. Las divergencias objetivas observadas en esta investigación, con respecto a los espectros de aislamiento obtenidos por los

diferentes métodos de cálculo tienen un impacto directo sobre el diseño de los listening tests, que son los utilizados para evaluar la correlación entre la sonoridad y la molestia y los índices globales que incluyen el rango de la baja frecuencia en su cálculo.

Por otro lado, conocer el aislamiento acústico correcto de la fachada o de los sistemas constructivos es fundamental en el diseño de los edificios. Existe una tendencia en la construcción de edificios a sistemas de construcción livianos, que brindan la posibilidad de prefabricación, que se clasifican como más rentables y sostenibles que la construcción tradicional. Estos, en algunas ocasiones, se comportan peor a bajas frecuencias debido a su menor masa, así como a las resonancias que presentan en el caso de elementos de múltiples hojas.

Estos resultados indican que conviene revisar si es recomendable o no llevar a cabo las mediciones según el procedimiento de baja frecuencia para volúmenes por encima de 25 m³. Se necesitan más medidas para confirmar los resultados presentados en este trabajo. Por otro lado, es interesante comprobar estos resultados en mediciones in situ del aislamiento a ruido aéreo entre recintos y de ruido de impacto.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 16283-1. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústicos en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.
- [2] UNE-EN ISO 16283-2. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústicos en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos.
- [3] UNE-EN ISO 16283-3. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústicos en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada.
- [4] Simmons C.; Measurement of sound pressure levels at low frequencies in rooms. Comparison of available methods and standards with respect to microphone positions. Proposal for new procedures, *Nordtest Project No. 1347-97. SP Report 1997:27*.
- [5] Hopkins C., and Turner P.; Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. *Applied Acoustics* 66, 2005, 1339–1382.
- [6] 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, 703-712.
- [7] Scrosati C, Scamoni F, Prato A, Secchi S, Fausti P, Astolfi A, Barbaresi L, D'Alessandro F, Di Bella A, Schenone C, Zambon G; Uncertainty of façade sound insulation by a Round Robin Test. Evaluations of low-frequency procedure and single numbers, *Building and Environment* 105, 2016, 253 – 266.
- [8] UNE-EN ISO 3382-2. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de recintos ordinarios.
- [9] UNE-EN ISO 10140-1: 2016. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos.
- [10] UNE-EN ISO 10140-2: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.
- [11] UNE-EN ISO 717-1: 2021. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.