

Caracterización de vidrios para la evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo

J. ALBA FERNÁNDEZ¹; R. DEL REY TORMOS¹, J. RAMIS SORIANO²; L. BERTÓ CARBÓ

¹Instituto para la Gestión Integral de las Zonas Costeras IGIC. Departamento de Física Aplicada; Escuela Politécnica Superior de Gandía; Universitat Politècnica de València C/ Parainfo nº1, Grao de Gandia 46730 (Valencia) España

²Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante

La principal aportación del trabajo es la formulación de una alternativa que facilita la determinación experimental del factor de pérdidas y, en consecuencia, mejorar las predicciones de aislamiento a ruido aéreo para vidrios con una o más capas intermedias sea cual fuere su naturaleza. Además, se realiza una revisión de las normativas relacionadas con los ensayos de los parámetros mecánicos necesarios para la caracterizar los vidrios, centrándonos en los monolíticos y los laminados.

En efecto, uno de los problemas que se plantea en el contexto de la acústica de la edificación actualmente es el de cumplir con los requisitos de aislamiento acústico a ruido aéreo en fachada que exige el vigente Código Técnico de la Edificación (CTE). Como sabemos, en la fachada podemos distinguir la parte ciega y la parte hueca. La parte más débil en lo concerniente a aislamiento a ruido aéreo es la hueca (compuesta por el vidrio, carpintería y otros elementos). Si la carpintería es la adecuada, la superficie de vidrio se convierte en el elemento limitante. El Catálogo de Elementos Constructivos (CEC) del CTE, la propia norma UNE-EN 12758:2011, así como algunos, cada vez más, fabricantes ofrecen datos del aislamiento de vidrios simples, vidrios laminados y vidrios dobles. En el caso de vidrios laminados, estos datos se limitan únicamente en los que tienen una sola lámina intermedia y, además, no acústicos. Podemos hablar, por tanto, de una laguna de información en este sentido. Para obtener predicciones fiables de aislamiento acústico a ruido aéreo de particiones multicapa, como pueden ser los vidrios laminados es necesario disponer de las características mecánicas y una de las más relevantes es el factor de pérdidas.

Palabras clave: Vidrios laminados, Ensayos no destructivos, Propiedades mecánicas, Aislamiento a ruido aéreo.

Glass characterization to assess the airborne sound isolation

The main contribution of this paper is the formulation of an alternative to experimental determination of loss factor and, consequently, to improve the predictions of airborne sound insulation for any type of monolithic or laminated glass. In addition, a review of the standards related to measurement of mechanical parameters of glass is carried out, with particular interest in laminated glass

Indeed, one of the problems that arise in the current context of building acoustics is to meet the requirements of facades airborne sound insulation of existing Building Technical Code (BTC). It is known that the blind and the hollow part of the facade should be distinguished. The weakest part regarding to airborne sound insulation is the empty one (consisting of glass, woodwork and other elements). Choosing an adequate woodwork makes the glass surface become the limiting factor.

The Constructive Elements Catalog (CEC) of the BTC, the UNE-EN 12758:2011 standard, as well as some, increasingly, data vendors provide information about airborne sound insulation for monolithic glass, laminated glass and double glazing. In the case of laminated glass, these data are limited only to those with a single intermediate layer, and also non-acoustic. Can therefore be said that there is a gap of knowledge in this regard. To obtain reliable predictions of airborne sound insulation of multilayer partitions, such as laminated glass, mechanical characteristics must be known, being loss factor one of the most important.

Keywords: Laminated glass, non-destructive testing, mechanical properties, Airborne sound insulation

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente se ha aprobado en España el Real Decreto 314/2006 que aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) [1] como aplicación de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE) [2]. Este hecho ha motivado una profunda revisión de los materiales necesarios para poder cumplir con los objetivos de calidad que se plantean en los diferentes documentos básicos relativos a la seguridad del edificio y a su habitabilidad [3], que en muchos casos han aumentado notablemente respecto a los de las anteriores normativas.

Uno de los problemas más importantes y de difícil solución en la edificación es la resolución de las fachadas cumpliendo con los criterios de los diferentes documentos básicos [1]. Este problema se centra en muchos casos en el tratamiento del vidrio que forma parte importante de la fachada. Las nuevas exigencias descritas en estos documentos básicos han dado lugar a diferentes estudios. Existen trabajos donde se trata el problema de seguridad de utilización de los vidrios [4], propuestas de nueva normativa para el cálculo de elementos de vidrio [5] o la obtención teórica del aislamiento acústico de los vidrios [6].

Desde el punto de vista acústico, el Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) [7][8] trata las necesidades de la fachada. El diseño actual de la fachada parte de los datos de ruido del exterior, tal y como se indica en la Ley 37/2003 del Ruido [9]. Según la citada ley, combinada con el DB-HR, debe obtenerse un mayor aislamiento acústico en la fachada cuanto mayor sea el ruido del exterior.

Es sabido que la problemática acústica de la fachada pasa fundamentalmente por el aislamiento acústico del vidrio que se utilice, junto con la perfilera y sus elementos de montaje. Suponiendo adecuados estos elementos, el vidrio es el material limitante. Esto se puede observar en el Catálogo de Elementos Constructivos (CEC) [3] del CTE, donde es difícil conseguir vidrios laminados con aislamientos acústicos medidos en laboratorio por encima de los 32 dBA. Estos datos de ensayo también se pueden encontrar con mayor grado de detalle en la norma UNE-EN 12758:2011 [10], actualizada recientemente, que deben leerse junto con la norma UNE-EN 572-1:2005 [11]. En este sentido, conseguir que un vidrio laminado aumente su aislamiento en 1 o 2 dBA es un gran logro y esta mejora favorecerá o repercutirá prácticamente de manera directa en el aislamiento acústico global de la fachada. Además, hay que destacar que en la norma UNE-EN 12758:2011 no se contemplan vidrios con intercalarios acústicos o con intercalarios de mayor espesor que el convencional, que serían de interés al poder ofrecer aislamientos acústicos más elevados.

Los vidrios laminados siguen estando en estudio porque pueden ofrecer soluciones a las exigencias de los diferentes documentos básicos, dado que las soluciones actuales pueden ser mejorables, como lo demuestran los vidrios laminados con intercalarios acústicos. Esto ha dado lugar a estudios sobre sus propiedades ópticas [12] que permiten obtener parámetros de detalle, como el de su factor de pérdidas [13], detalles de los polímeros que componen los vidrios laminados [14] o los módulos elásticos de éstos [15][16][17]. En estos trabajos se puede observar la gran influencia que tiene el factor de pérdidas de la capa intermedia en los vidrios laminados, de cara a poder mejorar en su aislamiento acústico. Como es sabido, en cualquier sistema mecánico, cuanto menor es el menor factor de pérdidas se tiene una menor tasa de

pérdida de energía en relación con la energía almacenada en el oscilador y las oscilaciones se extingan más lentamente.

Este trabajo se desarrolla en el contexto de una investigación para la mejora del aislamiento acústico de vidrios laminados abordando diferentes cuestiones. En primer se propone una mejora del método para obtener el factor de pérdidas de vidrios laminados, cuyo valor es relativamente grande comparado con otros intercalarios. Para ello se estudian y valoran diferentes normas de ensayo [18][19][20]. En segundo lugar, una vez corregidas las desviaciones en la medida del factor de pérdidas, se valora el aislamiento acústico del vidrio. Esta secuencia permite abordar la mejora del aislamiento acústico de vidrios laminados. Por último, se comprueba la correlación entre resultados tabulados con datos aceptados [3][10].

2. NORMAS DE ENSAYO

La caracterización de vidrios monolíticos y laminados se puede llevar a cabo según diferentes procedimientos de distintas normativas. A nivel europeo se encuentra la norma ISO 16940:2008 [18] en la que se describe el equipo, el dispositivo experimental y el proceso para obtener la impedancia mecánica del vidrio laminado, así el factor de pérdidas y el módulo de rigidez a flexión equivalente. Esta norma es la más utilizada [17]. También se detalla una expresión para el cálculo de las pérdidas por transmisión sonora, R (o índice de reducción sonora según el CTE [3]).

El proceso simplificado es el siguiente. La muestra se fija por sus extremos y es excitada mediante un shaker, al que se ha instalado un sensor de fuerza en el centro de la barra cuyas dimensiones aconsejadas son $(25 \pm 2) \times (300 \pm 1)$ mm y 4 mm de espesor. La señal de excitación es ruido blanco desde 0 a 5000 Hz. Mediante un sensor, generalmente un acelerómetro de peso despreciable se registra el nivel de vibración. A partir de la señal del sensor de fuerza y el acelerómetro se obtiene, la función de transferencia aceleración/fuerza (a/F) o bien, con el procesado necesario la velocidad/fuerza (v/F). El ensayo se realiza a 20 ± 1 °C y se debe esperar una hora para que la muestra alcance una estabilidad térmica.

La representación gráfica de la función de transferencia en función de la frecuencia presentará máximos a las frecuencias para las cuales el sistema mecánico presenta frecuencias de resonancia, tal como se muestra en la figura 1.

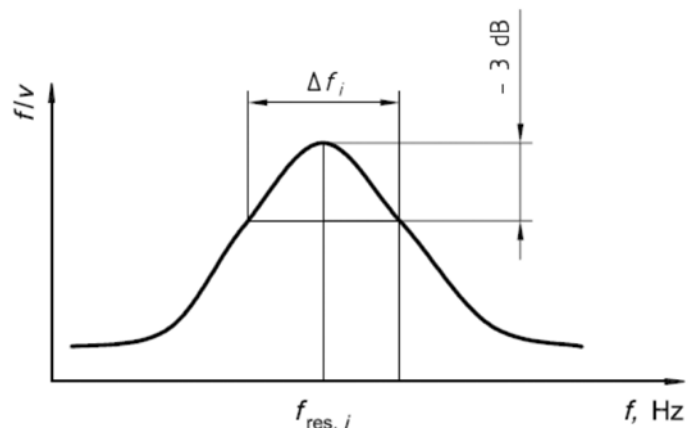


Figura 1: Ejemplo gráfico del cálculo del factor de pérdidas.

A partir de la información suministrada por esta gráfica es posible determinar el llamado factor de calidad, Q , y su inverso, el factor de pérdidas, η , para cada una de las frecuencias.

$$\eta_i = \frac{\Delta f_i}{f_{res,i}}$$

$$Q_i = \frac{1}{\eta_i} \tag{1}$$

donde $f_{res,i}$ es la frecuencia de resonancia i -ésima, η_i es el factor de pérdidas a la frecuencia de resonancia i y Δf_i (Hz) es la diferencia entre frecuencias para las cuales el nivel cae 3dB respecto al nivel correspondiente al máximo. Para determinar el factor de pérdidas se han de considerar los tres primeros modos. En el anexo B de la normativa se cita la ecuación para calcular el módulo de la rigidez a flexión equivalente:

$$B_{eq,i} = m_s \left(f_{res,i} \frac{2\pi L^2}{\lambda_i^2} \right)^2 \tag{2}$$

donde m_s (kg/m^2) es la densidad superficial de la muestra, L (m) es la mitad de la longitud de la muestra y λ_i es un parámetro adimensional dado por condiciones de frontera y cuyo valor es 1,87510 para $i=1$; 4,69410 para $i=2$; 7,85476 para $i=3$ y 10,99554 para $i=4$.

Por último, en su anexo C, la norma proporciona la ecuación para el cálculo de las pérdidas por transmisión sonora, R , aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\tau(\theta) = \left\{ \left[1 + \eta \left(\frac{\omega \rho_s}{2\rho c} \cos \theta \right) \left(\frac{\omega^2 B}{c^4 \rho_s} \sin^4 \theta \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\omega \rho_s}{2\rho c} \cos \theta \right) \left(1 - \frac{\omega^2 B}{c^4 \rho_s} \sin^4 \theta \right) \right]^2 \right\}^{-1} \tag{3}$$

$$\tau = \frac{\lim_{\theta \rightarrow 0} \int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\lim_{\theta \rightarrow 0} \int_0^{\theta_{lim}} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}, \quad \theta_{lim} = 75^\circ \tag{4}$$

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \tag{5}$$

donde η es el factor de pérdidas de la muestra, ρ_s (kg/m^2) es la densidad superficial de la muestra, ρ (kg/m^3) es la densidad del aire, c (m/s) es la velocidad de propagación del sonido en el aire, θ es el ángulo de incidencia, B (Nm) es la rigidez a flexión por unidad de longitud y $\omega = 2\pi f$ es la pulsación. La expresión (5) ofrece un índice de reducción sonora por frecuencia. Aplicando la norma UNE-EN ISO 717-1:1997 [21] se puede obtener el índice global R_w y los términos de adaptación C y C_{tr} que aparecen en ella.

Por otro lado. la norma americana ASTM/C 623-92 [19] establece un método dinámico para la determinación del módulo de Young, módulo de cizalladura y el coeficiente de Poisson. A partir de datos geométricos, la densidad y las frecuencias de resonancia de una muestra se obtienen las propiedades elásticas del material.

El módulo de Young se determina a partir de las frecuencias resonantes en el modo de vibración a flexión. En el caso de muestras de barras de sección rectangular, el cálculo se realiza aplicando la siguiente expresión para el modo fundamental:

$$E = 96,517 \cdot \left(\frac{L^3}{b \cdot t^3} \right) \cdot T_1 \cdot w \cdot f^2 \cdot 10^{-8} \tag{6}$$

donde E (kgf/cm^2) es el módulo de Young, L (cm) la longitud de la barra, b (cm) el ancho de la barra, t (cm) el espesor de la barra, w (g) el peso de barra, f (Hz) la frecuencia de resonancia de la barra y T_1 es la corrección para el modo de flexión tabulado en la norma. En la norma se pueden encontrar expresiones adicionales para el cálculo del primer armónico, dependiente de otro coeficiente de corrección tabulado en la norma T_2 , y del módulo de cizalladura G (kgf/cm^2) que también depende de diferentes relaciones geométricas y de una gráfica recogida en la propia normativa. En este caso no se indica ninguna formulación para obtener las pérdidas por transmisión sonora, R .

Como puede observarse, la norma americana ASTM/C 623-92 [19] no describe el proceso para determinar el factor de pérdidas. Para ello puede utilizarse la norma americana ASTM/E 756-98 [20] que permite determinar parámetros mecánicos de vidrios simples y laminados y su factor de pérdidas, siempre en un rango de temperatura útil del material y en el rango frecuencial de 50 a 5000 Hz. Para los materiales con material amortiguante en el interior, como es el caso de los vidrios laminados, se debe evaluar la frecuencia de resonancia y el rango de temperaturas de interés del material base (vidrio monolítico) y posteriormente se realiza lo mismo con el compuesto con lámina amortiguante intercalada (vidrio laminado). Para obtener el factor de pérdidas se hace uso de la expresión (1), pero también la norma también proporciona la opción de utilizar caídas entre 0,5 y 3 dB utilizando la expresión:

$$\eta = \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 - 1}} \right) \cdot \frac{\Delta f}{f} \tag{7}$$

donde $x = 10^{n/20}$ y n (dB) es valor en decibelios elegido por el usuario. Al igual que la ASTM/C 623-92, esta norma no indica cómo obtener las pérdidas por transmisión sonora, R .

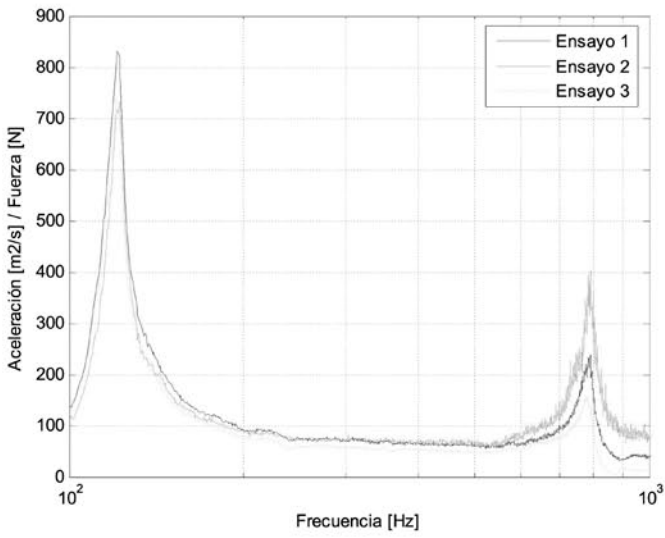
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Caracterización según normativa.

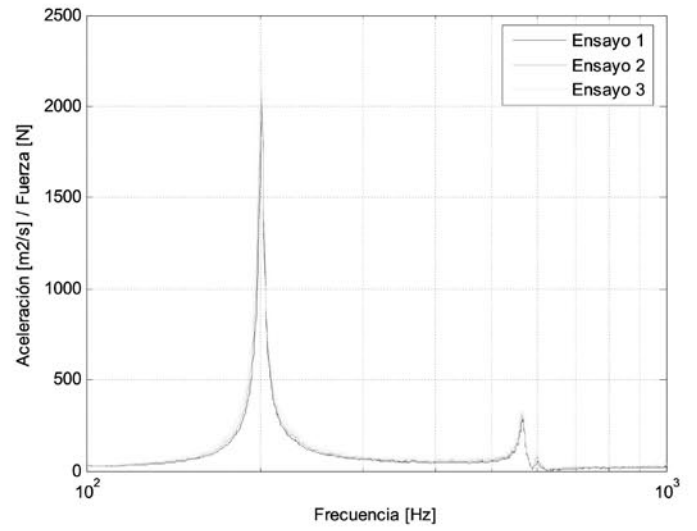
Para la caracterización se han elegido diferentes muestras de vidrios simples de 6 mm de espesor y diferentes anchos, y vidrios laminados 33.2 y 44.2 con intercalarios de PVB no acústicos y acústicos. En la tabla 1 se resumen los datos geométricos.

La densidad del vidrio simples y del intercalario de PVB son, respectivamente, de 2450 kg/m^3 y 1200 kg/m^3 , respectivamente.

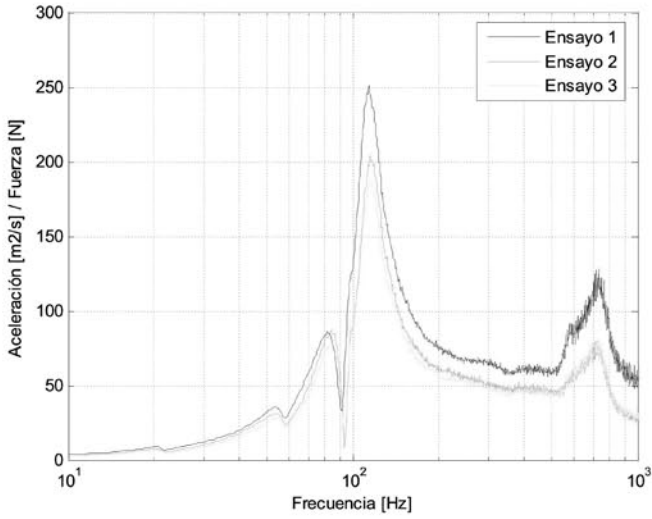
El ensayo se realiza según ASTM/E 756-98. Se utiliza un martillo de impacto como fuente excitadora. En la figura 2 se muestran las diferentes funciones de transferencia obtenidas, tomando tres probetas de cada tipo.



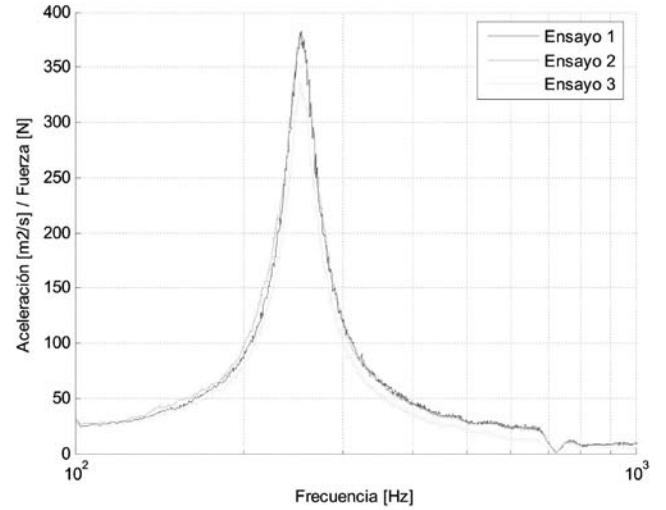
Muestra 1



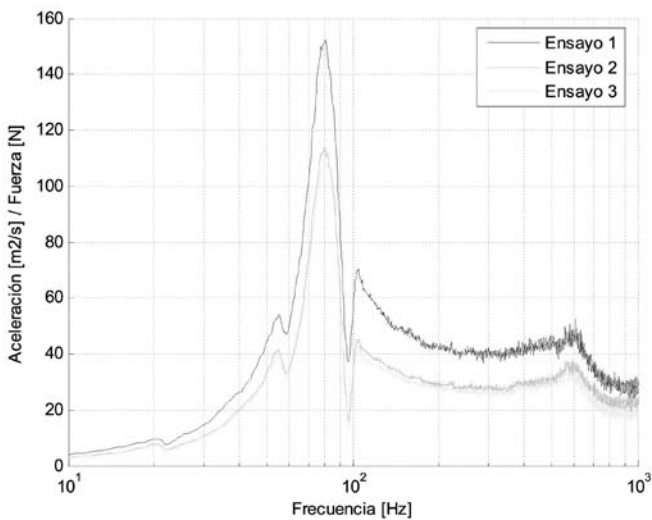
Muestra 2



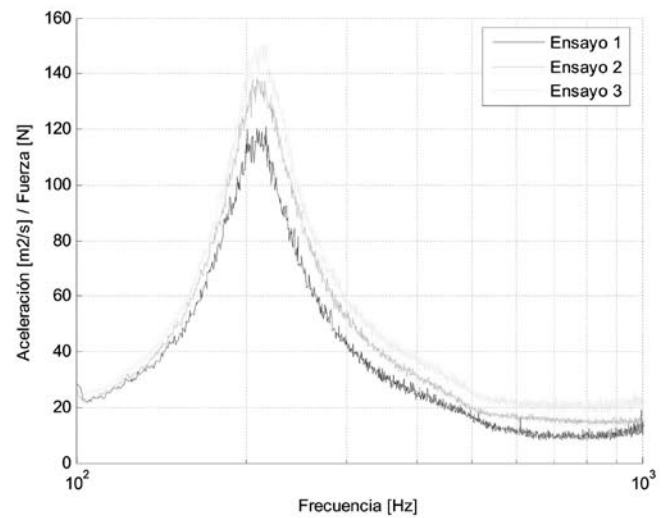
Muestra 3



Muestra 4



Muestra 5



Muestra 6

Figura 2. Funciones de transferencia de las muestras.

TABLA 1: MUESTRAS CARACTERIZADAS.

Nº	Tipo	Longitud Monolítico (m)	Espesor Monolítico (m)	Anchura Monolítico (m)	Espesor PVB (m)	Tipo PVB
1	Simple 6 mm	0.18	0.006	0.02	---	---
2	Simple 6 mm	0.38	0.006	0.02	---	---
3	Laminado 33.2	0.18	0.003	0.02	0.00076	Normal
4	Laminado 44.2	0.38	0.004	0.02	0.00076	Normal
5	Laminado 33.2 acústico	0.18	0.003	0.02	0.00076	Acústico
6	Laminado 44.2 acústico.	0.38	0.004	0.02	0.00076	Acústico

En la muestras 3 y 5 se observan altibajos, que pueden deberse al rebote del martillo.

Estas funciones de transferencia se utilizan para obtener el factor de pérdidas según (1) y (7).

En la tabla 2 se muestran los promedios obtenidos para las seis muestras, utilizando tres probetas en cada caso.

Puede observarse en la tabla 2, como los datos son prácticamente coincidentes en el caso de vidrios simples y vidrios laminados con PVB no acústico, existiendo mayor diferencia en el caso de vidrios laminados con PVB acústico. Los datos del factor de pérdidas también aumentan al pasar de la muestra 1 (vidrio simple) a la muestra 6 (vidrio laminar con PVB acústico).

3.2. Discusión del método

En el apartado anterior puede verse la dispersión existente en el caso de vidrios laminados, sobre todo con PVB acústico. Además, según se observa en la figura 2, la elección de la caída del primer decibelio es más complicada en estos casos. Como se verá más adelante, estos resultados afectan al resultado del aislamiento acústico. En la tabla 3 se resumen los resultados de desviaciones de todos los factores de pérdidas calculados en $n = 1, 2$ y 3 dB, teniendo en cuenta todas las probetas. Estas desviaciones son bajas en el caso de vidrios simples y laminares con PVB no acústico. Sin embargo, aumentan en los laminares con PVB acústico. Esto puede ser debido a la mayor

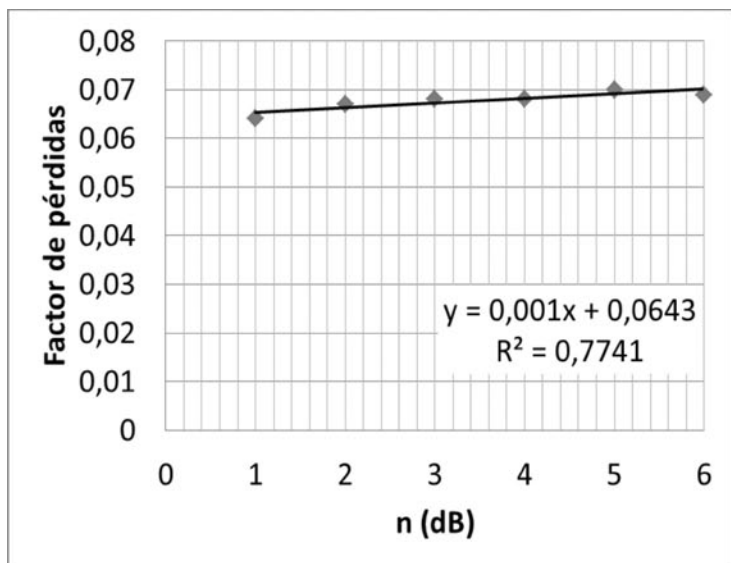
amortiguación que se produce en este tipo de vidrios. Además el factor de pérdidas tiende a crecer al aumentar el valor de n en todos los casos. Esto es debido a que aumenta la influencia de otras resonancias de manera más considerable, conforme se amplía el ancho de banda de medida.

TABLA 3: DIFERENCIAS EN LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE PÉRDIDAS SEGÚN EL MÉTODO DE ENSAYO EMPLEADO.

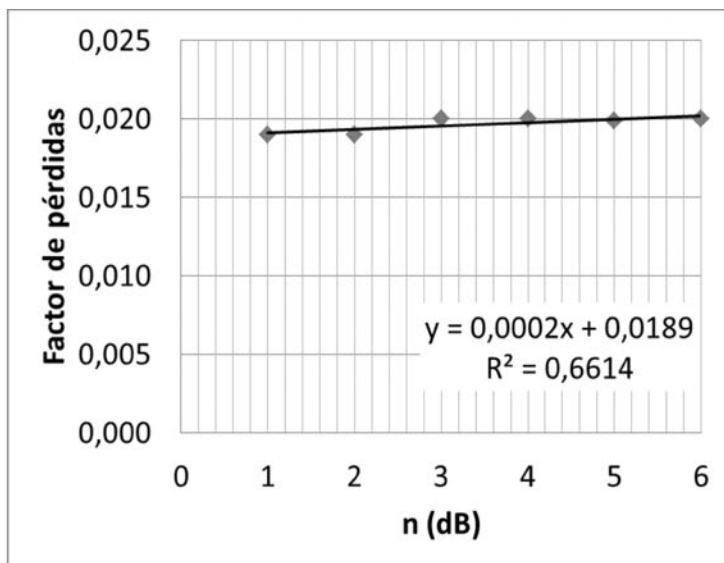
TIPO DE VIDRIO	MUESTRA	DIFERENCIA MÁXIMA
MONOLÍTICOS	1	0,003
	2	0,002
LAMINADO PVB NORMAL	3	0,004
	4	0,011
LAMINADO PVB ACÚSTICO	5	0,013
	6	0,071

TABLA 2: PROMEDIO DE FACTORES DE PÉRDIDAS DE TODAS LAS MUESTRAS PARA DIFERENTES CAÍDAS n (dB)

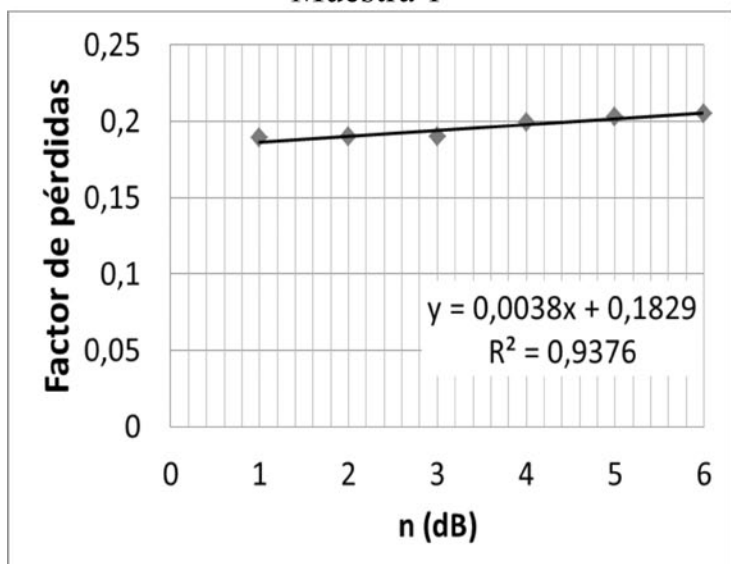
n dB	Factor de pérdidas muestra 1	Factor de pérdidas muestra 2	Factor de pérdidas muestra 3	Factor de pérdidas muestra 4	Factor de pérdidas muestra 5	Factor de pérdidas muestra 6
1,00	0,064	0,019	0,189	0,107	0,208	0,197
2,00	0,067	0,019	0,190	0,111	0,220	0,241
3,00	0,068	0,020	0,190	0,113	0,221	0,268



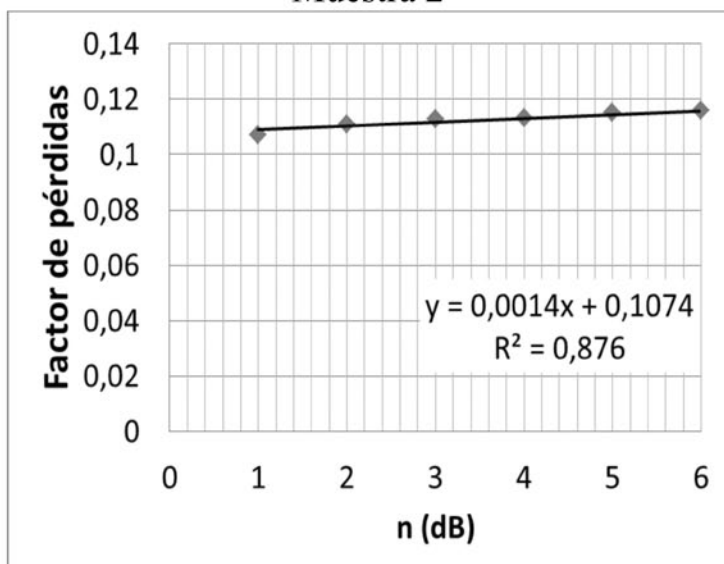
Muestra 1



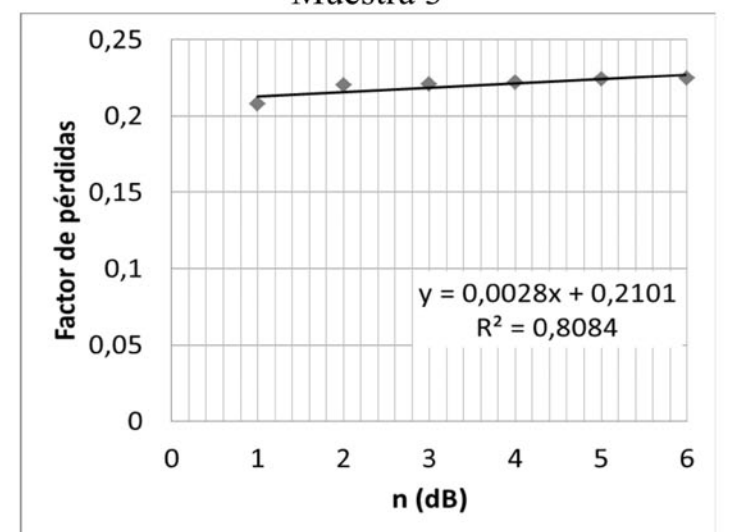
Muestra 2



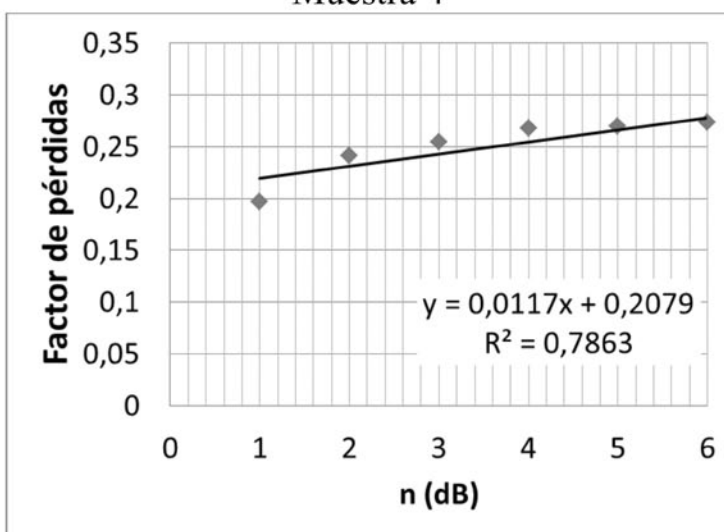
Muestra 3



Muestra 4



Muestra 5



Muestra 6

Figura 3. Factores de pérdidas en función de n dB.

TABLA 4. FACTOR DE PÉRDIDAS MEDIO CON RANGO n dB AMPLIADO A 6 dB.

n dB	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
1	0,064	0,019	0,189	0,107	0,208	0,197
2	0,067	0,019	0,190	0,111	0,220	0,241
3	0,068	0,020	0,190	0,113	0,221	0,255
4	0,068	0,020	0,199	0,113	0,222	0,268
5	0,070	0,020	0,203	0,115	0,224	0,269
6	0,069	0,020	0,205	0,116	0,225	0,273

Se plantea en este punto ampliar el cálculo especificado en el método n dB a valores superiores a 3 dB y obtener de nuevo el factor de pérdidas según la expresión (7). En la tabla 4 se resumen los nuevos datos obtenidos ampliando hasta 6 dB de caída. En la figura 3 se muestra en forma de gráfica y se adjunta el ajuste lineal y el coeficiente de correlación. Dado que conforme se aumenta la n, mayor es el error cometido por el efecto de modos adyacentes, si en las rectas calculadas se extrapola la tendencia a n igual a cero, el valor del factor de pérdidas no debería tener influencia de otros modos. Esto se puede observar en la figura que utiliza la norma ISO 16940:2008 en su anexo D, donde se puede apreciar la influencia de modos adyacentes. Por tanto, la ordenada en el origen del factor de pérdidas en estas condiciones nos daría el factor de pérdidas sin influencia de esos modos. En la tabla 5 se resumen estos valores de factor de pérdidas.

En el caso concreto de la muestra 6 (figura 3), de la observación de los datos podría desprenderse que la

extrapolación para n tendiendo a cero no está justificada, pudiendo atribuir las diferencias con el resto de muestras bien a la natural dispersión de resultados o bien a la constatación a la constatación de no-linealidad en la posible función. Sin embargo se ha decidido realizarla igualmente, sin olvidar que el fenómeno presenta una no linealidad intrínseca que se hará más patente para mayores desplazamientos (golpes más fuertes con el martillo).

4. PREDICCIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

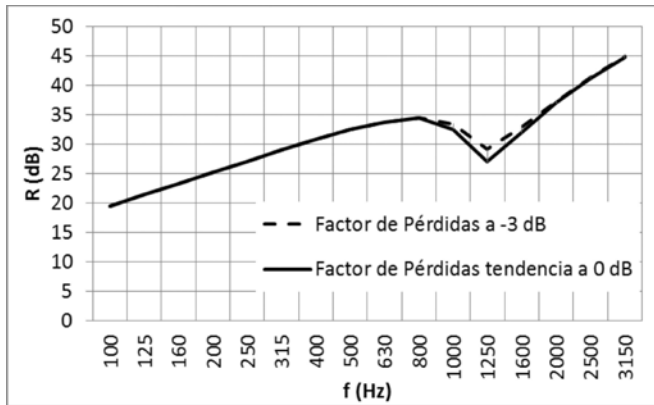
Para la predicción del aislamiento acústico a ruido se sigue la norma ISO 16940:2008 [18], en concreto las expresiones (3) a (5). Para ello se han obtenido los valores de la rigidez a flexión B mediante las normas citadas en el apartado 2. El resto de parámetros son sencillos de determinar. En la tabla

TABLA 5. FACTOR DE PÉRDIDAS PARA N TENDIENDO A 0 dB

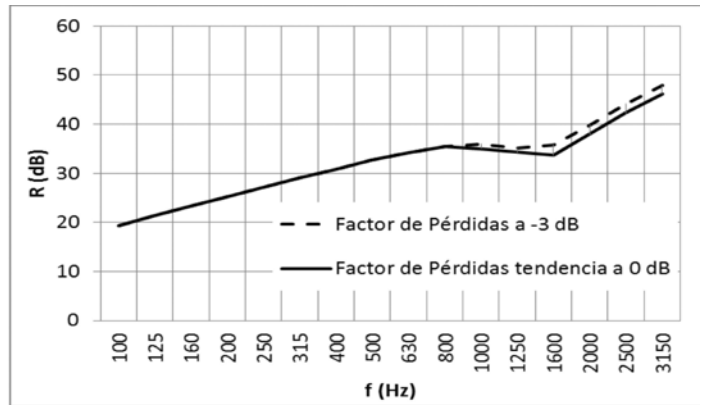
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Factor de pérdidas	0,064	0,019	0,183	0,107	0,210	0,208

TABLA 6. RESUMEN DE DATOS MECÁNICOS

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
ρ_s (kg/m ³)	14,7	14,7	15,612	20,512	15,61	20,51
B (N.m)	44,97	2467,55	42,95	5451,59	21,04	3923,13



Muestra 4



Muestra 6

Figura 4. Efecto del factor de pérdidas en R en las muestras 4 y 6

TABLA 7. RESUMEN DE DATOS DE AISLAMIENTO GLOBAL.

	Índice de evaluación	UNE-EN 12758:2011	Factor de pérdidas a -3 dB	Factor de pérdidas propuesto
Muestra 1	Rw (dB)	31	31	31
	Rw + Ctr (dBA)	28	29	29
	RA (dBA)	29	29	29
Muestra 2	Rw (dB)	31	31	31
	Rw + Ctr (dBA)	28	28	28
	RA (dBA)	29	29	29
Muestra 3	Rw (dB)	32	33	33
	Rw + Ctr (dBA)	29	30	30
	RA (dBA)	31	32	32
Muestra 4	Rw (dB)	33	34	34
	Rw + Ctr (dBA)	30	30	30
	RA (dBA)	32	32	32
Muestra 5	Rw (dB)	32	34	34
	Rw + Ctr (dBA)	29	32	31
	RA (dBA)	31	33	33
Muestra 6	Rw (dB)	33	36	35
	Rw + Ctr (dBA)	30	33	32
	RA (dBA)	32	35	34

6 se resumen. La densidad del aire se toma como $1,21 \text{ kg/m}^3$ y la velocidad de propagación del sonido en el aire de $346,6 \text{ m/s}$. Se obtienen resultados en bandas de tercio de octava desde 100Hz a 3150Hz como resultados globales $R_{w, R_w + C_{TR}}$, obtenidos según UNE-EN ISO 717-1:1999 [21], y R_A , obtenido según DB-HR del CTE [7]. Además se comparan con los resultados tabulados en la norma UNE-EN 12758:2011 [10]. Se utilizan los datos del factor de pérdidas con caída de 3 dB (tabla 2) y los obtenidos con el procedimiento de ajuste (tabla 5).

En la tabla 7 se resumen esos datos, incluyendo el valor de la UNE-EN 12758:2011 [10] para el caso de las muestras 1 y 2 (vidrio simple de 6 mm) y los valores más cercanos de vidrios laminados con intercalarios orgánicos no acústicos para el resto de muestras (laminados 33.1 y 44.1 de la norma frente a laminados 33.2 y 44.2 no acústicos y acústicos). Hay que tener en cuenta que estos intercalarios, normalmente de PVB suelen ser de $0,38 \text{ mm}$ y en el caso que se contemplan son de $0,76 \text{ mm}$. En la figura 4 se muestra el caso de las pérdidas por transmisión sonora, R , por frecuencia, en los casos de la muestra 4 y la muestra 6, con los dos factores de pérdidas considerados. Tanto en la tabla 7 como en la figura 4 puede verse cómo el factor de pérdidas puede llegar a modificar el valor del aislamiento global.

5. CONCLUSIONES

- En este trabajo se han revisado normativas europeas y americanas que permiten realizar los ensayos de los parámetros mecánicos necesarios para caracterizar los vidrios, centrándonos en los monolíticos y los laminados. Como se ha podido observar, las normativas nos ofrecen la posibilidad de obtener una función de transferencia de la respuesta vibratoria aceleración/fuerza (o velocidad/fuerza). De esa función de transferencia se pueden obtener bajo ciertas condiciones los parámetros mecánicos. Se ha podido ver que la obtención del factor de pérdidas mediante la relación (1), que es la más habitual, no coincide con la relación (7) para diferentes caídas. La coincidencia es mayor en el caso de vidrios simples o laminados con un factor de pérdidas bajo (muestras 1 a 3) pero disminuye en el caso de muestras con mayor factor de pérdidas (muestras 4 a 6).
- En los resultados mostrados en la tabla 4 y la figura 5, se puede ver un crecimiento de este factor de pérdidas al aumentar la caída. Esto se justifica por la influencia mayor de modos adyacentes conforme se aumenta la caída, que hace que se cuantifique como una sobrevaloración del factor de pérdidas. Es razonable pensar que conforme se disminuya la caída, menos error se cometerá. Sin embargo, dado que la función de transferencia obtenida se hace más ancha y más plana cuanto mayor sea el factor de pérdidas, el error cometido si se disminuye la caída será mayor, ya que pequeñas desviaciones en la medida de la caída producen cambios notables en la medida del ancho de banda. Por ello se propone una extrapolación lineal del factor de pérdidas en función de la caída en decibelios de forma que la tendencia a cero nos ofrezca el caso de menor error.
- Respecto a la determinación del aislamiento acústico a ruido aéreo, se ha utilizado la norma europea ISO 16940:2008 [18] que en su Anexo C nos permite obtener dicho parámetro. También se han utilizado los valores publicados en la norma UNE-EN 12758:2011 [10]. En este caso se pueden obtener las siguientes conclusiones. Respecto a la predicción, los valores de los vidrios simples (muestras 1 y 2) obtenidos mediante ISO 16940:2008 [18] se ajustan bastante bien a los valores de la norma UNE-EN 12758:2011 [10] (tabla 7). Esto también ha servido para ajustar el método.
- Respecto al resto de valores, dado que la UNE-EN 12758:2011 [10] ofrece sólo datos de vidrios laminados con intercalarios orgánicos no acústicos de una capa, los datos no se pueden comparar pero sí se puede evaluar la mejora que produce incluir una capa más o que los intercalarios sean acústicos. Se observa cómo el incluir esa capa más (muestras 3 y 4) produce el aumento de 1 dB . También se observa que si además el intercalario es acústico (muestras 5 y 6) el aumento global es de 2 dB . Estos aumentos son importantes ya que pueden ser mejoras directas en fachada en diseños bien ejecutados.
- Por último queda analizar el efecto del factor de pérdidas. Del análisis de la tabla 7 puede verse que este parámetro no llega a ser demasiado crítico en función de la manera de determinar el factor de pérdidas, ya que el valor del aislamiento acústico global apenas cambia excepto en valores de factores de pérdidas más elevados (muestras 4 y 6). En ese caso, sí parece conveniente refinar la medida del factor de pérdidas puesto que la mera aplicación de la expresión (1) ha producido un aumento de 1 dB debido a la sobreestimación de éste. Por tanto, en el caso de vidrios laminados con intercalarios acústicos habría que tener la precaución de refinar los resultados, por el método propuesto en este trabajo u otros alternativos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, proyecto BIA2010-17723.

REFERENCIAS

- LEY DE ORDENACION DE LA EDIFICACION. Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la edificación (LOE), BOE de 6 de noviembre de 1999.
- CODIGO TECNICO DE LA EFIDICACION. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- CODIGO TECNICO DE LA EFIDICACION. www.codigotecnico.org
- R. Claramunt, S. Postigo, R. Perera, A. Palacios, A. Ros, C. Huerta. "Seguridad ante impacto humano de acristalamientos en edificios". Bol. Soc. Esp. Cerám. V., 44 286-290 (2005)
- Fernández Canteli, M.A. García Prieto, M.J. Lam Rey, E. Castillo Ron "Cálculo de elementos de vidrio en edificación: propuesta de norma española". Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 46 [2] 71-75 (2007).
- J. Ramis, J. Alba, E. Escuder. Aislamiento acústico a ruido aéreo en acristalamientos de vidrio. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. V., 46, 4, 197-204 (2007)
- DOCUMENTO BASICO DE PROTECCION FRENTE AL RUIDO. R. D. 1371/2007 que aprueba el DB-HR Protección frente al Ruido

- [8] R. D. 1675/2008, de 17 de octubre, que modifica el Real Decreto 1371/2007
- [9] LEY DEL RUIDO. Ley 37/2003 del Ruido
- [10] UNE-EN 12758:2011. Vidrio para la construcción. Acristalamiento y aislamiento a ruido aéreo. Definiciones y determinación de las propiedades.
- [11] UNE-EN 572-1:2005. Vidrio para la construcción - Productos básicos de vidrio - Vidrio de silicato sodocálcico - Parte 1: Definiciones y propiedades generales físicas y mecánicas
- [12] T. Baenas, M. Machado, "Modelo óptico para acristalamientos multicapa", Bol. Soc. Esp. Ceram. V. 49, 2, 95-100 (2010)
- [13] J. Ramis, J. Alba, E. Escuder, J.M^a Gadea, S. Iborra."Loss factor for monolithic and laminated glasses". ICSV13 Viena (2006).
- [14] T. Baenas, J. Ramis, J. Alba, J. Vera, "About the influence of the polymeric interlayer shear modulus in the laminated glass panels transmission loss". International Congress on Acoustics (2007).
- [15] J. Ramis, J. Frances Monllor, J. Alba Fernandez, E.E. Segovia Eulogio, J. Vera Guarinosa. "PVB mechanical constants characterization in laminated glasses using low frequency ultrasound". Acoustic Paris (2008).
- [16] K. De Belder, R. Pintelon, C. Demol, P. Roose. "Estimation of the equivalent complex modulus of laminated glass beams and its application to sound transmission loss prediction". Mechanical Systems and Signal Processing, V. 24, 3, 809-822 (2010).
- [17] T. Baenas, J. Ramis, J. Alba, J. Vera, Influence of the polymeric interlayer shear modulus in the laminated glass panels transmission loss. Glass Performance Days 2007.
- [18] ISO 16940:2008 – Glass in building – Glazing airborne sound insulation – Measurement of the mechanical impedance of laminated glass.
- [19] ASTM/C 623–92: Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance.
- [20] ASTM/E 756–98, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials.
- [21] UNE EN ISO 717-1: 1997 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1: 1996)

Recibido: 09/09/2011
Aceptado: 15/12/2011

