

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Optimización de vidrios laminados acústicos”

TESIS DE MASTER

Autor:
Santiago García Rueda

Director/es:
D. Jesús Alba Fernández
D.ª Romina del Rey Tormos

GANDIA, 2010

OPTIMIZACIÓN DE VIDRIOS LAMINADOS ACÚSTICOS

Autor: Santiago García Rueda

Director1: Jesús Alba Fernández.

Director2: Romina del Rey Tormos.

Resumen —

La aparición del Código Técnico de la Edificación (CTE) ha producido una revisión de los materiales necesarios para mejorar las condiciones acústicas de los edificios, dado que las exigencias han aumentado notablemente respecto a la de la anterior normativa. A partir de ahora, uno de los problemas más importantes y de difícil solución en la edificación es el aislamiento acústico de fachadas. El diseño actual de la fachada parte de los datos de ruido del exterior, tal y como se indica en el Reglamento de la Ley del Ruido, y se fundamenta un mayor aislamiento acústico en función de lo elevado que sean estos datos. Esto hace que se requieran mejores aislamientos acústicos en fachada conforme aumente el nivel de ruido de calle.

Es sabido que la problemática de la fachada pasa fundamentalmente por el aislamiento acústico del vidrio que se utilice, junto con la perfilería y elementos de montaje. Suponiendo adecuados estos elementos, el vidrio es el material limitante con diferencia. Un ejemplo de esto se puede ver en el Catálogo de Elementos Constructivos (CEC) del CTE, donde es difícil conseguir vidrios laminados con aislamientos acústicos en laboratorio por encima de los 32 dBA. En este sentido, conseguir que un vidrio laminado aumente en 1 o 2 dBA es un gran logro y esa mejora será prácticamente la misma en la solución final de fachada.

En el presente trabajo se realiza una revisión de los parámetros elásticos más influyentes en el aislamiento acústico de vidrios laminados, se discuten los métodos de ensayo normalizados y se proponen alternativas al mismo para la caracterización del factor de pérdidas, puesto que, como se mostrará, este parámetro que altera significativamente las propiedades de aislamiento acústico del vidrio laminado. Se utilizan y comparan varios métodos predictivos de aislamiento acústico y se comprueba la correlación con resultados tabulados en normas de referencia.

Abstract —

The new Technical Building Code (TBC) has produced a review of the materials for improving the acoustics of buildings, because the demands have increased significantly compared to the previous rules. Currently, one of the most important and difficult to solve in the building is the sound insulation of facades. The current design of the facade is made from the external noise level, as indicated in the Regulation of the Noise Act, and it's based on greater isolation with higher street noise level.

It is known that the problem of sound insulation depends on the glass facade is used, the grid and mounting hardware. Assuming appropriate these elements, the glass is the crucial material. An example of this can be seen in the Catalog of Buildings Components of TBC, which is difficult to find laminated glass with acoustic insulation in the laboratory above 32 dBA (laboratory acoustic measurements). In this sense, making a laminated glass to increase by 1 or 2 dBA is a great achievement and that improvement will be virtually the same in the final solution of the facade.

This paper provides a review of the elastic parameters most influential in acoustic isolation laminated glass, discusses standardized testing methods and propose alternatives for the loss factor determination. This parameter significantly alters the acoustic properties of laminated glass.

Were used and compared several predictive methods of sound insulation and check the correlation with results tabulated in reference standards.

ÍNDICE

I. Objeto y antecedentes.....	5
I.1. Introducción.....	5
I.2. Objetivos.....	5
I.3. Estructura de la tesina.....	5
II. Teoría.....	6
II.1. Fabricación de vidrios laminados.....	6
II.2. Normas de ensayo.....	7
II.2.1. ASTM/C 623–92: standard test method for young’s modulus, shear modulus, and Poisson’s ratio for glass and glass-ceramics by resonance.....	8
II.2.2. ASTM/E 756–98, standard test method for measuring vibration-damping properties of materials.....	9
II.2.3. ISO/PAS 16940:2004, glass in building — glazing and airborne sound insulation — measurement of the mechanical impedance of laminated glass.....	13
II.3. Modelos de aislamiento.....	15
II.3.1. Modelo de Ookura & Saito.....	15
II.3.2. Modelo de Sharp.....	17
II.3.3. Modelo ISO/PAS 16940/2004.....	18
III. Desarrollo.....	18
III.1. Caracterización según normativa.....	18
III.1.1. Caracterización según ASTM/E 756–98.....	19
III.1.1.1. Monolíticos.....	19
III.1.1.2. Vidrios laminados.....	21
III.1.2. Discusión del método.....	24
III.1.3. Alternativa al método.....	25
III.1.3.1. Factor de pérdidas equivalente. η_{eq}	32
III.2. Modelos de aislamiento acústico.....	34
III.2.1. Factor de pérdidas óptimo.....	48

IV. Conclusiones.....	53
V. Futuras líneas.....	54

Referencias

I. OBJETO Y ANTECEDENTES

I.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la vida cotidiana está llena de fuentes de ruido. Muestra de ello son, por ejemplo, los existentes mapas de ruido de las ciudades que muestran niveles de ruido por encima de los valores permitidos. A su vez, estos mapas acústicos y demás actuaciones acústicas son ejecutados gracias a la actual y cambiante normativa acústica. Esto último, recíprocamente, dota a la sociedad de una sensibilidad mayor hacia un fenómeno físico, el ruido, que por definición es molesto e insalubre.

En la actualidad, por tanto, existe mayor demanda de ensayos acústicos, de auditorías acústicas, mayor número de denuncias por ruido y todo ello tiene su reflejo en el aumento de fuentes de producción de nuevos materiales acústicos, de investigaciones sobre ellos y/o, como en el caso de la actual tesina, optimización de soluciones acústicas sobre materiales existentes, que pueden ser mejorables en muchos casos.

No necesariamente el mercado del aislamiento acústico es el dirigido hacia edificación residencial, sino que también lo son las actividades comerciales y de ocio. En todos es necesario preservar los niveles de aislamiento acústico para alcanzar cierto grado de confort acústico.

Es este confort acústico el que en cierto modo se pretende garantizar o por lo menos en el que se pretende aportar alguna mejora, con el tema de la presente tesina. La prevención del ruido exterior de las viviendas residenciales y/o sanitarias así como evitar la transmisión de ruido hacia el exterior en actividades comerciales son los casos más comunes en donde es de gran ayuda la optimización de vidrios laminados acústicos.

I.2. OBJETIVOS

Como se comenta en el apartado anterior el objetivo fundamental es contribuir en la mejora del confort acústico. Para ello, se desprenden dos objetivos particulares: mejorar u optimizar los vidrios laminados acústicos y las técnicas de ensayo que los caracterizan. El primer objetivo, la mejora y optimización de vidrios desde el punto de vista acústico, se tratará extensamente, buscando puntos óptimos en los diseños de los vidrios, y el segundo, las técnicas de ensayo, se abordarán y se cuestionarán en el caso de exceso de amortiguación en las láminas intermedias que componen estos vidrios laminares elegidos.

I.3. ESTRUCTURA DE LA TESINA

La tesina está dividida cinco bloques de los cuales cuatro son fundamentales: teoría, desarrollo, conclusiones y líneas futuras.

Para un mejor seguimiento del trabajo, se realiza una introducción sobre la fabricación de vidrios laminados (apartado II.1), una revisión de las normas elásticas para la caracterización de los

mismos (apartado II.2) y una revisión de los modelos de predicción de aislamiento acústico elegidos (apartado II.3).

Durante el desarrollo (apartado III) se toman como datos de partida, los resultados obtenidos de la aplicación del proceso de ensayo de las normas elásticas comentadas en II.2, efectuadas sobre seis muestras: dos muestras de vidrios monolíticos, dos muestras de vidrios laminados con intercalarlo normal y dos muestras de vidrio laminado con intercalarlo acústico.

En el apartado III.1.1 se realiza una caracterización del factor de pérdidas según norma para luego discutir la validez del método y proponer una alternativa al mismo en los apartados III.1.2 y III.1.3, respectivamente.

En el apartado III.2 se realizan cálculos de predicción mediante los métodos de aislamiento acústico comentados en II.3. Se obtienen resultados para cada uno de los métodos tanto en niveles globales (R_w , R_A , R_{w+Ctr}) como en banda de tercio de octava. Se diferencia también entre los resultados de aislamiento acústico obtenidos con los datos de entrada provenientes de la caracterización del factor de pérdidas según normativa y los resultados de aislamiento acústico obtenidos con los datos de entrada provenientes de la alternativa al método de caracterización del factor de pérdidas propuesta en III.1.3.

En el apartado III.2.1 se realiza una discusión acerca del número de intercalarios necesarios para la optimización de un vidrio laminado.

Las conclusiones acerca de los resultados de los índices, parámetros y/o características obtenidos a lo largo del apartado III se analizan en el apartado IV.

Finalmente se plantean posibles líneas de investigación en el apartado V.

II. TEORIA

II.1. FABRICACIÓN DE VIDRIOS LAMINADOS.

En 1903 un químico francés, Edouard Benedictus, “descubrió” el proceso de laminación, de forma totalmente casual. Dejó olvidada una disolución de colodión en un matraz, al evaporarse totalmente, dejó adherida en su interior una película elástica protectora de celuloide, que al romperse el matraz mantuvo unidos sus fragmentos. Esta anécdota proporcionó la idea para la fabricación de los primeros vidrios laminados de seguridad.

Los vidrios laminados están formados por vidrios monolíticos en las que se intercala una lámina amortiguante, bien del tipo PVB (Polibutil-Vinilo -Butiral), bien del llamado PMMA (PoliMetil-MetAcrilato).

Los vidrios monolíticos, cuyas características generales son descritas en la UNE-EN 572-1:2005 [1], se comportan acústicamente como capas impermeables por lo que al incidir una onda acústica, existe gran cantidad de energía reflejada y la transmisión es debida únicamente a la vibración de la placa. La lámina intermedia (intercalario) se encarga de minimizar esta transmisión de la vibración.

En el proceso de fabricación del vidrio laminado con polivinilbutiral (PVB) se ha de saber que el PVB es un material flexible y se pega a una temperatura de aproximadamente 20 °C, es por ello que se mantiene a una temperatura de 10 °C. A fin de evitar el riesgo de pegado, las hojas de PVB se separan entre ellas por una hoja de polietileno. Las hojas de PVB son habitualmente transparentes, pero existen los PVB de color (gris, bronce, verde, azul,...) y también el mate.

Fabricación:

- El ensamblaje se produce a la salida de la “lavadora”.
- La hoja de PVB se coloca sobre el vidrio, acto seguido la segunda hoja de vidrio, sujeta por medio de una ventosa, se coloca sobre el PVB.
- El conjunto es conducido a un horno de precalentamiento. Con esta operación se trata de eliminar el aire existente entre el vidrio y el PVB calentando el horno hasta una temperatura aproximada de 70 °C. Es entonces cuando la eliminación del aire se produce por medio de la destrucción parcial de la superficie del film. Los cantos se cierran a fin de impedir la posible entrada de aire durante la operación final del *autoclave*.
- El vidrio es conducido a un autoclave, en el interior del cual la presión es de 12 a 14 kg/cm² con una temperatura entre 135 °C y 150 °C.

Se trata de conseguir una flexibilidad suficiente del PVB para crear una adhesión perfecta entre los vidrios. Los tiempos de los ciclos están en función del espesor de las unidades. Es lógico que un acristalamiento con mayor espesor necesite un tiempo netamente más largo para esperar que la temperatura necesaria llegue al interior de la unidad y además permitir un enfriamiento correcto y completo al final del ciclo. De todas maneras la duración de esta operación está entre las 10 y 12 horas.

Los vidrios laminados tienen una denominación o nomenclatura según el número de intercalarlos y espesores de los monolíticos. Esto es, se nombra con un número el espesor de cada uno de los vidrios monolíticos que conforman el laminado y a continuación, separado por un punto, el número de butirales o intercalarios.

De este modo, una nomenclatura de vidrio 44.1 significa que está formado por dos vidrios monolíticos de 4mm y una capa de amortiguante intercalada. Sin embargo, 44.2 es igual pero intercalando dos capas de amortiguante. También existe la nomenclatura a través de signos “+” con lo que 44.2 se puede escribir como 4++4.

II.2. *NORMAS DE ENSAYO*

La caracterización de vidrios monolíticos y laminados se puede llevar a cabo siguiendo los procedimientos de las siguientes normativas:

II.2.1. *ASTM/C 623–92: STANDARD TEST METHOD FOR YOUNG’S MODULUS, SHEAR MODULUS, AND POISSON’S RATIO FOR GLASS AND GLASS-CERAMICS BY RESONANCE.*

Establece un método dinámico para la determinación del módulo de Young, módulo de cizalla y el coeficiente de Poisson. [2]

A partir de datos geométricos, la densidad y las frecuencias de resonancia de una muestra se obtienen las propiedades elásticas de ese material. El módulo de Young se determina a partir de las frecuencias resonantes en el modo de vibración a flexión. Todos los materiales formados por vidrio y vidrio cerámico que sean elásticos, homogéneos e isótropos pueden analizarse mediante este método.

En este método de ensayo se mide la frecuencia de resonancia de muestras de barras con geometría adecuada mediante la excitación continua a frecuencias variables. Esta excitación se realiza por medio de un transductor electro-mecánico, de forma que traduce la señal eléctrica en una vibración. La señal le es entregada por un oscilador que genera señales de frecuencia variable desde 100Hz hasta 20KHz conectado a un amplificador de señal. Otro transductor mecánico-eléctrico, sirve como receptor transformando las vibraciones en señal eléctrica que se encamina hacia un analizador para determinar la frecuencia de resonancia, previamente amplificada la señal del transductor.

Se recomiendan muestras de sección rectangular de dimensiones (120x23x3) mm (largo x ancho x espesor), o de sección circular de 4mm de diámetro y 120mm de largo, y una masa de alrededor de 5g para que la frecuencia de resonancia esté dentro del margen de 1KHz a 2KHz para una estimación de 69GPa del módulo de Young.

El ensayo se realiza a varias temperaturas y básicamente se debe registrar la frecuencia de resonancia y su armónico. Posteriormente, en el caso de muestras de barras de sección rectangular, el cálculo se realiza a través de las siguientes expresiones:

- Cálculo del módulo de Young:

$$E = 96,517 \cdot \left(\frac{L^3}{b \cdot t^3} \right) \cdot T_1 \cdot w \cdot f^2 \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

Donde:

E = Módulo de Young, kgf/cm².

L = Longitud de la barra, cm.

b = Ancho de la barra, cm

t = espesor de la barra, cm.

w = peso de la barra, g.

f = frecuencia de resonancia de la barra, Hz.

T1 = corrección para el modo de flexión, coeficiente de Poisson, etc (viene tabulado en norma).

Para el primer armónico:

$$E = 12,703 \cdot \left(\frac{L^3}{b \cdot t^3} \right) \cdot T_2 \cdot w \cdot f^2 \cdot 10^{-8} \quad (2)$$

Donde:

E = Módulo de Young, kgf/cm²

L = Longitud de la barra, cm.

b = Ancho de la barra, cm

t = espesor de la barra, cm.

w = peso de la barra, g.

f = frecuencia de resonancia de la barra, Hz.

T2 = corrección para el primer armónico (tabulado en la norma).

- Cálculo del módulo de cizalla:

$$G = \frac{10,197 \cdot B \cdot w \cdot f^2 \cdot 10^{-7}}{1 + A} \quad (3)$$

Donde:

G = Módulo de cizalla, kgf/cm².

$$B = \frac{4L}{bt} \left[\frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2,52(t/b)^2 + 0,21(t/b)^6} \right]$$

A = corrección que depende del ancho y el espesor (dado en la figura 6 de la norma)

w = peso de la barra, g.

f = frecuencia de resonancia de la barra, Hz.

- Cálculo del coeficiente de Poisson:

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \quad (4)$$

Donde:

G = Coeficiente de Poisson.

E = Módulo de Young.

G = Módulo de cizalla.

II.2.2. ASTM/E 756-98, STANDARD TEST METHOD FOR MEASURING VIBRATION-DAMPING PROPERTIES OF MATERIALS.

Permite determinar tanto el módulo de Young como el de Cizalla de materiales tipo elastómero, conocido el factor de pérdidas, cuando está confinado entre dos láminas rígidas que se deforman a

flexión, siempre en un rango de temperatura útil del material y en el rango frecuencial de 50 a 5000 Hz.[3]

Se caracterizan varias regiones según el comportamiento elástico en relación a la temperatura.

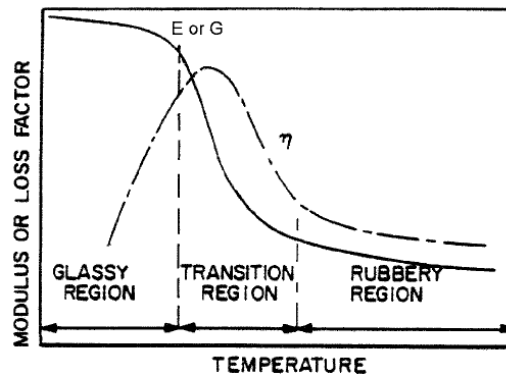


Figura 1: Variación de E, G y η con la temperatura

Para los materiales con material amortiguante en el interior, como el caso de los vidrios laminados, primeramente 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).

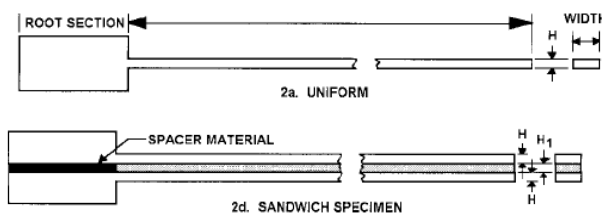


Figura 2: Muestra de material base (superior) y muestra con capa amortiguante (inferior)

Las medidas se realizan bajo régimen viscoelástico lineal, lo que significa que la deformación máxima de la muestra ha de ser menor al espesor de la misma.

La amplitud de la señal de excitación que genera el transductor emisor debe ser constante con la frecuencia.

Para la configuración en sándwich, nuestro caso, el módulo de Young del material amortiguante debe ser diez veces menor al del vidrio. En esta configuración, el primer modo de vibración ha de desecharse.

Se presupone que factor de pérdidas de la barra base es 0 (en el caso de un metal).

Se recomienda, a sabiendas de que pequeños errores en la medida se traducen en grandes errores en los parámetros calculados, que para muestras montadas en tipo sándwich, el término $(f_c/f_n)^2(1 + DT)$ sea igual o superior a 2,01.

El transductor recomendado, tanto para la excitación como para el registro, es el que funciona por electromagnetismo, debido a que la norma se basa en muestras ferrosas, aunque puede adherirse a la muestra de vidrio pequeños trozos de material magnético. Para altas frecuencias puede ser necesario el uso de transductores pequeños de modo que tengan una sensibilidad mayor a

ese rango de frecuencias. La señal de excitación puede ser una sinusoidal (tonos, sine-sweep) o ruido aleatorio (ruido rosa, blanco, señal MLS).

La parte de la barra que se sujeta con el sistema de fijación debe ser de 25 a 40 mm de ancho y un espesor de modo que sobresalga por el inferior y superior de la barra al menos el ancho de la misma.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

Se monta la muestra en el soporte y se inserta dentro de la cámara térmica. Se debe registrar la respuesta de las vibraciones variando la temperatura en pasos de 5 o 10 °C. El rango de barrido de temperaturas es el definido por el material de amortiguamiento de modo que se pueda extraer con claridad el factor de pérdidas en ambos extremos de temperatura de ensayo. Para cada temperatura se debe dejar el material que se alcance el equilibrio térmico.

Se registra los modos de vibración de la barra ante la excitación mediante barrido frecuencial manual u automático, aunque se recomienda el manual.

Se obtiene el factor de pérdidas de cada modo de resonancia mediante el cociente entre la frecuencia resonante y las frecuencias adyacentes donde el valor cae 3dB.

Se especifican también otros métodos para la obtención del factor de pérdidas. Caso concreto es el llamado “n dB” el cual es igual al anterior excepto que las frecuencias adyacentes son las que caen entre 0,5 a 3 dB (a elegir por el usuario):

$$\eta = \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 - 1}} \right) \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (5)$$

Donde $x = 10^{n/20}$ y n es valor elegido por el usuario.

Para el cálculo de las propiedades de la capa amortiguante se debe disponer de las frecuencias resonantes de cada modo, el factor de pérdidas en cada modo, las características geométricas y la densidad volumétrica de los materiales que componen la muestra. Previamente, se deben obtener los datos de las barras base (vidrio monolítico) ya que son datos de entrada para los cálculos de las propiedades de la capa amortiguante.

Por tanto, para la determinación de las propiedades de la barra base (monolítico):

- Cálculo del módulo de Young:

$$E = \frac{12 \cdot \rho \cdot l^4 \cdot f_n^2}{H^2 \cdot C_n^2} \quad (6)$$

Donde:

E = Módulo de Young, Pa.

f_n = frecuencia de resonancia para el modo n, Hz.

H = Espesor de la muestra en la dirección de vibración, m.

l = longitud de la muestra, m.

n = número de modo.

ρ = densidad de la muestra, kg/m³

- Cálculo del factor de pérdidas:

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (7)$$

Donde:

η = Factor de pérdidas

Δf_n = Diferencia entre frecuencia superior e inferior con valor de 3dB menor al valor en fn.

fn = Frecuencia de resonancia del modo n.

N= número de modo.

El valor de C_n esta tabulado en norma y la expresión para $n > 3$ es:

$$C_n = (\pi/2)(n - 0,5)^2 \quad (8)$$

Para el caso de muestras tipo sándwich como vidrios laminados, la formulación para extraer las propiedades de la capa intermedia amortiguante son:

- Cálculo del módulo de cizalla de la lámina amortiguante:

$$G_1 = [A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2] \cdot \left[\frac{\frac{2\pi C_n E H H_1}{l^2}}{\{(1 - 2A + 2B^2) + 4(A\eta_s)^2\}} \right] \quad (9)$$

Donde:

$$A = (f_s / f_n)^2 (2 + DT)(B/2)$$

$$B = 1/[6(1 + T)^2]$$

C_n = coeficiente para el modo n, igual que en la expresión anterior.

$$D = \rho_1 / \rho$$

E = Módulo de Young de la barra base, Pa.

f_n = Frecuencia de resonancia del modo n de la barra base o monolítico, Hz.

f_s = Frecuencia de resonancia del modo s del compuesto o vidrio laminado, Hz.

Δf_s = Diferencia entre frecuencia superior e inferior con valor de 3dB menor al valor en f_s .

G_1 = Modulo de corte de la capa intermedia amortiguante, Pa.

H = espesor del monolítico, barra base, m.

H1 = espesor de la capa intermedia amortiguante, m

l = longitud de la muestra del vidrio laminado, m.

s = índice numérico, s=n.

T =H1/H; cociente de espesores.

η_1 = Factor de pérdidas del material amortiguante intermedio.

η = Factor de pérdidas del monolítico.

ρ_1 = Densidad del material amortiguante intermedio, kg/m³.

ρ = Densidad del monolítico, Kg/m³.

- Cálculo del factor de pérdidas de la lámina amortiguante:

$$\eta_1 = \frac{A\eta_s}{[A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2]} \quad (10)$$

Donde:

$$A = (f_s / f_n)^2 (2 + DT)(B/2)$$

$$B = 1/[6(1 + T)^2]$$

T = H1/H; cociente de espesores.

η_1 = Factor de pérdidas del material amortiguante intermedio.

η_s = Factor de pérdidas del compuesto.

II.2.3. ISO/PAS 16940:2004, GLASS IN BUILDING — GLAZING AND AIRBORNE SOUND INSULATION — MEASUREMENT OF THE MECHANICAL IMPEDANCE OF LAMINATED GLASS

Se mide la impedancia mecánica del vidrio laminado y a partir de ello se obtiene el factor de pérdidas y el módulo de rigidez a flexión equivalente. También se detalla una expresión para el cálculo del “Transmission Lost” (STL), pérdidas por transmisión. [4]

El proceso es el siguiente:

La muestra se fija por sus extremos y el medidor se fija en el medio de la longitud de la barra cuyas dimensiones aconsejadas son (25±2) x (300±1) mm y 4 mm de espesor, limitando así las resonancias a una banda de frecuencias.

La señal de excitación es ruido blanco desde 0 a 5000Hz y es amplificada antes de llegar al transductor de excitación (agitador). Posteriormente, a través de un receptor (transductor piezoeléctrico) se registra un nivel de voltaje proporcional a la fuerza y proporcional a la aceleración para su posterior amplificación y encaminamiento, al igual que la señal emitida, a un analizador FFT.

El ensayo se realiza a 20 ±1 °C y se debe esperar una hora para que la muestra alcance una estabilidad térmica.

De este modo, una vez obtenida la función de transferencia (F/V), a partir de las frecuencias de resonancia se puede calcular:

- Cálculo del factor de pérdidas:

$$\eta_i = \frac{\Delta f_i}{f_{res,i}} \quad (11)$$

Donde:

η_i = Factor de pérdidas a la frecuencia de resonancia i.

Δf_i = Diferencia entre frecuencias adyacentes que caen 3dB, Hz.

$f_{res,i}$ = Frecuencia de resonancia i.

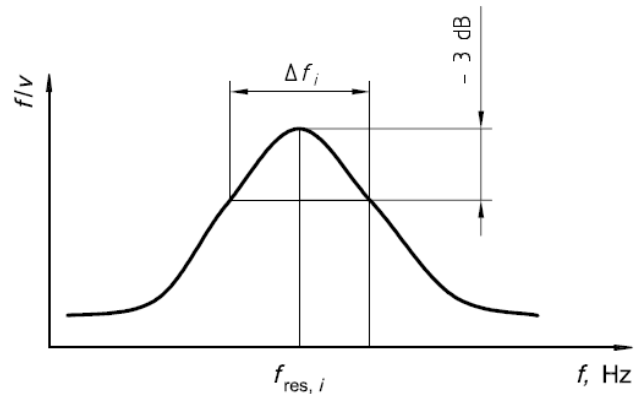


Figura 3: Ejemplo gráfico del cálculo del factor de pérdidas.

Para el factor de pérdidas se ha de considerar los tres primeros modos.

- Cálculo del módulo de rigidez a flexión equivalente:

$$f_{res,i} = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{B_{eq,i}}{m_s}} \quad (12)$$

Donde:

m_s = Densidad superficial de la muestra, kg/m^2 .

λ_i = Parámetro adimensional dado por condiciones de frontera y cuyo valor es:

1,87510 para $i=1$;

4,69410 para $i=2$;

7,85476 para $i=3$;

10,99554 para $i=4$

L = La mitad de la longitud de la muestra, 150mm.

Para el módulo de rigidez a flexión equivalente se ha de considerar cada una de las frecuencias de resonancia.

- Cálculo de las pérdidas por transmisión (STL):

$$STL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

$$\tau = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}$$

$$\theta_{lim} = 75^\circ$$

$$\tau(\theta) = \frac{I_{trans}}{I_{inc}} = \frac{|p_t|^2}{|p_i|^2} = \left\{ \left[1 + \eta \left(\frac{\omega \rho_s}{2 \rho c} \cos \theta \right) \left(\frac{\omega^2 B}{c^4 \rho_s} \sin^4 \theta \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\omega \rho_s}{2 \rho c} \cos \theta \right) \left(1 - \frac{\omega^2 B}{c^4 \rho_s} \sin^4 \theta \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (13)$$

Donde:

I = Intensidad de sonido, W/m².

P = Presión sonora, N/m².

η = Factor de pérdidas de la muestra.

ρ_s = Densidad superficial de la muestra, kg/m².

τ = Espesor de la muestra, m.

ρ = Densidad del aire, kg/m³.

c = Velocidad del sonido en el aire, m/s.

θ = Ángulo de incidencia.

B = Rigidez a flexión por unidad de longitud, N.m.

$\omega = 2\pi f$

f = frecuencia, Hz.

II.3. MODELOS DE AISLAMIENTO

Para una correcta optimización de los vidrios laminados debemos predecir el aislamiento acústico de una determinada muestra para poder extraer conclusiones acerca de las propiedades elásticas y geométricas más favorables y más significativas que gobiernan el comportamiento de estos materiales frente al aislamiento acústico.

Para ello, el presente trabajo se apoya en el modelo de aislamiento acústico de Ookura – Saito aunque veremos también las diferencias con los modelos de Sharp y el modelo dado en la norma ISO/PAS 16940/2004.

II.3.1. MODELO DE OOKURA & SAITO.

Este modelo estudia el índice de transmisión sonora mediante un método de transferencia de impedancias para el caso de ondas con incidencia oblicua y para campo aleatorio. [5], [6], [7]

Se considera una estructura general de paredes múltiples infinitas. Dicha estructura está construida con N elementos y cada uno de estos elementos puede ser una capa impermeable, una

cámara de aire o un material absorbente (en nuestro caso se trata de capas impermeables). Se denomina p_i a la onda de presión incidente y p_r a la onda de presión reflejada. Se supone que una onda plana incide sobre la cara izquierda del elemento N -ésimo con un ángulo de incidencia θ . La onda que incide por la parte izquierda continuará propagándose a través de la estructura y radiará por la cara derecha del primer elemento como una onda plana de presión p_t hacia un campo libre con un ángulo de transmisión θ_t .

En el análisis se numera con el subíndice $i=1, 2, \dots, n$ cada uno de los parámetros físicos del i -ésimo elemento, y se utiliza un segundo subíndice para indicar un parámetro de la cara izquierda del elemento (un 2) y la cara derecha (un 1), tal y como se aprecia en la figura 1.

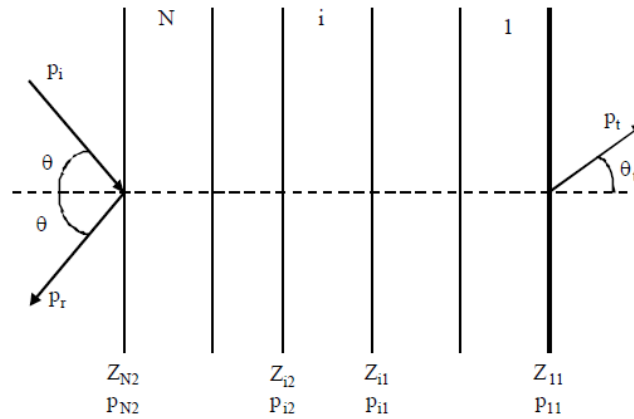


Figura 4: Modelo multicapa.

Sabiendo que:

$$\frac{P_{N2}}{P_i} = \frac{P_i + P_r}{P_i} = \frac{2Z_{N2}}{Z_{N2} + \frac{\rho c}{\cos \theta}} \quad (14)$$

Donde:

P_{N2} = Presión en la superficie de incidencia.

p_i = Presión incidente.

Z_{N2} = Impedancia acústica normal vista desde la cara izquierda de elemento n .

$\frac{\rho c}{\cos \theta}$ = Impedancia acústica normal en campo libre de una superficie e incidencia oblicua.

$\frac{\rho c}{\cos \theta} = Z_{11}$ = Impedancia del primer elemento.

Que la expresión del coeficiente de transmisión se puede escribir en función de las presiones en cada superficie:

$$\tau(\theta) = \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2 = \left| \frac{P_{11}}{P_i} \right|^2 = \left| \frac{P_{N2}}{P_i} \right|^2 \left| \frac{P_{N1}}{P_{N2}} \dots \frac{P_{i1}}{P_{i2}} \dots \frac{P_{11}}{P_{12}} \right|^2 \quad (15)$$

Y que las relaciones de presiones para capas impermeables (virios laminados):

$$\begin{aligned} Z_2 &= Z_1 + Z_m \\ \frac{p_2}{p_1} &= \frac{Z_2}{Z_1} \end{aligned} \quad (16)$$

Donde:

$$Z_m = \eta \omega m \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \sin^4 \theta + j \omega m \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \sin^4 \theta \right] \quad (17)$$

Con:

η = Factor de pérdidas de la capa impermeable

ω = Frecuencia angular de la onda sonora.

ω_c = Frecuencia angular crítica de la muestra.

m = Masa por unidad de área.

Partiendo de que, para una capa impermeable, la velocidad depende de la impedancia de superficie Z_m :

$$u = \frac{p_2 - p_1}{Z_m} \quad (18)$$

Los subíndices 1 y 2 denotan las caras de transmisión y de incidencia respectivamente.

Se puede, por tanto, obtener el índice de debilitamiento para incidencia aleatoria o pérdidas por transmisión como:

$$\begin{aligned} STL &= 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \\ \tau &= \frac{\int_0^{\lim} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\lim} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta} \\ \theta_{\lim} &= 75^\circ \\ STL &= 10 \log \left[\frac{\int_0^{\lim} \cos \theta \sin \theta \cdot d\theta}{\int_0^{\lim} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta \cdot d\theta} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

II.3.2. MODELO DE SHARP.

$$\begin{aligned} R &= 20 \log \left(\frac{\pi f m}{\rho c} \right) - 5 \rightarrow \forall f < f_c / 2 \\ R &= 20 \log \left(\frac{\pi f m}{\rho c} \right) - 5 + 10 \log \left(\frac{2 \eta f}{f_c} \right) \rightarrow \forall f > f_c \end{aligned} \quad (20)$$

Donde:

R = Índice de reducción sonora, “transmission lost”, dB

m = Masa por unidad de superficie del vidrio, kg/m².

c = Velocidad de propagación del sonido en el aire, m/s.

ρ = Densidad del aire, kg/m³.

η = Factor de pérdidas del vidrio laminar.

f_c = frecuencia crítica del vidrio laminar.

El índice de reducción sonora para las frecuencias comprendidas entre $f_c/2$ y f_c se obtiene mediante interpolación de Lagrange.

II.3.3. MODELO ISO/PAS 16940/2004

$$[4] \quad \begin{aligned} STL &= 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \\ \tau &= \frac{\int_0^{\theta_{\text{lim}}} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\theta_{\text{lim}}} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta} \\ \theta_{\text{lim}} &= 75^\circ \end{aligned} \quad (21)$$

$$\tau(\theta) = \frac{I_{\text{trans}}}{I_{\text{inc}}} = \frac{|p_t|^2}{|p_i|^2} = \left\{ \left[1 + \eta \left(\frac{\omega \rho_s}{2 \rho c} \cos \theta \right) \left(\frac{\omega^2 B}{c^4 \rho_s} \sin^4 \theta \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\omega \rho_s}{2 \rho c} \cos \theta \right) \left(1 - \frac{\omega^2 B}{c^4 \rho_s} \sin^4 \theta \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (22)$$

Donde:

I = Intensidad de sonido, W/m².

P = Presión sonora, N/m².

η = Factor de pérdidas de la muestra.

ρ_s = Densidad superficial de la muestra, kg/m².

τ = Espesor de la muestra, m.

ρ = Densidad del aire, kg/m³.

c = Velocidad del sonido en el aire, m/s.

θ = Ángulo de incidencia.

B = Rigidez a flexión por unidad de longitud, N.m.

$\omega = 2\pi f$

f = frecuencia, Hz.

III. DESARROLLO

III.1. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMATIVA.

A continuación se muestran los resultados de caracterización de los vidrios laminados según:

III.1.1. CARACTERIZACIÓN SEGÚN ASTM/E 756–98.

Las muestras caracterizadas son las siguientes:

Nº	Tipo	Longitud Monolítico (m)	Espesor Monolítico (m)	Anchura Monolítico (m)	Espesor PVB (m)	Tipo PVB
1	<i>Monolítico</i>	0.18	0.006	0.02	---	---
2	<i>Monolítico</i>	0.38	0.006	0.02	---	---
3	<i>Sándwich</i>	0.18	0.003	0.02	0.00076	Normal
4	<i>Sándwich</i>	0.38	0.004	0.02	0.00076	Normal
5	<i>Sándwich</i>	0.18	0.003	0.02	0.00076	Acústico
6	<i>Sándwich</i>	0.38	0.004	0.02	0.00076	Acústico

Tabla 1: Muestras caracterizadas.

Nos centraremos en los resultados que se obtienen para el factor de pérdidas y lo utilizaremos como la variable en el estudio del comportamiento acústico de los vidrios: el aislamiento acústico que presentan.

La densidad del monolítico y de la lámina de PVB son de 2450kg/m^3 y 1200kg/m^3 , respectivamente.

Se realiza el ensayo según normativa a excepción de la fuente de excitación que se decide utilizar un martillo de impacto a modo de provocar un impulso, o delta de Dirac en el dominio temporal, de modo que sea excitado todo el margen frecuencial de interés.

III.1.1.1. MONOLÍTICOS

MUESTRA 1 (Monolítico de 6mm espesor y 180mm de longitud)

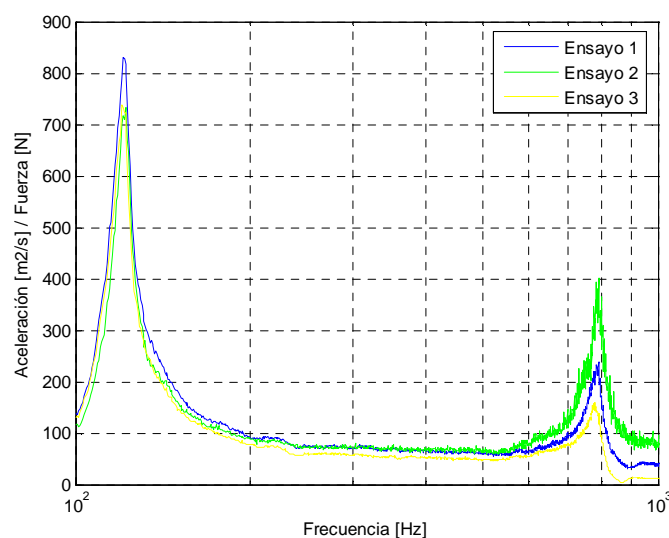


Figura 5: Función de transferencia para la muestra 1.

A continuación se muestran los resultados del factor de pérdidas de los tres ensayos utilizando la técnica de potencia mitad y la técnica *ndB*. [3]

ENSAYO	n dB	x	f max (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Δf	Loss Factor
1	1,00	1,12	120,63	119,38	123,13	3,75	0,061
	2,00	1,26	120,63	117,50	123,75	6,25	0,068
	3,00	--	120,63	116,25	124,38	8,13	0,068
2	1,00	1,12	121,88	119,38	123,75	4,38	0,071
	2,00	1,26	121,88	118,13	124,38	6,25	0,067
	3,00	--	121,88	116,88	125,00	8,13	0,067
3	1,00	1,12	120,00	118,75	122,50	3,75	0,061
	2,00	1,26	120,00	116,88	123,13	6,25	0,068
	3,00	--	120,00	116,25	124,38	8,13	0,068

Tabla 2: Resultados del factor de pérdidas para la muestra 1.

Obteniéndose el siguiente resultado promedio:

PROMEDIO	n dB	Loss Factor
	1,00	0,064
	2,00	0,068
	3,00	0,067

Tabla 3: Promedio de los datos obtenidos de los tres ensayos de la muestra 1.

Del mismo modo, se obtienen los resultados para las demás muestras de monolíticos y laminados:

MUESTRA 2 (Monolítico de 6mm espesor y 380mm de longitud)

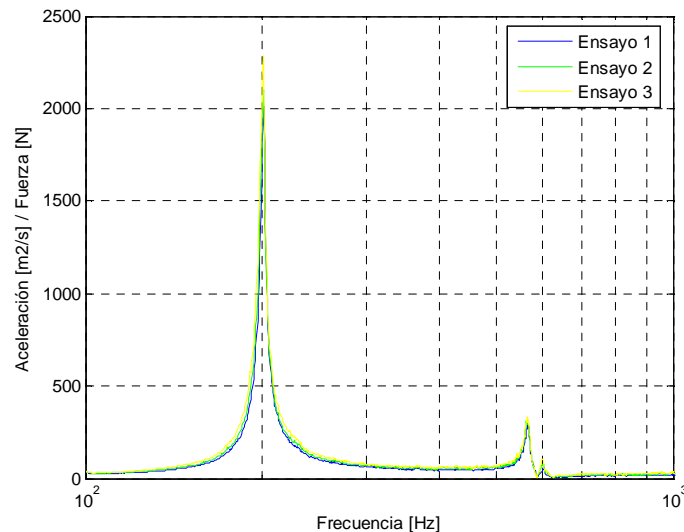


Figura 6: Función de transferencia para la muestra 2.

ENSAYO	n dB	x	f max (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Δf	Loss Factor
1	1,00	1,12	201,25	200,00	201,88	1,88	0,018
	2,00	1,26	201,25	199,38	202,50	3,13	0,020
	3,00	---	201,25	198,75	202,50	3,75	0,019
2	1,00	1,12	200,63	200,00	201,88	1,88	0,018
	2,00	1,26	200,63	198,75	201,88	3,13	0,020

	3,00	---	200,63	198,13	202,50	4,38	0,022
3	1,00	1,12	200,63	199,38	201,25	1,88	0,018
	2,00	1,26	200,63	198,75	201,88	3,13	0,020
	3,00	---	200,63	198,13	201,88	3,75	0,019

Tabla 4: Resultados del factor de pérdidas para la muestra 2.

	n dB	Loss Factor
PROMEDIO	1,00	0,018
	2,00	0,020
	3,00	0,020

Tabla 5: Promedio de los datos obtenidos de los tres ensayos de la muestra 2.

III.1.1.2. VIDRIOS LAMINADOS

MUESTRA 3 (laminado 33.2 Normal)

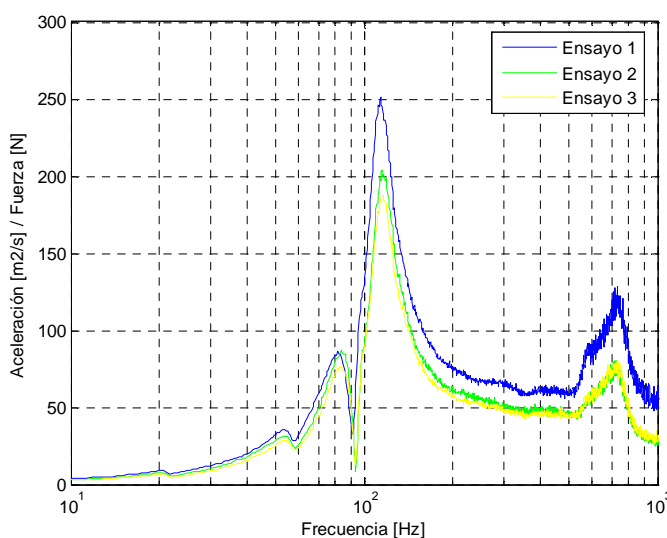


Figura 7: Función de transferencia para la muestra 3.

ENSAYO	n dB	x	f max (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Δf	Loss Factor
1	1,00	1,12	113,75	109,38	120,00	10,63	0,184
	2,00	1,26	113,75	106,88	123,75	16,88	0,194
	3,00	---	113,75	104,38	126,25	21,88	0,193
2	1,00	1,12	115,00	110,63	121,88	11,25	0,192
	2,00	1,26	115,00	108,75	125,00	16,25	0,185
	3,00	---	115,00	106,88	128,13	21,25	0,185
3	1,00	1,12	115,00	110,63	121,88	11,25	0,192
	2,00	1,26	115,00	108,13	125,00	16,88	0,192
	3,00	---	115,00	106,25	128,13	21,88	0,191

Tabla 6: Resultados del factor de pérdidas para la muestra 3.

	n dB	Loss Factor
PROMEDIO	1,00	0,189
	2,00	0,190
	3,00	0,190

Tabla 7: Promedio de los datos obtenidos de los tres ensayos de la muestra 3.

MUESTRA 4 (laminado 44.2 Normal)

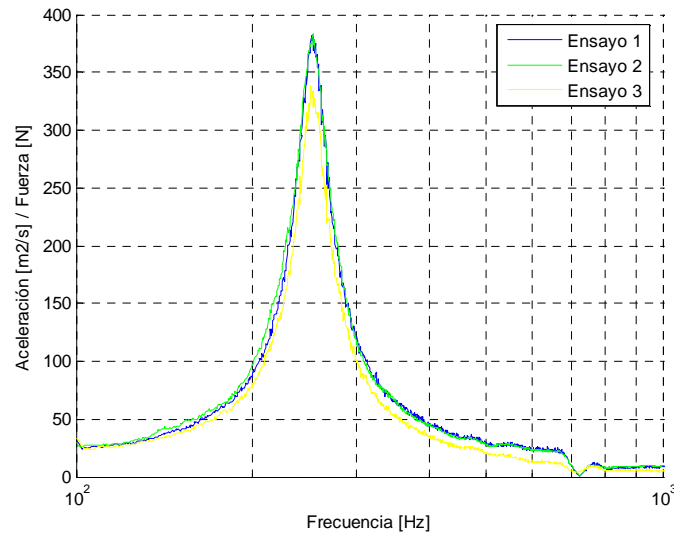


Figura 8: Función de transferencia para la muestra 4.

ENSAYO	n dB	x	f max (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Δf	Loss Factor
1	1,00	1,12	253,75	247,50	261,25	13,75	0,106
	2,00	1,26	253,75	243,75	262,50	18,75	0,097
	3,00	---	253,75	240,00	268,75	28,75	0,114
2	1,00	1,12	253,13	245,63	260,00	14,38	0,112
	2,00	1,26	253,13	241,88	265,00	23,13	0,119
	3,00	---	253,13	238,13	268,75	30,63	0,121
3	1,00	1,12	251,25	246,25	260,63	14,38	0,112
	2,00	1,26	251,25	243,75	263,75	20,00	0,104
	3,00	---	251,25	239,38	265,63	26,25	0,105

Tabla 8: Resultados del factor de pérdidas para la muestra 4.

	n dB	Loss Factor
PROMEDIO	1,00	0,110
	2,00	0,107
	3,00	0,113

Tabla 9: Promedio de los datos obtenidos de los tres ensayos de la muestra 4.

MUESTRA 5 (laminado 33.2Acústico)

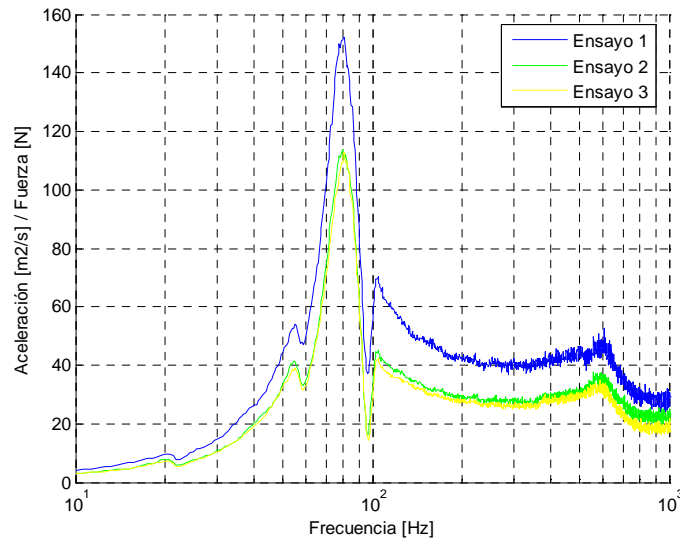


Figura 9: Función de transferencia para la muestra 5.

ENSAYO	n dB	x	f max (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Δf	Loss Factor
1	1,00	1,12	80,63	74,38	83,75	9,38	0,229
	2,00	1,26	80,63	72,50	86,25	13,75	0,223
	3,00	---	80,63	70,63	88,13	17,50	0,218
2	1,00	1,12	79,38	75,63	85,00	9,38	0,232
	2,00	1,26	79,38	72,50	86,88	14,38	0,237
	3,00	---	79,38	71,25	88,13	16,88	0,213
3	1,00	1,12	80,63	76,25	84,38	8,13	0,198
	2,00	1,26	80,63	73,75	86,25	12,50	0,203
	3,00	---	80,63	71,88	87,50	15,63	0,194

Tabla 10: Resultados del factor de pérdidas para la muestra 5.

	n dB	Loss Factor
PROMEDIO	1,00	0,220
	2,00	0,221
	3,00	0,208

Tabla 11: Promedio de los datos obtenidos de los tres ensayos de la muestra 5.

MUESTRA 6 (laminado 44.2 Acústico)

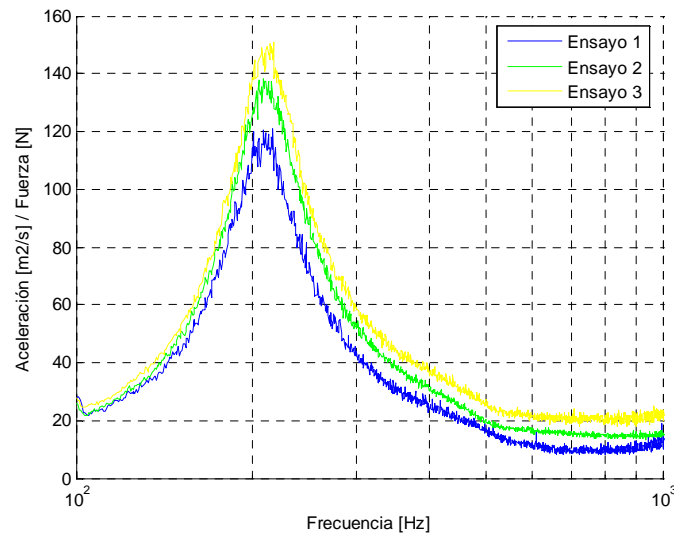


Figura 10: Función de transferencia para la muestra 6.

ENSAYO	n dB	x	f max (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Δf	Loss Factor
1	1,00	1,12	216,88	206,25	220,63	14,38	0,130
	2,00	1,26	216,88	191,25	228,75	37,50	0,226
	3,00	---	216,88	183,13	240,63	57,50	0,266
2	1,00	1,12	208,75	198,75	223,13	24,38	0,229
	2,00	1,26	208,75	191,88	231,25	39,38	0,247
	3,00	---	208,75	184,38	242,50	58,13	0,279
3	1,00	1,12	217,50	198,75	224,38	25,63	0,232
	2,00	1,26	217,50	193,13	235,00	41,88	0,252
	3,00	---	217,50	185,63	241,88	56,25	0,259

Tabla 12: Resultados del factor de pérdidas para la muestra 6.

	n dB	Loss Factor
PROMEDIO	1,00	0,197
	2,00	0,241
	3,00	0,268

Tabla 13: Promedio de los datos obtenidos de los tres ensayos de la muestra 6.

III.1.2. DISCUSIÓN DEL MÉTODO.

El método establecido como válido en la norma ASTM/E 756–98 [3] es el mostrado en el apartado anterior, que se basa en la potencia mitad, 3dB; y en la caída de los n primeros decibelios, *n*dB (*1*dB, *2*dB).

El resultado, para una misma muestra, debe ser el mismo indistintamente del método utilizado. Esto se refleja en los resultados de los monolíticos en los que las diferencias son pequeñas, motivadas en gran medida por los bajos factores de pérdidas característicos. Sin embargo, si

evaluamos las diferencias en laminados con PVB normal y laminados con PVB acústico, los resultados difieren en mayor rango.

En la siguiente tabla se puede observar las diferencias máximas encontradas en la determinación del factor de pérdidas de cada muestra:

TIPO DE VIDRIO	MUESTRA	DIFERENCIA MÁXIMA
MONOLÍTICOS	1	0,003
	2	0,002
LAMINADO PVB NORMAL	3	0,001
	4	0,006
LAMINADO PVB ACÚSTICO	5	0,013
	6	0,071

Tabla 14: Diferencias en la determinación del factor de pérdidas según el método de ensayo empleado.

Como se comenta anteriormente y como se puede ver en la tabla, cuanto mayor es el factor de pérdidas de la muestra, mayor es la diferencia encontrada entre los métodos de determinación.

Como se verá en apartados posteriores, estas diferencias afectan directamente en la valoración del aislamiento acústico de cada muestra.

De este modo queda justificada la necesidad de la obtención de un método que minimice la desviación al valor verdadero.

III.1.3. ALTERNATIVA AL MÉTODO.

Se plantea en este apartado un método para la determinación del factor de pérdidas que minimiza la desviación al valor verdadero del mismo.

Es un método que combina el cálculo especificado en el método *ndB* al cual se le aplican técnicas estadísticas para la obtención final de una ecuación de la recta de la que resulte la predicción del factor de pérdidas.

Consiste en la obtención del factor de pérdidas *ndB* para varios niveles de caída en la señal de repuesta registrada. Se escogen aquellos *ndB* desde 1dB a 12dB y se obtiene el factor de pérdidas según la expresión (5).

Obviamente, los resultados obtenidos para una misma muestra debieran corresponder a una distribución normal siendo posible calcular una recta de regresión para predecir el comportamiento.

También es cierto que cuanto mayor sea el *ndB* mayor riesgo o desviación en la determinación debido a enrarecimientos en la curva de repuesta debidas a resonancias de frecuencias adyacentes.

Con todo ello, como punto de partida se supone que los datos corresponden a una distribución normal y si realiza el test de detección de valores anómalos, Box and Whisker, para la detección y eliminación, en su caso, de los mismos. Posteriormente se aplican técnicas estadísticas para la presunción de normalidad de los datos y se obtiene la recta de regresión.

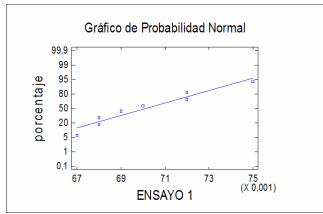
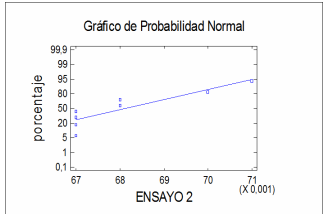
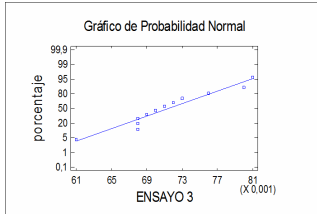
Las técnicas estadísticas para la presunción de normalidad de los datos son:

- Análisis unidimensional. Comprobación de que el coeficiente de asimetría tipificada y el coeficiente de curtosis estandarizada están contenidos dentro del intervalo [-2, 2].
- Estudio del gráfico de normalidad. Los puntos deben estar cercanos a la recta.
- Test de normalidad. Se realizan test Chi-cuadrado y test W. Shapiro Wilks donde el Pvalor menor de ellos debe ser superior de 0,1.

Puesto que el objetivo final es la extracción de una recta de regresión lo más aproximada posible, se utilizará el coeficiente de determinación (R^2) de modo que sea el máximo posible dentro del intervalo [0,1] pudiendo en este caso descartar valores no detectados mediante la técnica Box and Whisker.

A continuación se muestran los datos *ndB* y los datos estadísticos de cada una de las muestras:

MUESTRA 1 (Monolítico de 6mm espesor y 180mm de longitud)

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
n dB	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas
1,00	0,061	0,071	0,061
2,00	0,068	0,067	0,068
3,00	0,068	0,067	0,068
4,00	0,067	0,067	0,068
5,00	0,070	3,770	0,071
6,00	0,069	3,181	0,069
7,00	0,072	2,827	0,070
8,00	0,072	0,067	0,072
9,00	0,075	2,152	0,073
10,00	0,081	0,070	0,076
11,00	1,651	1,535	0,080
12,00	1,454	1,369	0,081
Estudio de valores anómalos (Box and Whisker)			
<i>ndB</i> descartados	1,10,11,12	5,6,7,11,12	
Estudio de la normalidad de los datos			
<i>Asimetría tipificada</i>	0,875	1,449	0,309
<i>Curtosis estandarizada</i>	-0,104	0,137	0,226
<i>Gráfico de probabilidad normal</i>			
<i>Pvalor Test Chi-cuadrado</i>	P-valor = 0,125	P-valor = 0,010	P-valor = 0,501
<i>Pvalor Test W. Shapiro Wilks</i>	P-valor = 0,487	P-valor = 0,014	P-valor = 0,476
Estudio de la tendencia. Recta de regresión.			

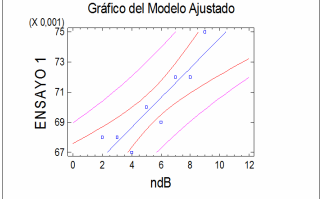
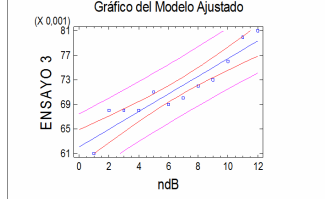
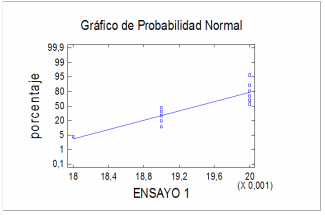
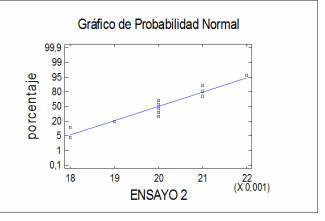
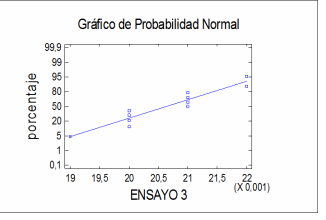
$R^2(\%)$	80,6		87,5
Ecuación de la recta	$\eta = 0,0646905 + 0,000988095 * ndB$		$\eta = 0,0620303 + 0,00144406 * ndB$
Tendencia	0,065		0,062
Regresión simple			

Tabla 15: Aplicación de la alternativa al método para la muestra 1.

MUESTRA 2 (Monolítico de 6mm espesor y 380mm de longitud)

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
n dB	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas
1,00	0,018	0,018	0,018
2,00	0,020	0,020	0,020
3,00	0,019	0,022	0,019
4,00	0,020	0,020	0,020
5,00	0,019	0,019	0,021
6,00	0,020	0,018	0,020
7,00	0,020	0,020	0,020
8,00	0,019	0,020	0,022
9,00	0,019	0,020	0,021
10,00	0,020	0,021	0,021
11,00	0,019	0,021	0,022
12,00	0,020	0,021	0,021
Estudio de valores anómalos (Box and Whisker)			
ndB descartados			1
Estudio de la normalidad de los datos			
Asimetría tipificada	-1,040	-0,528	-0,031
Curtois estandarizada	-0,134	-0,113	-0,303
Gráfico de probabilidad normal			
Pvalor Test Chi-cuadrado	P-valor = 0,00000145786	P-valor = 0,00330689	P-valor = 0,00197169
Pvalor Test W. Shapiro Wilks	P-valor = 0,00338983	P-valor = 0,205189	P-valor = 0,212069
Estudio de la tendencia. Recta de regresión.			
$R^2(\%)$	8,00047	17,4825	51,4894

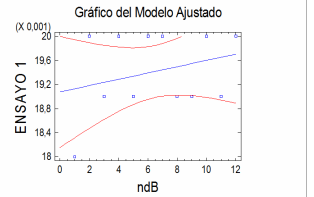
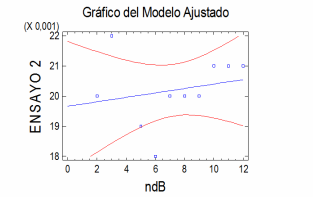
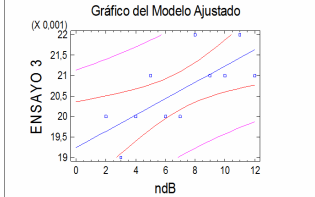
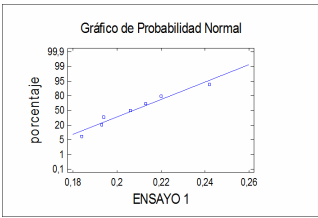
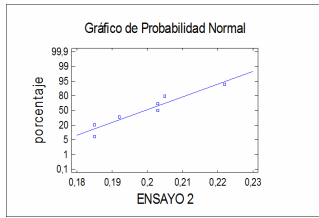
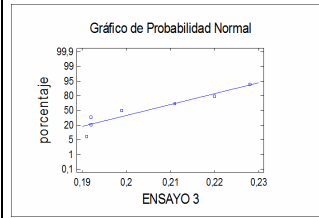
<i>Ecuación de la recta</i>	$\eta = 0,0190758 + 0,0000524476*\text{ndB}$	$\eta = 0,0190909 + 0,00013986*\text{ndB}$	$\eta = 0,0192364 + 0,0002*\text{ndB}$
<i>Tendencia</i>	0,019	0,019	0, 019
<i>Regresión simple</i>			

Tabla 16: Aplicación de la alternativa al método para la muestra 2.

MUESTRA 3 (laminado 33.2 Normal)

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
n dB	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas
1,00	0,184	0,192	0,192
2,00	0,194	0,185	0,192
3,00	0,193	0,185	0,191
4,00	0,206	0,203	0,199
5,00	0,213	0,203	0,211
6,00	0,220	0,205	0,220
7,00	2,729	0,222	0,228
8,00	2,125	0,304	2,434
9,00	0,242	2,063	0,276
10,00	2,139	0,330	1,542
11,00	4,539	1,336	0,455
12,00	3,582	0,492	0,681
Estudio de valores anómalos (Box and Whisker)			
ndB descartados	7,8,10,11,12	7,8,9,10,11,12	8,9,10,11,12
Estudio de la normalidad de los datos			
<i>Asimetría tipificada</i>	0,833	0,642	0,707
<i>Curtosis estandarizada</i>	0,161	0,066	-0,762
<i>Gráfico de probabilidad normal</i>			
<i>Pvalor Test Chi-cuadrado</i>	P-valor = 0,656	P-valor = 0,350	P-valor = 0,164
<i>Pvalor Test W. Shapiro Wilks</i>	P-valor = 0,748	P-valor = 0,381	P-valor = 0,149
Estudio de la tendencia. Recta de regresión.			
$R^2(\%)$	98,4	75,4	89,0
<i>Ecuación de la recta</i>	$\eta = 0,176329 + 0,00725658*\text{ndB}$	$\eta = 0,178143 + 0,00528571*\text{ndB}$	$\eta = 0,178429 + 0,00657143*\text{ndB}$

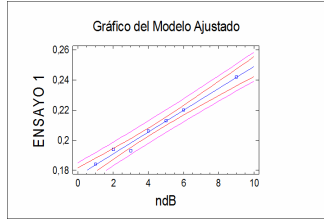
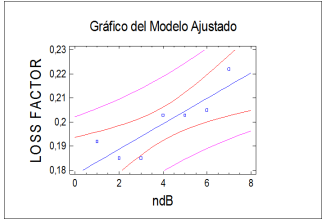
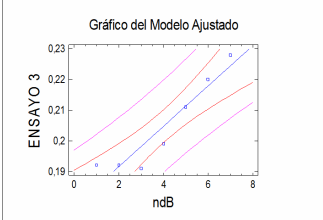
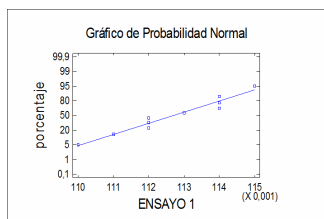
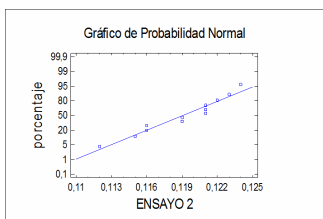
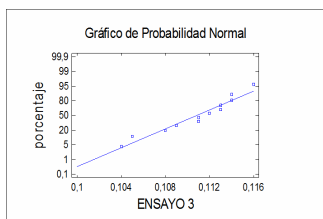
Tendencia	0, 176	0, 178	0, 178
Regresión simple			

Tabla 17: Aplicación de la alternativa al método para la muestra 3.

MUESTRA 4 (laminado 44.2 Normal)

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
n dB	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas
1,00	0,106	0,112	0,112
2,00	0,097	0,119	0,104
3,00	0,114	0,121	0,105
4,00	0,110	0,116	0,111
5,00	0,112	0,124	0,108
6,00	0,114	0,123	0,111
7,00	0,113	0,121	0,113
8,00	0,112	0,122	0,114
9,00	0,115	0,121	0,113
10,00	0,111	0,119	0,116
11,00	0,112	0,116	0,114
12,00	0,114	0,115	0,109
Estudio de valores anómalos (Box and Whisker)			
ndB descartados	1,2		
Estudio de la normalidad de los datos			
Asimetría tipificada	-0,319	-0,830	-0,993
Curtosis estandarizada	-0,493	-0,343	-0,220
Gráfico de probabilidad normal			
Pvalor Test Chi-cuadrado	P-valor = 0,101	P-valor = 0,041	P-valor = 0,408
Pvalor Test W. Shapiro Wilks	P-valor = 0,609	P-valor = 0,493	P-valor = 0,423
Estudio de la tendencia. Recta de regresión.			
R ² (%)	1,7	0,1	3,7
Ecuación de la recta	$\eta = 0,1122 + 0,0000666667 * ndB$	$\eta = 0,118879 + 0,0000314685 * ndB$	$\eta = 0,107106 + 0,000573427 * ndB$
Tendencia	0, 112	0, 119	0, 107

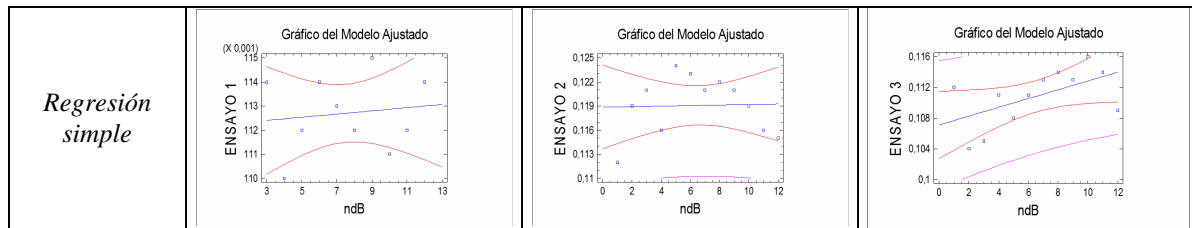


Tabla 18: Aplicación de la alternativa al método para la muestra 4.

MUESTRA 5 (laminado 33.2 Acústico)

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
n dB	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas
1,00	0,229	0,232	0,198
2,00	0,223	0,237	0,203
3,00	0,218	0,213	0,194
4,00	0,208	17,373	0,189
5,00	0,195	0,187	0,179
6,00	0,184	0,178	0,171
7,00	0,259	12,100	0,163
8,00	0,276	10,327	0,151
9,00	0,332	0,275	0,188
10,00	0,450	6,806	0,243
11,00	2,122	7,024	2,049
12,00	1,937	0,521	1,098
Estudio de valores anómalos (Box and Whisker)			
ndB descartados	9,10,11,12	4,7,8,10,11,1	10,11,12
Estudio de la normalidad de los datos			
Asimetría tipificada	0,677	0,372	-0,798
Curiosis estandarizada	-0,195	-0,209	-0,322
Gráfico de probabilidad normal			
Pvalor Test Chi-cuadrado	P-valor = 0,986	P-valor = 0,458	P-valor = 0,920
Pvalor Test W. Shapiro Wilks	P-valor = 0,754	P-valor = 0,818	P-valor = 0,677
Estudio de la tendencia. Recta de regresión.			
R ² (%)	13,8	3,2	53,4
Ecuación de la recta	$\eta = 0,202893 + 0,00469048 \cdot \text{ndB}$	$\eta = 0,2109 + 0,00217692 \cdot \text{ndB}$	$\eta = 0,204778 - 0,0046 \cdot \text{ndB}$
Tendencia	0,203	0,211	0,205

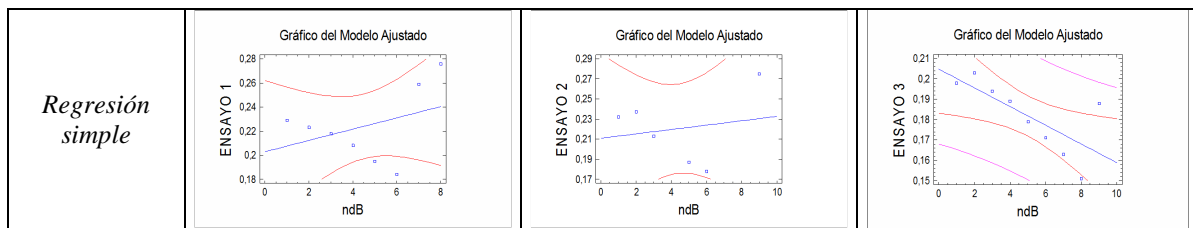
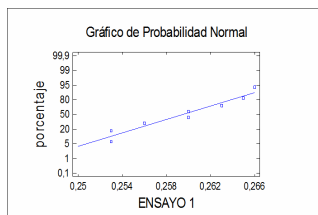
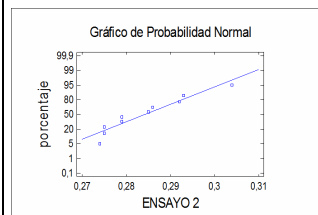
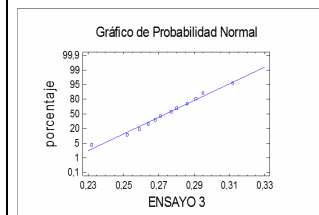


Tabla 19: Aplicación de la alternativa al método para la muestra 5.

MUESTRA 6 (laminado 44.2 Acústico)

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
n dB	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas	Factor de pérdidas
1,00	0,130	0,229	0,232
2,00	0,226	0,247	0,252
3,00	0,266	0,279	0,259
4,00	0,253	0,275	0,264
5,00	0,253	0,275	0,268
6,00	0,260	0,279	0,271
7,00	0,256	0,286	0,280
8,00	0,260	0,274	0,277
9,00	0,280	0,285	0,286
10,00	0,263	0,292	0,295
11,00	0,265	0,304	0,291
12,00	0,301	0,293	0,312
Estudio de valores anómalos (Box and Whisker)			
<i>ndB</i> descartados	1,2,9,12	1,2	
Estudio de la normalidad de los datos			
<i>Asimetría tipificada</i>	-0,179	1,153	-0,274
<i>Curtosis estandarizada</i>	-0,905	0,120	0,293
<i>Gráfico de probabilidad normal</i>			
<i>Pvalor Test Chi-cuadrado</i>	P-valor = 0,481	P-valor = 0,189	P-valor = 0,988
<i>Pvalor Test W. Shapiro Wilks</i>	P-valor = 0,388	P-valor = 0,230	P-valor = 0,981
Estudio de la tendencia. Recta de regresión.			
R^2 (%)	15,1	62,0	93,1
<i>Ecuación de la recta</i>	$\eta = 0,254757 + 0,000702703 \cdot \text{ndB}$	$\eta = 0,265109 + 0,00254545 \cdot \text{ndB}$	$\eta = 0,236894 + 0,0056958 \cdot \text{ndB}$
<i>Tendencia</i>	0,255	0,265	0,237

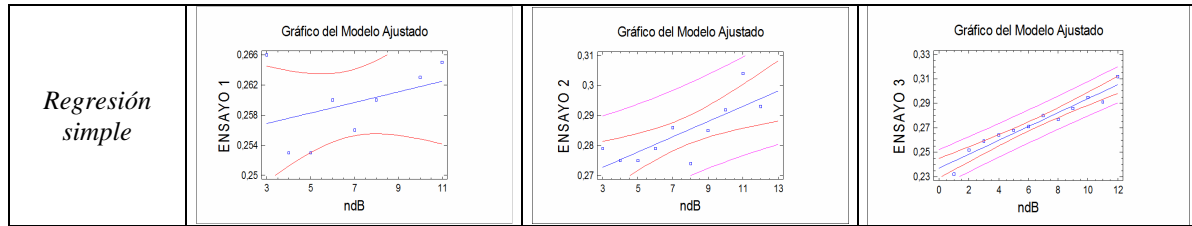


Tabla 20: Aplicación de la alternativa al método para la muestra 6.

En todas las tablas anteriores se ha mostrado, en una fila, los resultados de la tendencia del factor de pérdidas, esto es, el valor que toma el factor de pérdidas cuando el ndB tiende a 0. Es una predicción de un caso no medible mediante instrumentación debido a las precisiones del instrumento, factor de escala, etc., que da como resultado el valor con la menor desviación al valor verdadero.

En la siguiente tabla se muestran los valores promediados de los tres ensayos de cada muestra del valor de la tendencia del factor de pérdidas aceptado como valor verdadero junto con el valor obtenido según la norma que más se aleja de éste.

MUESTRAS	TENDENCIA	NORMA	DIFERENCIA
1	0,063	0,068	0,005
2	0,019	0,018	0,001
3	0,178	0,190	0,012
4	0,113	0,107	0,006
5	0,206	0,221	0,015
6	0,252	0,197	0,055

Tabla 21: Diferencias entre el método alternativo y el normalizado.

En el siguiente capítulo se comprobarán las diferencias de los resultados de aislamiento acústico debido a los distintos valores de factor de pérdidas tenidos en cuenta.

III.1.3.1. FACTOR DE PÉRDIDAS EQUIVALENTE. η_{eq}

A la vista de los resultados del factor de pérdidas obtenidos se puede predecir intuitivamente que el factor de pérdidas equivalente debe ser el resultado de una combinación de los factores de pérdidas de cada uno de los elementos que forman el vidrio laminado.

Mediante la siguiente expresión se obtiene el factor de pérdidas equivalente del vidrio laminado teniendo en cuenta la frecuencia crítica, masa superficial y factor de pérdidas de cada uno de los elementos que compone dicho vidrio laminado.[6]

$$\eta_{eq} = \frac{\left[\eta_1 m_1 \left(\frac{1}{f_{c1}} \right)^2 + \eta_2 m_2 \left(\frac{1}{f_{c2}} \right)^2 + \eta_3 m_3 \left(\frac{1}{f_{c3}} \right)^2 \right]}{(2\pi)^2 B_{eq} / c^4} \quad (23)$$

Sin embargo, aunque es una expresión dimensionalmente correcta, lleva a unos resultados poco fiables puesto que el resultado viene altamente influenciado por el factor de pérdidas del

monolítico. Es decir, el factor de pérdidas que se obtiene mediante esta expresión es prácticamente igual al factor de pérdidas del monolítico.

Como ejemplo, supongamos un vidrio lamidazo 33.1.

$m_1=m_3$ (kg/m ²)	6,9	m_2 (kg/m ²)	1
$\eta_1=\eta_3$	0,01	η_2	0,4
$f_{c1}=f_{c3}$ (Hz)	4032,1	f_{c2} (Hz)	1000000
$B_1=B_3$ (N.m)	143,66	B_2 (N.m)	0,00034

Tabla 22: Datos del supuesto vidrio laminado 33.1.

Resulta un η_{eq} de 0,01.

Analizando la expresión se ve observa claramente que, debido a la alta frecuencia crítica del PVB se disminuye el término del sumando del numerador correspondiente al PVB al orden de 10^{-13} siendo 10^4 menor que los demás sumandos y por tanto cuasi despreciable, evitando así la contribución debida al PVB que es, sin embargo, el elemento del conjunto que mayor factor de pérdidas tiene.

Analizando la expresión anterior conceptualmente se observa que es una expresión que no tiene en cuenta el factor de acoplamiento entre elementos, sino que tiene su base en la expresión de la impedancia mecánica (Z_m) de tres capas impermeables. En concreto en la parte resistiva (R_m) de la impedancia y efectivamente no tiene en cuenta los factores de acoplamiento entre capas sino las capas individualmente. [6]

$$Z_m = R_m + jX_m$$

$$Z_m = \sum_{i=1..3} Z_{mi} = \sum_i \eta_i 2\pi f m_i \left(\frac{f}{f_{ci}} \right)^2 \text{sen}^4 \theta + j 2\pi f m_i \left(1 - \left(\frac{f}{f_{ci}} \right)^2 \text{sen}^4 \theta \right) \quad (24)$$

$$R_m \approx 2\pi f \text{sen}^4 \theta \left[\eta_1 m_1 \left(\frac{f}{f_{c1}} \right)^2 + \eta_2 m_2 \left(\frac{f}{f_{c2}} \right)^2 + \eta_3 m_3 \left(\frac{f}{f_{c3}} \right)^2 \right] \quad (25)$$

Para obtener una expresión que considere términos de acoplamiento debemos recurrir a análisis estadísticos energéticos [9], [10], método SEA, a partir del cual se extraiga una expresión, a priori, mucho más sencilla que la anterior, que contemple el factor de pérdidas del PVB, el de los monolíticos y los factores de acoplamiento entre ellos.

$$\eta_{eq} = \sum_i \eta_i + \sum_{i \neq j} \eta_{ij} \quad (26)$$

Siendo η_{ij} el factor de acoplamiento entre las capas i y j , y η_i el factor de pérdidas del elemento i .

Tomando como factor de pérdidas para el vidrio de 0,01, para el PVB normal 0,3 y 1 para el PVB acústico [11], [12]:

MUESTRAS	Factor pérdidas total (tendencia)	η_1	η_2	η_3	η_4	η_{ii}
4	0,113	0,01	0,3	0,3	0,01	-0,507
6	0,252	0,01	1	1	0,01	-1,768

Tabla 23: Simulación del método SEA.

Se obtiene que el factor de acoplo es negativo y resulta que en valor absoluto es cercano al valor del factor de pérdidas mayor de los elementos, con lo que presenta un *acoplo fuerte* y, por tanto, no despreciable.

Mediante modelos constitutivos del material, [6], [13], [14], también es posible aproximar el factor de pérdidas equivalente de un vidrio laminado de tres capas y simétrico del siguiente modo:

$$\eta_{eq} = \eta_2 \frac{2E_3 d_3 a^2}{B} \frac{g}{|1 + (1 + j\eta_2)g|^2} \quad (27)$$

$$B_{eq} = 2B_1 \left[1 + \frac{E_3 d_3 a^2 g_i}{B_1} \frac{1 + g(1 + \eta_2^2)}{|1 + (1 + j\eta_2)g|^2} \right] \approx 2B_1 \left(1 + \frac{3g}{1 + g} \right) \quad (28)$$

Donde E_3 es el módulo de Young del vidrio (N/m^2) y d_i el espesor de la capa i -ésima (m), $a \approx d_1/2$. y g el parámetro de cizalladura (shear parameter).

Sin embargo, no se disponen de los datos necesarios para caracterizar este factor de pérdidas debido a que las muestras de monolíticos son de diferentes espesores a los monolíticos que conforman las demás muestras de vidrios laminados.

III.2. MODELOS DE AISLAMIENTO ACUSTICO.

En el presente capítulo se utilizarán los modelos de aislamiento acústico citados en el capítulo II.3 para la evaluación del aislamiento acústico de diferentes tipos de vidrios laminados.

La frecuencia de resonancia considerada es la media de los tres ensayos realizados en cada muestra. La rigidez a flexión se extrae, por tanto de la expresión (12) y la frecuencia crítica [8] a través de la expresión:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (29)$$

Con ello, además de c (velocidad de propagación del sonido en el aire), ρ_s (densidad superficial de la muestra), ρ (densidad volumétrica del aire), L (longitud de la muestra) y η (factor de pérdidas), se realizan los cálculos del aislamiento acústico de cada muestra empleando cada uno de los tres métodos considerados. Se obtienen resultados tanto 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 [15], y R_A , obtenido según dB-HR del CTE [16]. Además se comparan con los resultados tabulados en la norma UNE-EN 12758:2002 [17].

De este modo, se obtiene los siguientes resultados:

MUESTRA 1 (Monolítico de 6mm espesor y 180mm de longitud)

ρ_s (kg/m^2)	14,7
ρ (kg/m^3)	1,21

c (m/s)	346,6
B (N.m)	44,97
F _c (Hz)	10931,37

Tabla 24: Datos de entrada para la muestra 1.

Índice de evaluación	UNE-EN 12758	MODELO AISLAMIENTO	FACTOR DE PÉRDIDAS	
			TENDENCIA	NORMA
			0,063	0,068
R _w dB	31	Ookura&Saito	35	35
		ISO/PAS 16940/2004	34	34
		Sharp	34	34
R _{w,Ctr} dB	28	Ookura&Saito	29	29
		ISO/PAS 16940/2004	29	29
		Sharp	29	29
R _A dBA	29	Ookura&Saito	33,4	33,4
		ISO/PAS 16940/2004	33,2	33,2
		Sharp	32,9	32,9

Tabla 25: Comparativa entre métodos de predicción, índices de evaluación y valores normalizados dependiendo del valor de factor de pérdidas para la muestra 1.

F(Hz)	TL dB		
	O&S	ISO PAS 16949/2004	SHARP
100	16,6	16,5	16,0
125	18,6	18,4	17,9
160	20,6	20,5	20,1
200	22,5	22,4	22,0
250	24,4	24,3	24,0
315	26,4	26,3	26,0
400	28,4	28,3	28,0
500	30,4	30,3	30,0
630	32,4	32,3	32,0
800	34,4	34,3	34,1
1000	36,4	36,3	36,0
1250	38,4	38,2	37,9
1600	40,4	40,3	40,1
2000	42,1	42,2	42,0
2500	44,2	44,0	44,0
3150	46,0	45,9	46,0

Tabla 26: Pérdidas de transmisión en bandas de tercio de octava. Factor de pérdidas de tendencia de la muestra 1.

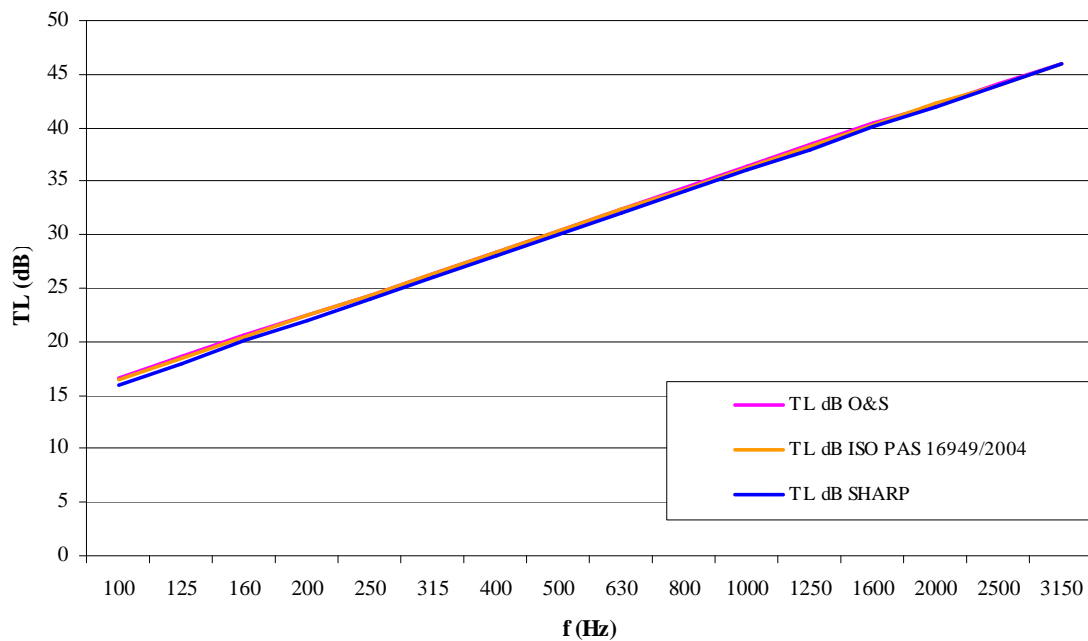


Figura 11: Pérdidas por transmisión para la muestra 1.

f (Hz)	TL dB	
	<i>tendencia</i>	<i>norma</i>
	O&S	O&S
100	16,6	16,6
125	18,6	18,6
160	20,6	20,6
200	22,5	22,5
250	24,4	24,4
315	26,4	26,4
400	28,4	28,4
500	30,4	30,4
630	32,4	32,4
800	34,4	34,4
1000	36,4	36,4
1250	38,4	38,4
1600	40,4	40,4
2000	42,1	42,1
2500	44,2	44,2
3150	46,0	46

Tabla 27: Desviación en el aislamiento acústico entre valores de factor de pérdidas considerados en la muestra 1.

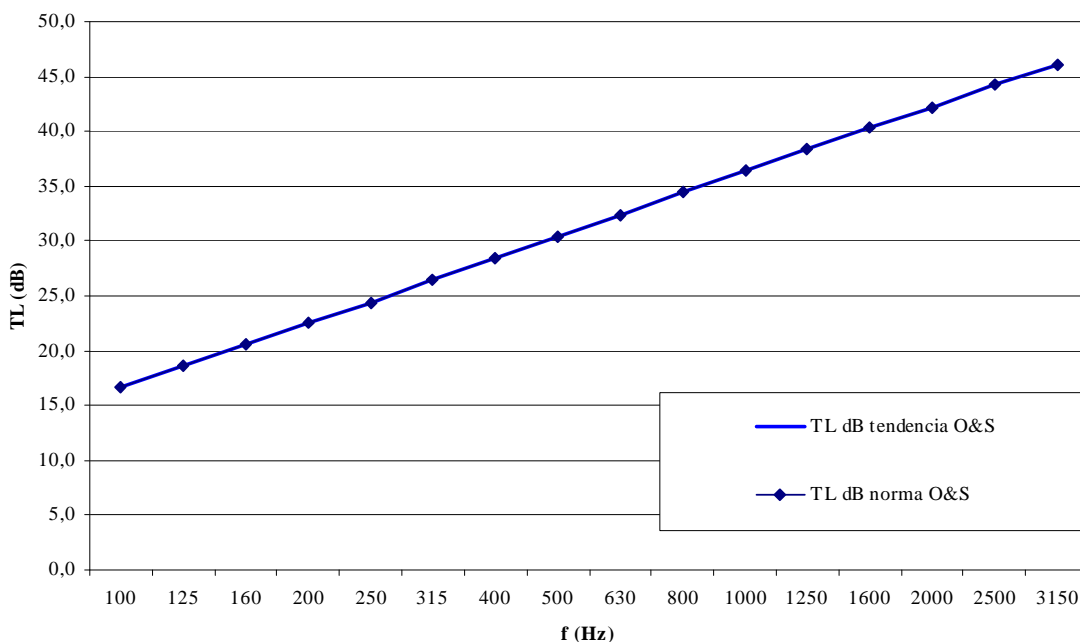


Figura 12: Representación gráfica de la tabla 27.

MUESTRA 2 (Monolítico de 6mm espesor y 380mm de longitud)

ρ_s (kg/m ²)	14,7
ρ (kg/m ³)	1,21
c (m/s)	346,6
B (N.m)	2467,55
F _c (Hz)	1475,72

Tabla 28: Datos de entrada para la muestra 2.

Índice de evaluación	UNE-EN 12758	MODELO AISLAMIENTO	FACTOR DE PÉRDIDAS	
			TENDENCIA	NORMA
			0,019	0,018
R _w dB	31	Ookura&Saito	31	31
		ISO/PAS 16940/2004	29	29
		Sharp	31	31
R _{w,Ctr} dB	28	Ookura&Saito	28	28
		ISO/PAS 16940/2004	26	26
		Sharp	28	28
R _A dBA	29	Ookura&Saito	28,7	28,6
		ISO/PAS 16940/2004	26,0	25,8
		Sharp	29,2	29,1

Tabla 29: Comparativa entre métodos de predicción, índices de evaluación y valores normalizados dependiendo del valor de factor de pérdidas para la muestra 2.

F(Hz)	TL dB		
	O&S	ISO PAS 16949/2004	SHARP
100	16,6	16,3	15,8
125	18,5	18,2	17,8

160	20,5	20,2	19,9
200	22,4	22,1	21,9
250	24,3	24,0	23,8
315	26,2	25,9	25,8
400	28,1	27,9	27,9
500	29,9	29,6	29,8
630	31,5	31,3	31,8
800	32,8	32,7	33,3
1000	33,5	33,5	33,3
1250	32,2	32,9	30,9
1600	23,6	19,9	26,1
2000	26,6	24,6	29,0
2500	29,6	28,7	31,9
3150	33,3	32,4	34,9

Tabla 30: Pérdidas de transmisión en bandas de tercio de octava. Factor de pérdidas de tendencia de la muestra 2.

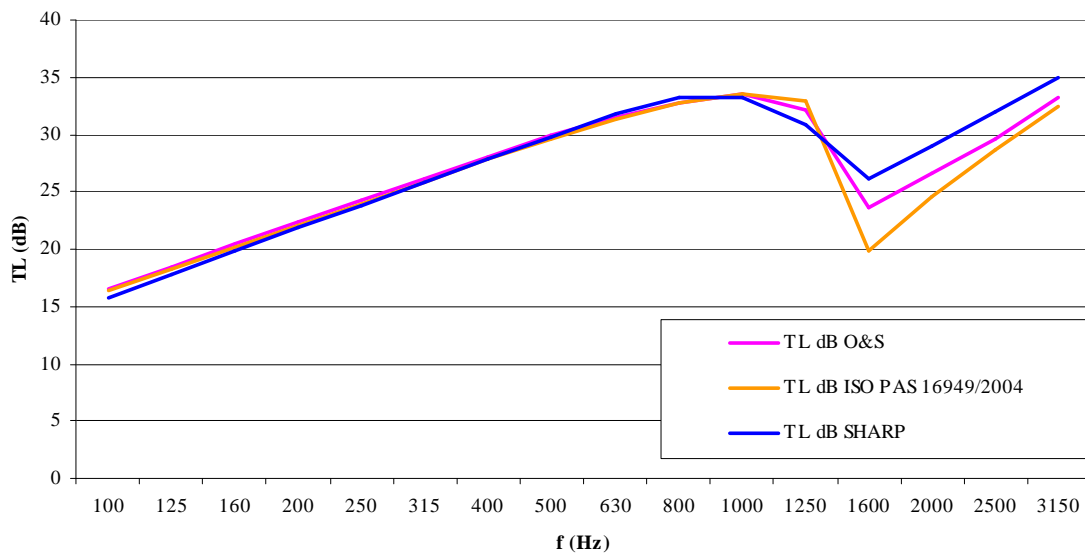


Figura 13: Pérdidas por transmisión para la muestra 2.

f (Hz)	TL dB	
	<i>tendencia</i>	<i>norma</i>
	O&S	O&S
100	16,6	16,6
125	18,5	18,5
160	20,5	20,5
200	22,4	22,4
250	24,3	24,3
315	26,2	26,2
400	28,1	28,1
500	29,9	29,9
630	31,5	31,5
800	32,8	32,8
1000	33,5	33,5
1250	32,2	32,2

1600	23,6	23,5
2000	26,6	26,5
2500	29,6	29,4
3150	33,3	33,1

Tabla 31: Desviación en el aislamiento acústico entre valores de factor de pérdidas considerados en la muestra 2.

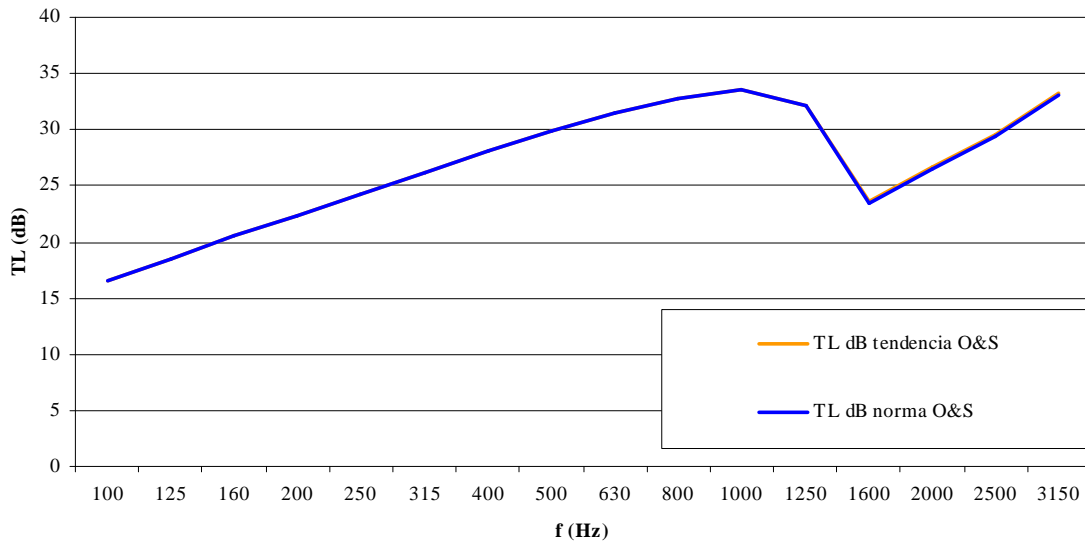


Figura 14: Representación gráfica de la tabla 31.

MUESTRA 3 (laminado 33.2 Normal)

ρ_s (kg/m ²)	15,612
ρ (kg/m ³)	1,21
c (m/s)	346,6
B (N.m)	42,95
F _c (Hz)	11527,62

Tabla 32: Datos de entrada para la muestra 3.

Índice de evaluación	UNE-EN 12758	MODELO AISLAMIENTO	FACTOR DE PÉRDIDAS	
			TENDENCIA	NORMA
			0,178	0,190
R _w dB	32	Ookura&Saito	35	35
		ISO/PAS 16940/2004	35	35
		Sharp	35	35
R _{w,Ctr} dB	29	Ookura&Saito	30	30
		ISO/PAS 16940/2004	30	30
		Sharp	29	29
R _A dBA	31	Ookura&Saito	33,9	33,9
		ISO/PAS 16940/2004	33,7	33,7
		Sharp	33,4	33,4

Tabla 33: Comparativa entre métodos de predicción, índices de evaluación y valores normalizados dependiendo del valor de factor de pérdidas para la muestra 3.

F(Hz)	TL dB		
	O&S	ISO PAS 16949/2004	SHARP
100	17,1	17,0	16,5
125	19,1	18,9	18,5
160	21,1	21,0	20,6
200	23,0	22,9	22,5
250	25,0	24,8	24,5
315	27,0	26,8	26,5
400	29,0	28,9	28,6
500	31,0	30,8	30,5
630	33,0	32,8	32,5
800	35,0	34,9	34,6
1000	36,9	36,8	36,5
1250	38,9	38,7	38,5
1600	40,9	40,8	40,6
2000	42,6	42,7	42,5
2500	44,7	44,6	44,5
3150	46,6	46,4	46,5

Tabla 34: Pérdidas de transmisión en bandas de tercio de octava. Factor de pérdidas de tendencia de la muestra 3.

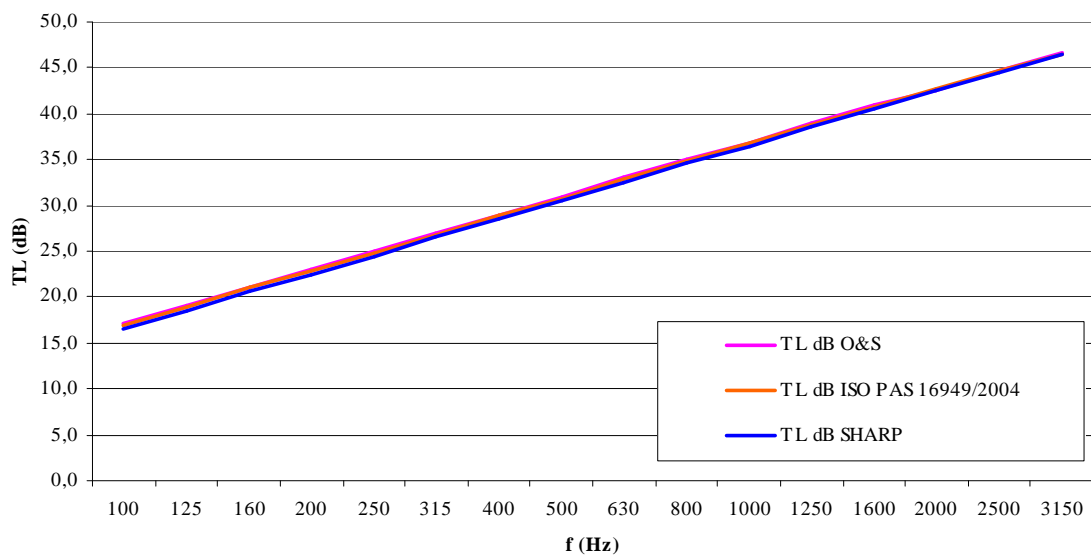


Figura 15: Pérdidas por transmisión para la muestra 3.

f (Hz)	TL dB	
	<i>tendencia</i>	<i>norma</i>
	O&S	O&S
100	17,1	17,1
125	19,1	19,1

160	21,1	21,1
200	23,0	23,0
250	25,0	25,0
315	27,0	27,0
400	29,0	29,0
500	31,0	31,0
630	33,0	33,0
800	35,0	35,0
1000	36,9	36,9
1250	38,9	38,9
1600	40,9	40,9
2000	42,6	42,6
2500	44,7	44,7
3150	46,6	46,6

Tabla 35: Desviación en el aislamiento acústico entre valores de factor de pérdidas considerados en la muestra 3.

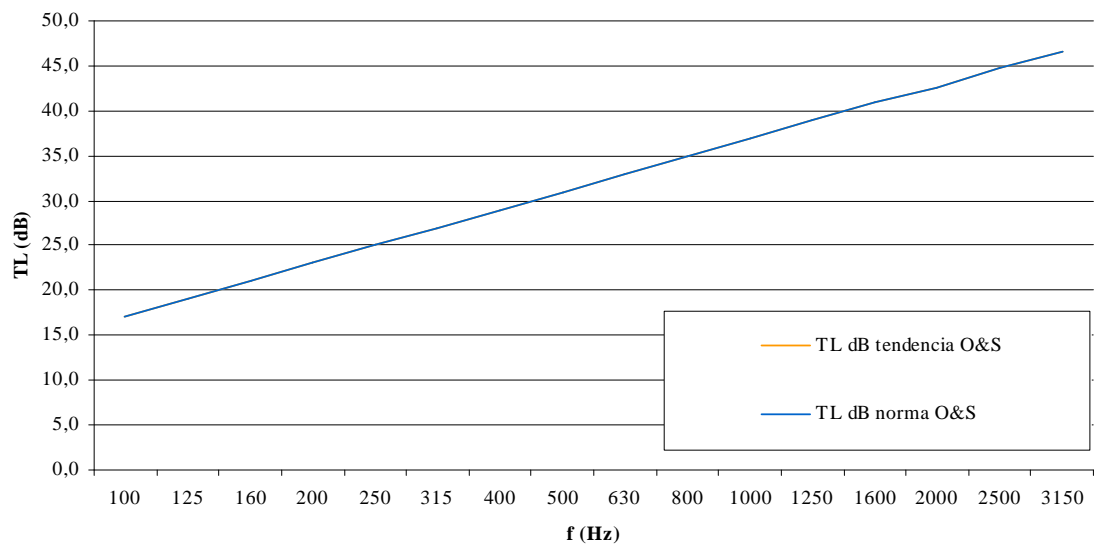


Figura 16: Representación gráfica de la tabla 35.

MUESTRA 4 (laminado 44.2 Normal)

ρ_s (kg/m ²)	20,512
ρ (kg/m ³)	1,21
c (m/s)	346,6
B (N.m)	5451,59
F _c (Hz)	1172,79

Tabla 36: Datos de entrada para la muestra 4.

Índice de evaluación	UNE-EN 12758	MODELO AISLAMIENTO	FACTOR DE PÉRDIDAS	
			TENDENCIA	NORMA
			0,113	0,107
R _w dB	33	Ookura&Saito	34	34
		ISO/PAS 16940/2004	34	34
		Sharp	36	35
R _{w,Ctr} dB	30	Ookura&Saito	31	31
		ISO/PAS 16940/2004	30	30
		Sharp	31	31
R _A dBA	32	Ookura&Saito	33	32,9
		ISO/PAS 16940/2004	32,4	32,3
		Sharp	34,5	34,4

Tabla 37: Comparativa entre métodos de predicción, índices de evaluación y valores normalizados dependiendo del valor de factor de pérdidas para la muestra 4.

F(Hz)	TL dB		
	O&S	ISO PAS 16949/2004	SHARP
100	19,4	19,1	18,7
125	21,4	21,0	20,7
160	23,3	23,1	22,8
200	25,2	24,9	24,8
250	27,1	26,8	26,7
315	29,0	28,7	28,7
400	30,8	30,5	30,8
500	32,4	32,1	32,7
630	33,7	33,5	34,3
800	34,4	34,4	35,2
1000	33,4	33,9	35,0
1250	29,1	28,3	34,5
1600	33,0	32,2	37,7
2000	37,2	36,8	40,6
2500	41,3	40,7	43,5
3150	44,9	44,4	46,5

Tabla 38: Pérdidas de transmisión en bandas de tercio de octava. Factor de pérdidas de tendencia de la muestra 4.

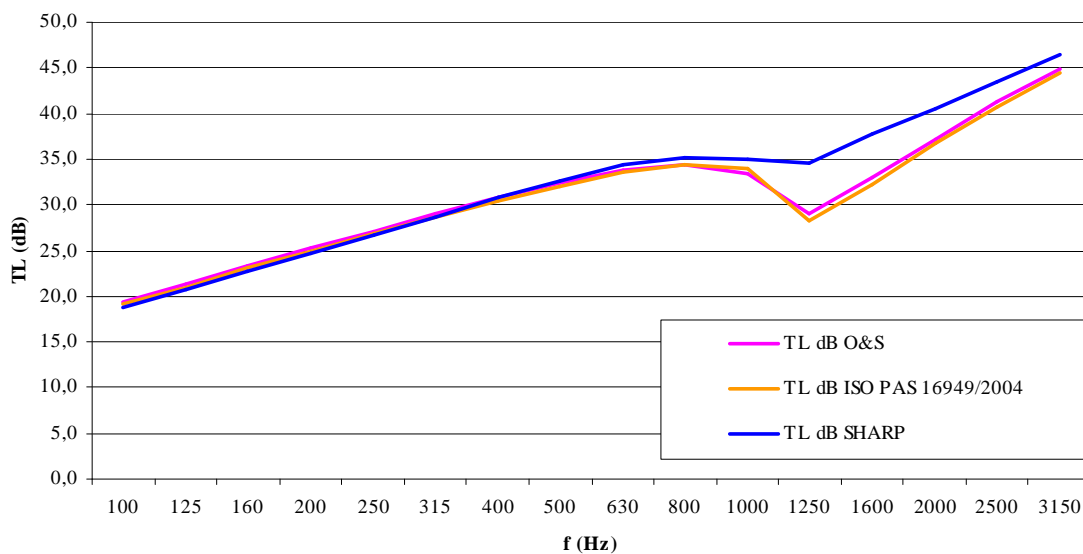


Figura 17: Pérdidas por transmisión para la muestra 4.

f (Hz)	TL dB	
	<i>tendencia</i>	<i>norma</i>
	O&S	O&S
100	19,4	19,4
125	21,4	21,4
160	23,3	23,3
200	25,2	25,2
250	27,1	27,1
315	29,0	29
400	30,8	30,8
500	32,4	32,4
630	33,7	33,7
800	34,4	34,4
1000	33,4	33,3
1250	29,1	28,9
1600	33,0	32,7
2000	37,2	37
2500	41,3	41,1
3150	44,9	44,7

Tabla 39: Desviación en el aislamiento acústico entre valores de factor de pérdidas considerados en la muestra 4.

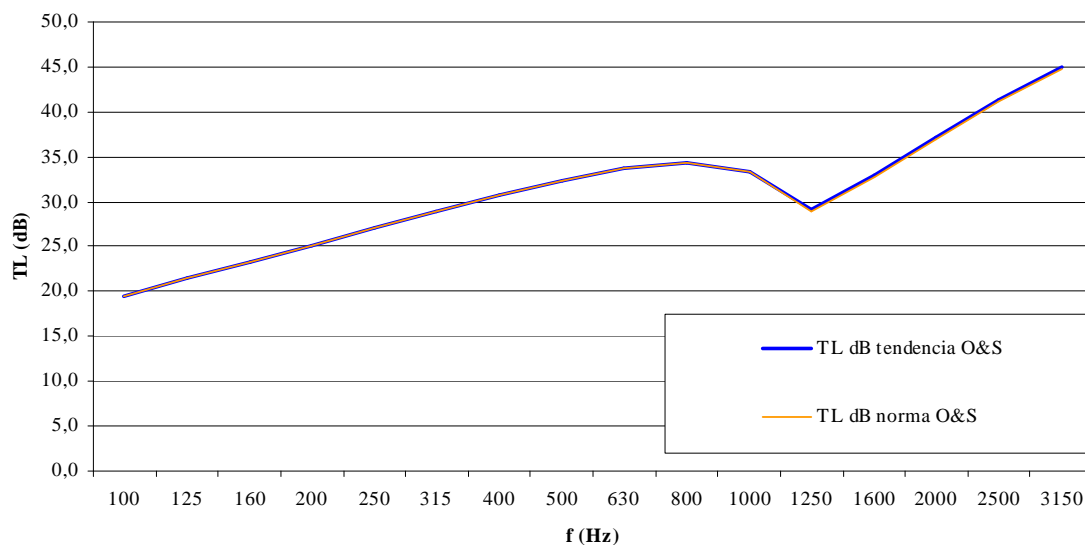


Figura 18: Representación gráfica de la tabla 39

MUESTRA 5 (laminado 33.2 Acústico)

ρ_s (kg/m ²)	15,61
ρ (kg/m ³)	1,21
c (m/s)	346,6
B (N.m)	21,04
F _c (Hz)	16468,03

Tabla 40: Datos de entrada para la muestra 5.

Índice de evaluación	UNE-EN 12758	MODELO AISLAMIENTO	FACTOR DE PÉRDIDAS	
			TENDENCIA	NORMA
			0,206	0,221
R _w dB	32	Ookura&Saito	35	35
		ISO/PAS 16940/2004	35	35
		Sharp	35	35
R _{w,Ctr} dB	29	Ookura&Saito	30	30
		ISO/PAS 16940/2004	30	30
		Sharp	29	29
R _A dBA	31	Ookura&Saito	33,9	33,9
		ISO/PAS 16940/2004	33,8	33,8
		Sharp	33,4	33,4

Tabla 41: Comparativa entre métodos de predicción, índices de evaluación y valores normalizados dependiendo del valor de factor de pérdidas para la muestra 5.

F(Hz)	TL dB		
	O&S	ISO PAS 16949/2004	SHARP
100	17,1	17,0	16,5
125	19,1	18,9	18,5
160	21,1	21,0	20,6
200	23,0	22,9	22,5
250	25,0	24,8	24,5

315	27,0	26,8	26,5
400	29,0	28,9	28,6
500	31,0	30,8	30,5
630	33,0	32,8	32,5
800	35,0	34,9	34,6
1000	37,0	36,8	36,5
1250	39,0	38,7	38,5
1600	41,0	40,9	40,6
2000	42,7	42,8	42,5
2500	44,8	44,7	44,5
3150	46,8	46,6	46,5

Tabla 42: Pérdidas de transmisión en bandas de tercio de octava. Factor de pérdidas de tendencia de la muestra 5.

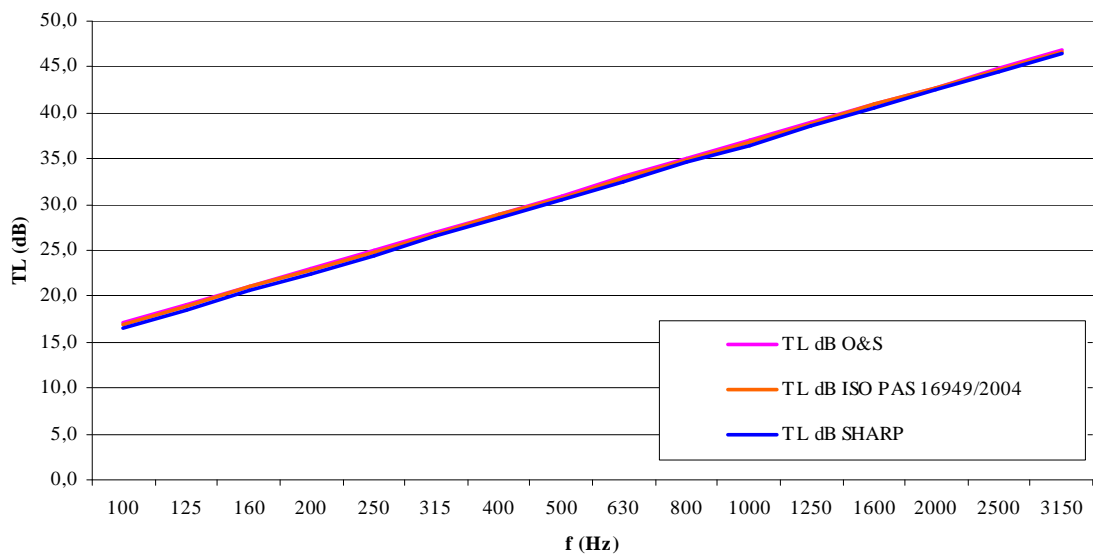


Figura 19: Pérdidas por transmisión para la muestra 5.

f (Hz)	TL dB	
	<i>tendencia</i>	<i>norma</i>
	O&S	O&S
100	17,1	17,1
125	19,1	19,1
160	21,1	21,1
200	23,0	23,0
250	25,0	25,0
315	27,0	27,0
400	29,0	29,0
500	31,0	31,0
630	33,0	33,0
800	35,0	35,0
1000	37,0	37,0
1250	39,0	39,0
1600	41,0	41,0
2000	42,7	42,7
2500	44,8	44,8
3150	46,8	46,8

Tabla 43: Desviación en el aislamiento acústico entre valores de factor de pérdidas considerados en la muestra 5.

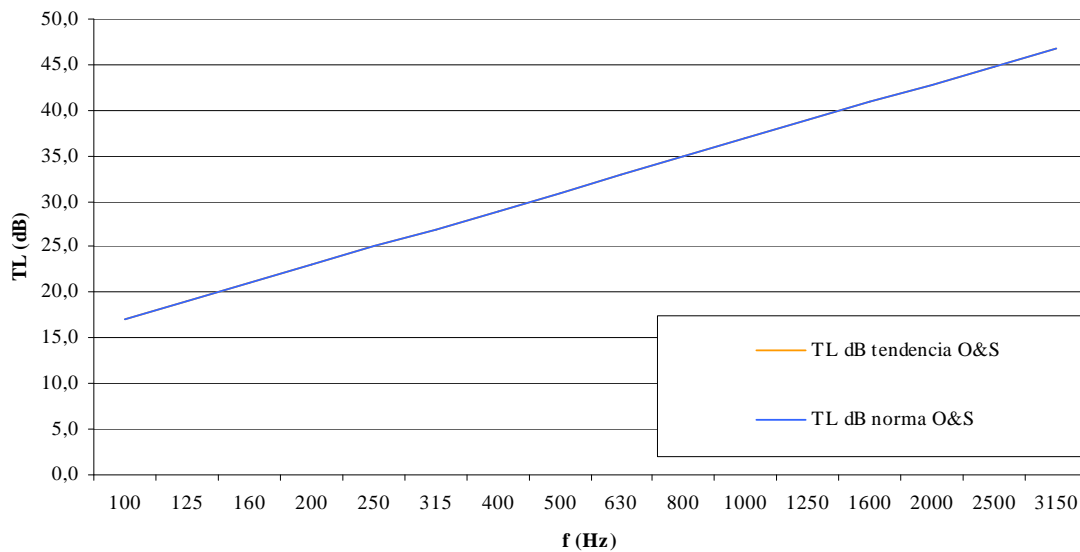


Figura 20: Representación gráfica de la tabla 43.

MUESTRA 6 (laminado 44.2 Acústico)

ρ_s (kg/m ²)	20,51
ρ (kg/m ³)	1,21
c (m/s)	346,6
B (N.m)	3923,13
F _c (Hz)	1382,50

Tabla 44: Datos de entrada para la muestra 6.

Índice de evaluación	UNE-EN 12758	MODELO AISLAMIENTO	FACTOR DE PÉRDIDAS	
			TENDENCIA	NORMA
			0,252	0,197
R _w dB	33	Ookura&Saito	36	35
		ISO/PAS 16940/2004	35	35
		Sharp	37	36
R _{w,Ctr} dB	30	Ookura&Saito	32	31
		ISO/PAS 16940/2004	31	31
		Sharp	32	32
R _A dBA	32	Ookura&Saito	34,8	34,3
		ISO/PAS 16940/2004	34,4	34,0
		Sharp	35,5	35,3

Tabla 45: Comparativa entre métodos de predicción, índices de evaluación y valores normalizados dependiendo del valor de factor de pérdidas para la muestra 6.

F(Hz)	TL dB		
	O&S	ISO PAS 16949/2004	SHARP
100	19,4	19,1	18,7
125	21,4	21,0	20,7
160	23,4	23,1	22,8
200	25,2	25,0	24,8
250	27,2	26,9	26,7
315	29,1	28,8	28,7
400	30,9	30,7	30,8
500	32,7	32,4	32,7
630	34,2	34,0	34,7
800	35,5	35,4	36,7
1000	36,0	36,0	38,2
1250	35,1	35,4	39,5
1600	35,8	35,1	41,1
2000	39,8	39,3	44,0
2500	44,1	43,4	46,9
3150	47,9	47,3	49,9

Tabla 46: Pérdidas de transmisión en bandas de tercio de octava. Factor de pérdidas de tendencia de la muestra 6.

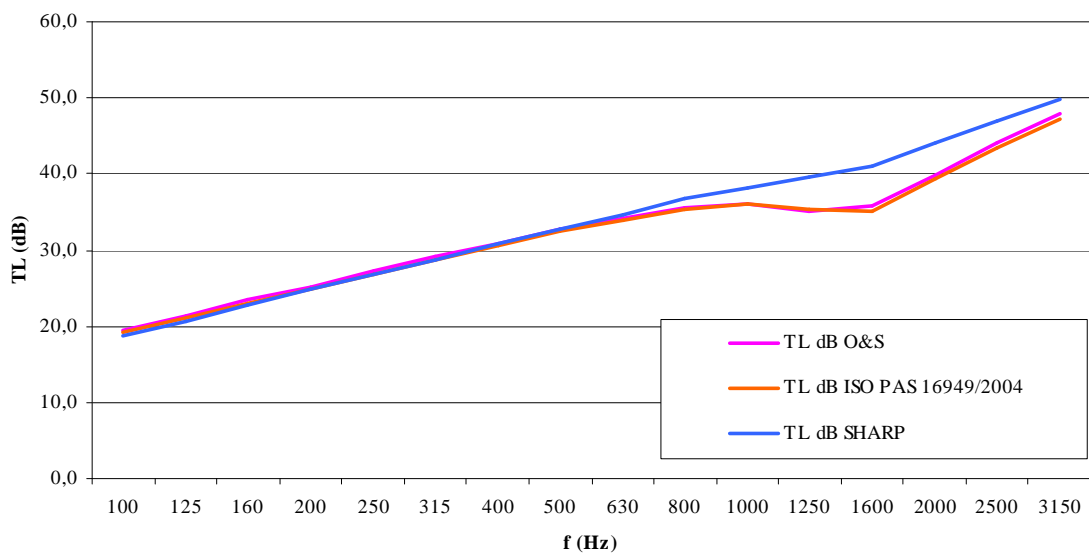


Figura 21: Pérdidas por transmisión para la muestra 6.

f (Hz)	TL dB	
	tendencia	norma
	O&S	O&S
100	19,4	19,4
125	21,4	21,4
160	23,4	23,4
200	25,2	25,2
250	27,2	27,2

315	29,1	29,1
400	30,9	30,9
500	32,7	32,7
630	34,2	34,2
800	35,5	35,5
1000	36,0	35,9
1250	35,1	34,3
1600	35,8	33,7
2000	39,8	38
2500	44,1	42,3
3150	47,9	46,2

Tabla 47: Desviación en el aislamiento acústico entre valores de factor de pérdidas considerados en la muestra 6.

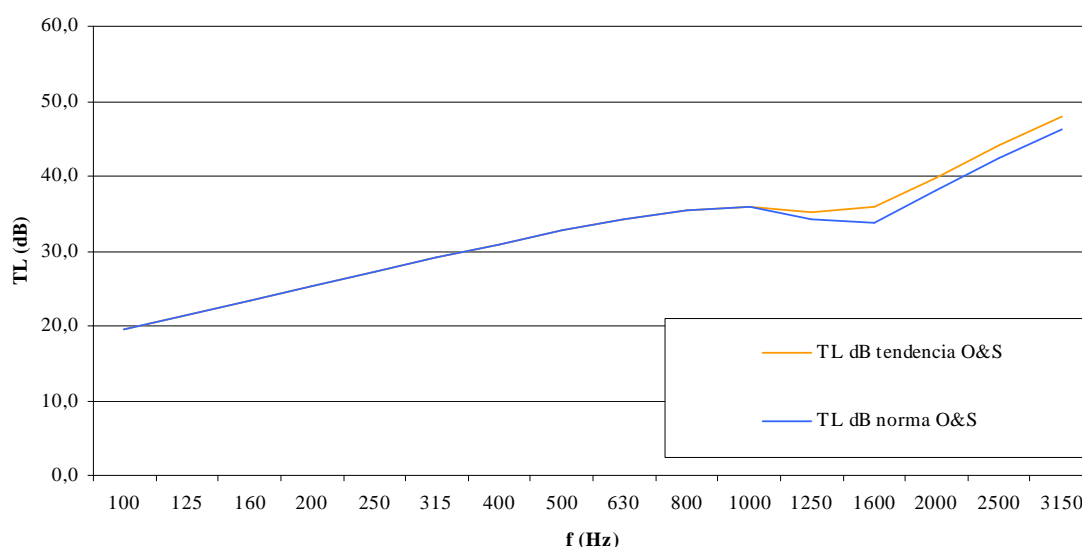


Figura 22: Representación gráfica de la tabla 47.

III.2.1. FACTOR DE PÉRDIDAS ÓPTIMO.

Como hemos ido comprobando durante el desarrollo del texto, el factor de pérdidas del PVB, es determinante tanto en el factor de pérdidas global del vidrio laminado como en el valor del aislamiento acústico resultante.

Se aborda en este apartado la cuestión de qué número de láminas de PVB son eficientemente intercaladas en el vidrio laminado desde el punto de vista de la eficiencia acústica. Para ello, una posibilidad; aunque errónea, sería realizar la predicción con Ookura & Saito [5], [6], con un modelo de tres capas impermeables e ir añadiendo capas intercaladas. Sin embargo, no obtendríamos resultados fiables puesto que este modelo se implementa con contribución de la impedancia mecánica (Z_m) y como vimos en punto III.1.3.1 el factor de pérdidas del conjunto (vidrio laminado) no corresponde con los valores reales debida a la aproximación en R_m . Es decir,

utilizando este método se va aumentando el aislamiento acústico pero únicamente por el aumento de masa al intercalar capas no debido al aumento del factor de pérdidas puesto que éste siempre resultaría del orden del factor de pérdidas del vidrio: 0,01.

Debido a ello y a sabiendas de que el aumento del factor de pérdidas de un vidrio laminado se realiza aumentando el número de láminas intercaladas, PVB, se utiliza el método de Ookura&Saito [5], [6] para un modelo de una capa impermeable formada por el laminado (vidrio + PVB + vidrio) al que iremos aumentando el factor de pérdidas a para ver su efecto en el valor de aislamiento acústico.

Partimos de valores de factor de pérdidas de vidrios laminados simétricos con dos láminas intercaladas de PVB.

tipo de vidrio	factor pérdidas	R_W	$R_W + C_{TR}$	R_A
44.2	0,113	34	30	32,8
44.2x2	0,226	35	31	34,0
44.2x3	0,339	36	31	34,6
44.2x4	0,452	36	32	34,9
44.2x5	0,565	36	32	35,2
44.2x6	0,678	36	32	35,4
44.2x7	0,791	37	32	35,5
44.2x8	0,904	37	32	35,6
44.2x9	1,017	37	32	35,7
44.2x10	1,130	37	32	35,8
44.2x11	1,243	37	32	35,9
44.2x12	1,356	37	32	35,9
44.2x13	1,469	37	32	36,0
44.2x14	1,582	37	32	36,1
44.2x20	2,260	38	32	36,4
44.2x50	5,650	38	33	37,2

Tabla 48: Simulación del factor de pérdidas máximo.

En la nomenclatura para el tipo de vidrio de las tabla 48 se utiliza 44.2xi para indicar el factor por el que se multiplica el factor de pérdidas obtenido para el vidrio 44.2.

Se obtiene para cada banda de frecuencia:

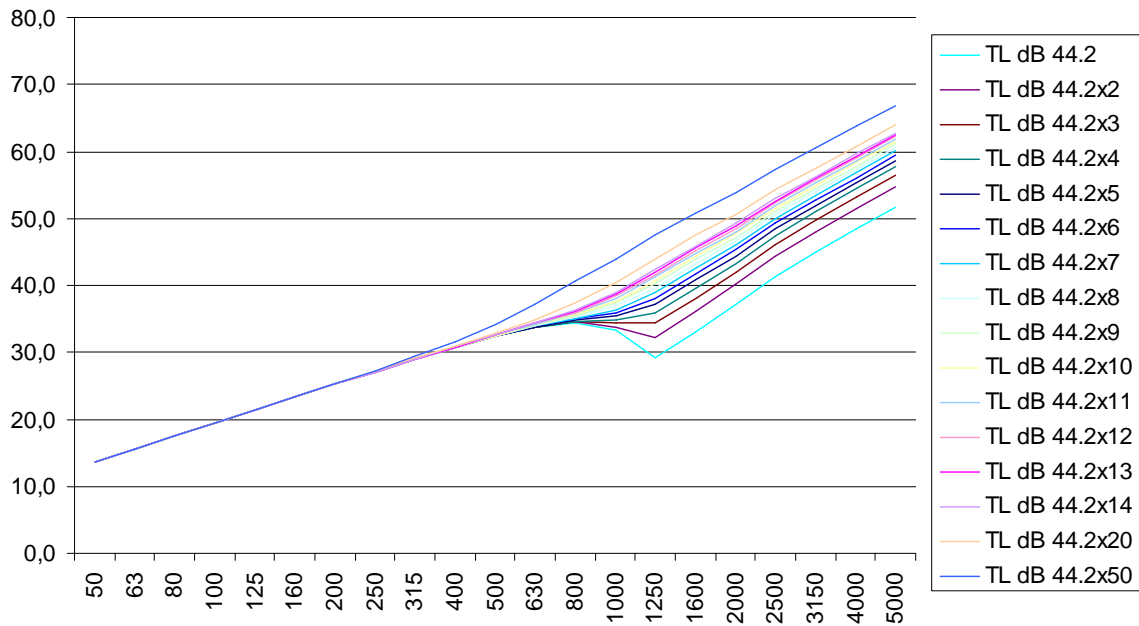


Figura 23: Simulación del factor de pérdidas máximo.

Como se puede observar en los resultados el aumento del factor de pérdidas hace disminuir la deficiencia de aislamiento acústico entorno a la frecuencia crítica hasta un máximo, región gobernada por la masa, en la que se aumenta el aislamiento en 6dB por octava.

Como se ha comentado, el aumento del factor de pérdidas de un vidrio laminado se realiza aumentando el número de láminas intercaladas, PVB. Por tanto, un juicio de acuerdo al compromiso de no aumentar la rigidez del conjunto, ser constructivamente factible y con una notable mejora acústica resulta en factores de pérdidas resultado de la suma de dos o tres intercalados como se verá a continuación:

Según [18], [19], el valor máximo del factor de pérdidas para vidrio laminado simétrico puede extraerse de la expresión:

$$\eta_{opt} \approx \frac{3\eta_2}{5 + 4\sqrt{1 + \eta_2^2}} \quad (30)$$

Aproximando esta expresión al caso en el que η_2 es el resultado del factor de pérdidas de la totalidad de los intercalados y utilizando el sumatorio de los factores de pérdidas de las láminas intercaladas como aproximación del método SEA [9], [10]:

$$\eta_2 = \sum_i^N \eta_i = N \cdot \eta_i \quad (31)$$

Siendo η_i el factor de pérdida del intercalario y N el número de intercalados.

Se obtiene:

$$\eta_{max} \approx \frac{3 \cdot N \cdot \eta_i}{5 + 4\sqrt{1 + (N \cdot \eta_i)^2}} \quad (32)$$

Mediante los datos obtenidos del factor de pérdidas (tendencia) y sabiendo que existen dos PVB intercalados en las muestras, se puede ajustar iterativamente el valor del factor de pérdidas de una única lámina de PVB para posteriormente conformar laminados con tres o cuatro intercalados.

De este modo se obtiene que:

Tipo de vidrio	Factor pérdidas del laminado	R_w	$R_w + C_{TR}$	R_A
8mm	0,010	32	29	30,0
44.1	0,060	33	30	31,5
44.2	0,113	34	30	33,0
44.3	0,170	35	31	33,7
44.4	0,218	35	31	34,1
44.1A	0,158	35	31	34,0
44.2A	0,292	36	32	34,8
44.3A	0,369	36	32	35,0
44.4A	0,430	36	32	35,1

Tabla 49: Aislamiento acústico (O&S) para diferentes configuraciones de vidrios laminados.

F (Hz)	TL dB							
	44.1	44.2	44.3	44.4	44.1A	44.2A	44.3A	44.4A
50	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
63	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
80	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
100	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
125	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
160	23,3	23,3	23,3	23,3	23,4	23,4	23,4	23,4
200	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
250	27,1	27,1	27,1	27,1	27,2	27,2	27,2	27,2
315	29,0	29,0	29,0	29,0	29,1	29,1	29,1	29,1
400	30,7	30,8	30,8	30,8	30,9	30,9	30,9	30,9
500	32,4	32,4	32,4	32,4	32,7	32,7	32,7	32,7
630	33,7	33,7	33,7	33,7	34,2	34,2	34,2	34,3
800	34,4	34,4	34,4	34,5	35,4	35,5	35,5	35,5
1000	33,2	33,4	33,6	33,7	35,8	36,0	36,1	36,2
1250	26,8	29,1	30,9	32,1	34,0	35,1	35,7	36,2
1600	30,3	33,0	34,8	35,9	32,5	35,8	37,1	38,0
2000	34,7	37,2	38,9	40,0	37,0	39,8	40,9	41,6
2500	38,6	41,3	43,0	44,1	41,4	44,1	45,1	45,9
3150	42,3	44,9	46,7	47,8	45,2	47,9	48,9	49,6
4000	45,7	48,4	50,1	51,2	48,8	51,5	52,5	53,2
5000	49,0	51,7	53,5	54,6	52,2	54,9	55,9	56,6

Tabla 50: Aislamiento acústico en tercios de octava (O&S) para diferentes configuraciones de vidrios laminados.

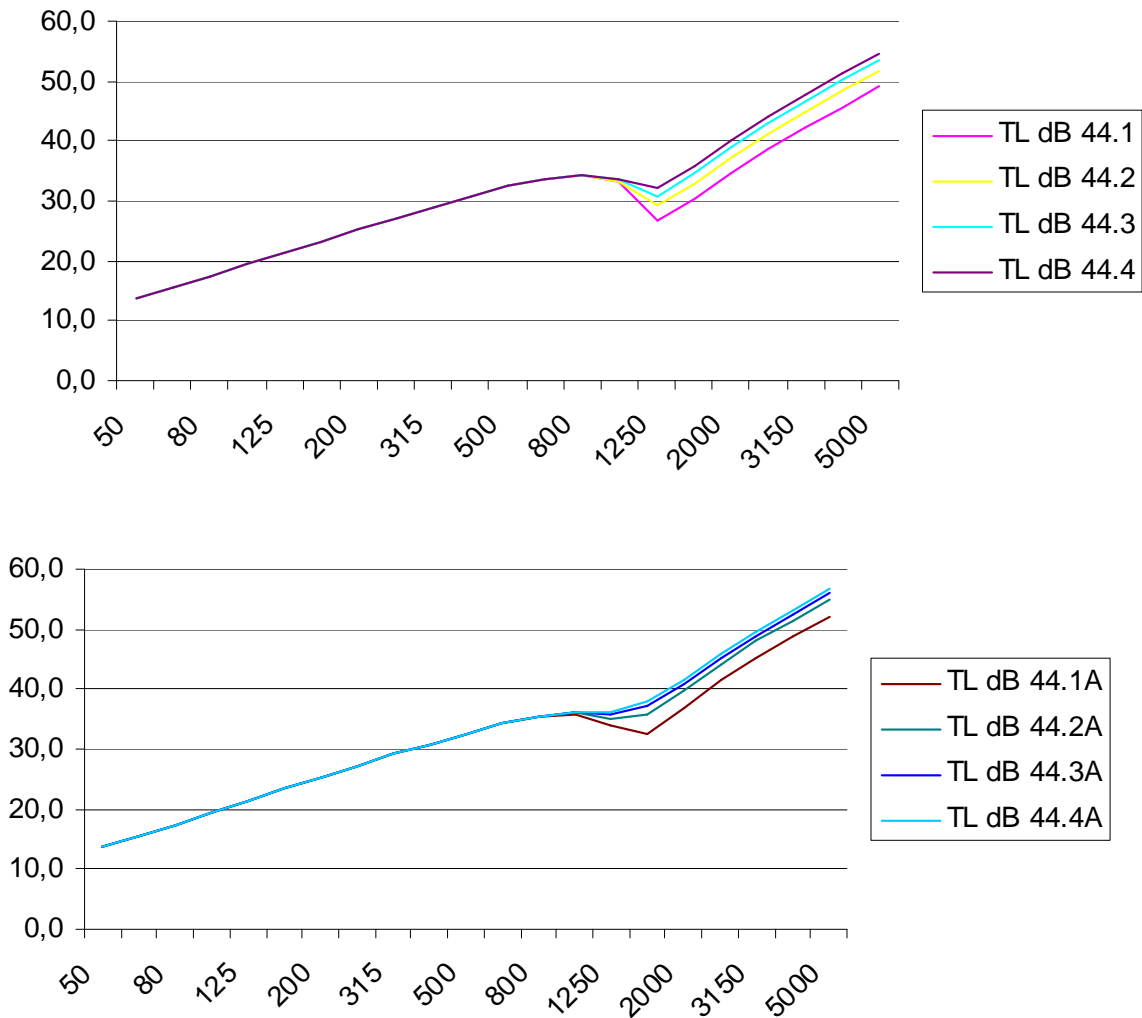


Figura 24: Pérdidas por transmisión para diferente número de láminas intercaladas. Arriba para intercalario de PVB Normal, abajo para intercalario de PVB Acústico.

En la siguiente tabla se muestran las diferencias en dBA al intercalar dos, tres ó cuatro láminas de PVB respecto a la colocación de una.

Tipo de vidrio	Diferencias 44.1	Diferencias parciales
44.1	0	--
44.2	1,5	1,3
44.3	2,2	0,7
44.4	2,6	0,4
Tipo de vidrio	Diferencias 44.1A	Diferencias parciales
44.1A	0	--
44.2A	0,8	0,8
44.3A	1,0	0,2
44.4A	1,1	0,1

Tabla 51: Diferencias entre vidrios laminados. Eficacia acústica.

Tanto para PVB normal como acústico el aumento más significativo se encuentra al añadir dos PVB aunque la mejora también es sustancial al intercalar tres para el caso de PVB normal. A partir de ahí, la mejora que se aporta no es significativa.

Del mismo modo, un vidrio laminado con PVB normal 44.1 mejora en 3dBA el aislamiento aportado por un vidrio monolítico de 8mm de espesor y hasta una mejora de 6dBA para el caso de 44.1A.

IV. CONCLUSIONES.

En este apartado se analiza los resultados de los índices, parámetros y/o características obtenidos a lo largo de este trabajo.

Los datos de entrada, función de transferencia de la respuesta vibratoria del sistema (Aceleración/Fuerza), son fruto de la aplicación del proceso de medición de las normas elásticas comentadas en el capítulo II.2 para muestras de diferente tipología de vidrio (monolítico, laminado con PVB normal y laminado con PVB acústico), diferentes espesores y diferentes longitudes.

Los resultados obtenidos del factor de pérdidas varían según la técnica normalizada [3] aplicada (método 3dB ó método ndB) donde existen desviaciones de hasta 0,071. Esta incertidumbre en la determinación justifica el empleo de un método alternativo desarrollado en el capítulo III.1.3. Éste método pretende disminuir la incertidumbre gracias a la tendencia a 0dB en la determinación del factor de pérdidas, muy próximo a la frecuencia de resonancia y por tanto, menos influenciado de las resonancias en bandas adyacentes causante del error en el método normalizado.

Los resultados que se obtienen mediante el desarrollo de este método alternativo difieren del método normalizado hasta un factor de 0,055. Las diferencias obtenidas en el factor de pérdidas son reflejadas en diferencias en el valor del aislamiento acústico, llegando a diferencias en término globales de 0,5dBA para R_A y 1dB para R_w y R_w+C_{tr} .

Los resultados obtenidos en la valoración del aislamiento acústico para las muestras 1, 3 y 5 no son los resultados esperados. La frecuencia crítica es demasiado elevada debido a un error en la determinación de la rigidez a flexión que viene directamente influenciada por la longitud de la muestra, 0'18m, que está fuera del rango dimensional recomendado en la norma ISO/PAS 16940/2004 [4] de referencia que recomienda longitudes de muestra de 0,3m. Sin embargo, los resultados obtenidos para las demás muestras son del orden de las especificadas en la norma UNE-EN 12758: 2002 [17] si bien es cierto que son más próximos a los obtenidos en las muestras con PVB normal.

Además, los resultados obtenidos mediante el método de Ookura & Saito [5], [6] y el método normalizado en la ISO/PAS 16940/2004 [4] guardan entre ellos una alta correlación. Cosa contraria pasa con el modelo de Sharp [8] que tiene mayores desviaciones influenciada claramente por la interpolación de Lagrange que se realiza entorno a la frecuencia crítica.

Por otro lado, en cuanto al factor de pérdidas equivalente, la expresión (23) obtiene resultados altamente influenciados por el factor de pérdidas del monolítico y, por tanto, mucho inferiores a los nominales. Queda justificada que en la aproximación de la parte resistiva de la impedancia mecánica no se tiene en cuenta los términos de interrelación o acoplamiento entre capas. Es por ello que se revisan los conceptos del método SEA [9], [10] y el método constitutivo del material [11], [12].

Finalmente, en cuanto a la optimización de los vidrios laminados se deduce que existe una mejora de 1,5dBA entre un vidrio laminado con PVB normal (44.1) y un vidrio monolítico de igual espesor (8mm). Una mejora de más de 3dBA entre un vidrio laminado con PVB acústico (44.1A) y un vidrio monolítico de igual espesor (8mm). También se deduce que existe una eficacia máxima cuando se colocan dos lámina de PVB (44.2, 44.2A) con mejora de aproximadamente 3 y 4,8dBA para el PVB normal y acústico, respectivamente, que se puede ampliar a tres láminas para el caso de PVB normal con una mejora de 3,7dBA. Sin embargo, la adición de más láminas no produce mejoras significativas en el aislamiento acústico y supone mayor coste en la producción que desencadena en mayor coste final del producto. Es aquí donde se ve claramente el compromiso entre la rentabilidad y la eficacia acústica y por ello, no se comercializan, a penas, vidrios laminados de más de dos intercalados.

V. LINEAS FUTURAS.

Obviamente las líneas abiertas para la optimización de vidrios laminados pasan por la investigación acerca de nuevos materiales intercalarios.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la diferencia entre un vidrio laminado 44.2 con PVB Normal y un vidrio laminado 44.2 con PVB Acústico:

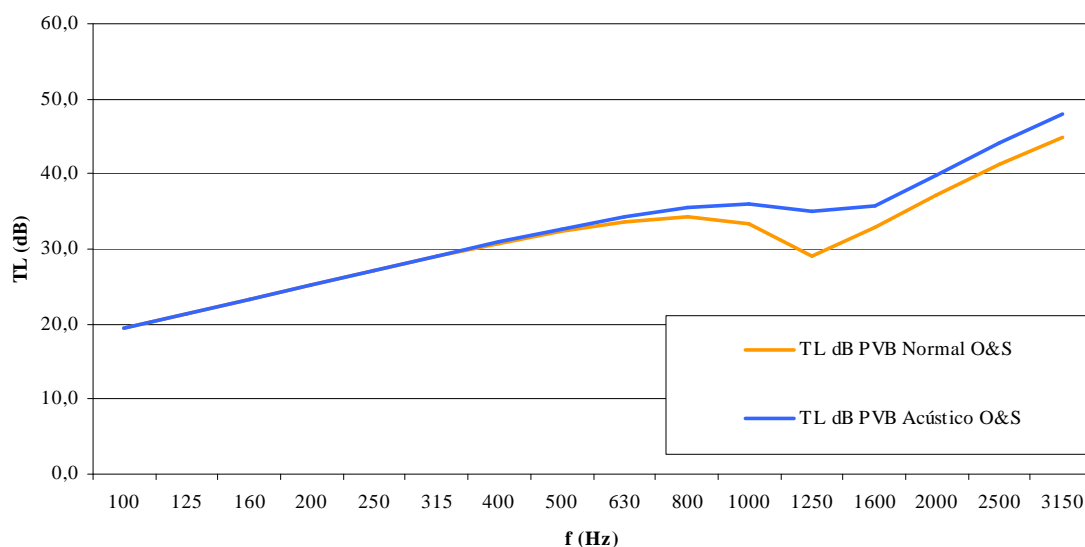


Figura 25: Pérdidas por transmisión dependiendo del tipo de intercalario.

La obtención de un material intercalario que haga aumentar el aislamiento del conjunto con una única lámina (aumentando el factor de pérdidas del conjunto sin repercutir en un amortiguamiento en exceso del mismo) abarataría costes de producción con lo que se obtendría un producto en el mercado eficaz acústicamente y muy competitivo económicamente.

De este modo, el promotor y todos los agentes involucrados en la edificación no dudarían en elegirlo en su proyecto constructivo y por tanto, mejorar la calidad acústica del edificio sin temor alguno acerca del cumplimiento de las exigencias marcadas en el Código Técnico de la Edificación [16].

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 572-1: Vidrio para la construcción. Productos básicos de vidrio. Vidrio de silicato sodocálcico – Parte 1: Definiciones y propiedades generales físicas y mecánicas.
- [2] ASTM/C 623–92: Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance.
- [3] ASTM/E 756–98, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials.
- [4] ISO/PAS 16940:2400(E) – Glass in building – Glazing airborne sound insulation – Measurement of the mechanical impedance of laminated glass.
- [5] Ookura K., Saito Y. “Transmission loss of multiple panels containing sound absorbing material in a random incidence field”. *Internoise 78*, 637-642. 1978.
- [6] T. Baenas, J. Ramis, J. Alba, J. Vera, *Modelos de predicción de las pérdidas por transmisión en vidrios laminados con influencia de las deformaciones elásticas de la lámina polimérica y el acoplamiento entre capas*. Glass Performance Days 2007.
- [7] J. Ramis, J. Alba, E. Escuder,. *Comparativa de distintos algoritmos de simulación de particiones multicapas para aislamiento a ruido aéreo*. *Tecniacústica 2000* (Madrid).
- [8] A. Llopis, A. Uris, I. Guillen. *Cálculo del índice de reducción sonora de ventanas con vidrio laminar*. *Revista de acústica*. Vol. XXXII. Nos 3 y 4
- [9] J. Ramis, J. Alba, J. Carbajo, E. Segovia, J. Frances, *Bases para la obtención de los factores de pérdidas de acoplo (CFL) entre subsistemas de interés en acústica de la edificación*. *Tecniacústica 2009*. Cádiz.
- [10] O. Storf. *Métodos numéricos en acústica: hechos, miedos, futuro*. *Revista de Acústica*. Vol. 38 nº 3 y nº 4.
- [11] R. del Rey, J. Alba., J. Ramis, T. Baenas, *Influencia de las características del ‘shear modulus’ en las pérdidas por transmisión en vidrios laminados*. *Tecniacústica 2006* (Gandía).
- [12] J. Ramis, J. Alba, E. Escuder, J.M^a Gadea, S. Iborra. *Loss factor for monolithic and laminated glasses*. ICSV13 Viena 2006.
- [13] 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.
- [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] UNE-EN ISO 717-1:1999. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1: 1996)
- [16] dB-HR: Documento básico de protección contra el ruido del Código Técnico de la Edificación.
- [17] UNE-EN 12758:2002. Vidrio para la construcción. Acristalamiento y aislamiento a ruido aéreo. Definiciones y determinación de las propiedades.
- [18] L. Cremer, M. Heckl. "Structure-Borne Sound". Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 1987.
- [19] T. Baenas, J. Ramis, J. Alba, J.G. Segura, J.M. Gadea, *Determinación de parámetros dinámicos en vidrios laminados*. X Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos PMS2006.
- [20] 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)
- [21] J. Ramis, J. Frances Monllora, J. Alba Fernandez, E.E. Segovia Eulogio, J. Vera Guarinosa. *PVB mechanical constants characterization in laminated glasses using low frequency ultrasound*. Acoustic Paris 2008.
- [22] A. Trochidis, A. Kalaroutis, "Sound transmission through double partitions with cavity absorption". Journal of Sound and Vibration 107 (2), 321-327. 1986.
- [23] D. Ross, E.E. Ungar, E.M. Kerwin, "Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminae". Structural Damping. ASME, 49-88. 1959.
- [24] J. Alba, J. Ramis, V. Sánchez-Morcillo,. "Improvement of the prediction of transmission loss of double partitions with cavity absorption by minimization techniques". Journal of Sound and Vibration, Vol. 273, pp. 793-804. 2004.
- [25] J. Alba, J. Ramis. "Modelling of impervious layers from measurements of the sound reduction index". Applied Acoustics 64 (4) pp. 343-364. 2003.