

CONTRIBUCIÓN A LA CARACTERIZACIÓN DE VIDRIOS MONOLÍTICOS Y LAMINADOS CON ULTRASONIDOS DE BAJA FRECUENCIA

Ramis , J¹.; Alba, J.²;Francês Monllor, J. ¹ .

¹Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.
Universidad de Alicante - Apdo. Correos, 99; 03080 Alicante

²Instituto para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras
Escuela Politécnica Superior de Gandía- Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N. Grao de Gandia 46730 (Valencia)

{jramis@ua.es, jesalba@fis.upv.es, jfmonllor@ua.es}

Resumen

Para predecir el comportamiento de una partición formado por vidrios laminados, es necesario conocer los parámetros de las capas que lo componen. Este tipo de dispositivos están formados por vidrio monolítico y la lámina amortiguante intermedia que suele ser del tipo PVB. Cada vez más se utilizan soluciones constructivas basadas en estos elementos. En este estudio se comparan los resultados de aplicar dos métodos para obtener las características de los componentes de cada capa en vidrios laminados: el primero, aplicando técnicas de análisis modal inspiradas en las normativas existentes al respecto y el segundo un método híbrido numérico-experimental basado en un setup formado por un emisor y un receptor de ultrasonidos de alrededor de 40 kHz. La resolución experimental de este método, tanto en el tiempo como en la frecuencia, nos indica que podría ser una alternativa práctica a los métodos aconsejados por la normativa

Palabras-clave: Ultrasonidos de baja frecuencia, END, vidrios monolíticos y laminados, análisis modal.

Abstract

In order to predict the behaviour of a partition that is made up of sheet glasses, it is necessary to know the parameters of the layers that constitute it. These types of devices are constituted by monolithic glass and an intermediate damping layer, usually PVB. Solutions based on these elements are more and more used nowadays. In this work we compare the results we obtain when applying two different methods to get the characteristics of the components of each layer in sheet glasses: firstly, applying modal analysis techniques based on the existing related standard procedures, and secondly, using an hybrid numerical-experimental method based on a setup that is made up of a transmitter and a receptor of ultrasounds around 40 kHz. The experimental resolution of this method, both in time and frequency, suggest that it could be an alternative to the standard method.

Keywords: Low Frequency ultrasound, END, Monolythic and Laminated Glass, Modal Analysis.

1 Introducción

En el problema que nos ocupa, nos encontramos con particiones compuestas por varias capas, a saber: a) vidrios monolíticos, con características normalizadas y que acústicamente se comportan como capas impermeables y b) láminas poliméricas, normalmente del tipo PVB (Polibutil-Vinilo-Butiral), de compuesto orgánico o también derivados de resinas de metacrilato, denominados PMMA (PoliMetil-MetAcrilato), y que desde el punto de vista acústico atenúan la transmisión de la vibración (damping) Conviene señalar que el espesor de los vidrios es sensiblemente mayor que el de las capas poliméricas intermedias, y que en gran número de configuraciones se tiene una estructura de tres capas con dos vidrios del mismo espesor (laminado simétrico).

Es un hecho comprobado que la ejecución del procedimiento descrito en las diferentes normativas que, de una u otra forma, podrían servir para caracterizar vidrios monolíticos y laminados [1,2,3] conlleva una gran dificultad, especialmente cuando lo que se pretende es obtener los datos de caracterizar la lámina intermedia. También es cierto que en muchas ocasiones no es necesario caracterizar completamente esa lámina intermedia sino que lo importante es el conjunto y/o distinguir distintos tipos de láminas intermedia en función de su eficacia antivibratoria. En este trabajo se presenta una alternativa experimental, con un modelo analítico que la sustenta que ofrece una mayor resolución, menor dificultad experimental y que los ofrecidos por las normativas citadas más arriba

2 Caracterización experimental de vidrios monolíticos y laminados

2.1 Análisis Modal

En [4] se puede encontrar una descripción completa del procedimiento para obtener los parámetros mecánicos de un material. Se resume a continuación lo más significativo de este trabajo para comprender los fundamentos.

La función de transferencia $G_y(s, x, x_0)$ de un sistema como el representado en la Figura 1 en el que se ejerce una fuerza $F(x_0, t)$ sobre una barra de un material lineal, homogéneo e isotrópico sin cargas axiales, se puede demostrar que viene dada por:

$$G_y^{\text{Euler}}(s, x, x_0) = \begin{cases} \frac{B(s, x, x_0)}{A(s)} & \text{si } x \leq x_0 \\ \frac{B(s, L-x, L-x_0)}{A(s)} & \text{si } x \geq x_0 \end{cases} \quad (1)$$

donde

$$\begin{aligned} B(s, x, x_0) &= K_1(s, x_0) \cos(b(s)x) + K_2(s, x_0) \sin(b(s)x) + K_3(s, x_0)e^{b(s)x} + K_4(s, x_0)e^{-b(s)x} \\ A(s) &= 8E(s)Ib^3(s)(\cosh(b(s)L) \cos(b(s)L) - 1). \end{aligned} \quad (2)$$

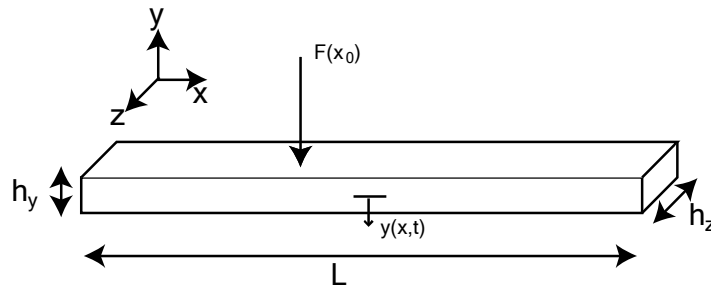


Figura 1 . Configuración de medida de las ondas de flexión o transversales sobre una barra de longitud L . La fuerza $F(x_0)$ es la amplitud aplicada que proporciona unos desplazamientos transversales $y(x,t)$ que son función de la posición x y de tiempo.

L es la longitud de la barra, $E(s)$ es el módulo de Young, I es el momento de inercia de la barra en el eje z definido como $I = h_z h_y^3 / 12$ y $b(s)$ está relacionado con las propiedades mecánicas del material tal y como se detalla en la siguiente expresión,

$$b(s) = \sqrt[4]{|a(s)|} e^{j \frac{\angle a(s)}{4}} \quad \text{con } a(s) = -\frac{\rho A s^2}{E(s) I} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del material, y A es el área de la sección cruzada ($A = h_z h_y$). La definición de las funciones K_i puede encontrarse en la referencia citada:

Las frecuencias resonantes de los modos de la función de transferencia $G_y^{\text{Euler}}(s, x, x_0)$ se determinan buscando los ceros del denominador de la ecuación (17).

$$g^{\text{Euler}}(s_k) = \cosh(b(s_k)L) \cos(b(s_k)L) - 1 = 0 \rightarrow b(s_k)L = \xi_k \quad \text{con } k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

Donde ξ_k es el número de onda de la frecuencia de resonancia k -ésima, cuyos valores están tabulados en la bibliografía

Finalmente combinando la ecuación (1) y (4), el módulo de Young puede ser obtenido mediante la siguiente expresión:

$$E(s_k) = -\frac{\rho A L^4 s_k^2}{I \xi_k^4} \quad \text{con } k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

El modelo de Euler-Bernoilli mencionado utiliza la función de transferencia y la identificación de los polos que satisfacen la ecuación (4), ignorando aquellos provocados por la inercia rotacional y vibraciones torsionales. Es muy preciso para barras delgadas y en el análisis de los primeros modos transversales correspondientes con las frecuencias de resonancia más bajas. Dichas frecuencias de resonancia y su ancho de banda nos dan información sobre el factor de pérdidas mecánicas.

$$\eta = \frac{\Delta f_k}{f_k} \quad (6)$$

2.2 Caracterización de materiales mediante ultrasonidos

Las técnicas de caracterización de materiales utilizando ultrasonidos son bien conocidas y pueden consultarse en la literatura [5,6,7]. Por motivos de espacio no se va realizar una revisión exhaustiva de los métodos. La técnica más habitualmente utilizada en la llamada “Eco-Impulso” aunque la configuración formada por un emisor y un receptor es bien conocida. Normalmente, la caracterización de un material se obtiene a partir de un proceso inverso a partir de los registros captados por el receptor. En [8] se describe un método inverso basado en la aplicación de Elementos finitos (MEF) que reproduce una configuración Emisor-Receptor, para obtener los parámetros de materiales que formen parte de una configuración multicapa. En [9] se intenta aplicar este método a configuraciones basadas en vidrio con ultrasonidos de baja frecuencia.

3 Desarrollo

En esta sección se presenta el método propuesto describiendo la configuración experimental, algunos resultados significativos del procesado y el modelo analítico que explica el comportamiento resonante experimental observado

3.1 Dispositivo experimental

La configuración experimental propuesta está formada por un generador, un osciloscopio digital de doble canal y dos transductores (Figura 2 a). En nuestro caso los dos transductores eran idénticos



Figura 2a: Configuración con los dos transductores enfrentados



Figura 2b: Configuración con los dos transductores enfrentados y un vidrio monolítico intermedio

Figura 2. Configuración experimental necesaria para el método propuesta (Generador de frecuencias, Osciloscopio Digital y Transductores)

La señal de prueba utilizada es un Burst de corta duración con una frecuencia coincidente con la frecuencia de resonancia de los transductores (cercana a los 40 kHz). Dicha señal es emitida por el transductor emisor y recibida por el receptor, después de atravesar la lámina o conjunto de láminas de vidrio bajo estudio.

En la figura 3a,3b,3c y 3d se muestran, respectivamente, la admitancia eléctrica del transductor, la respuesta temporal del transductor receptor, normalizada a la unidad, cuando se enfrentan ambos transductores, la transformada de fourier de la respuesta temporal anterior y la respuesta en frecuencia de los dos transductores enfrentados medida con un analizador .

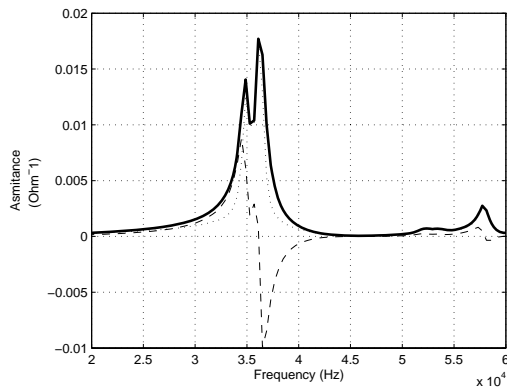


Figura 3a

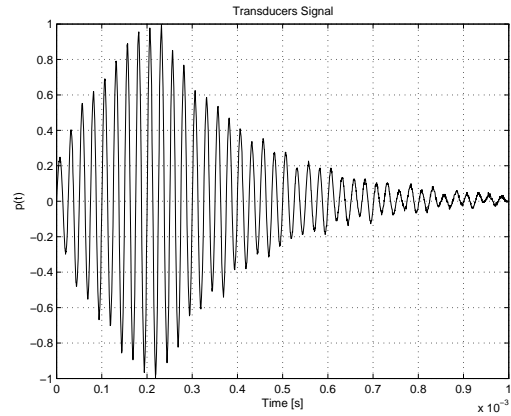


Figura 3b

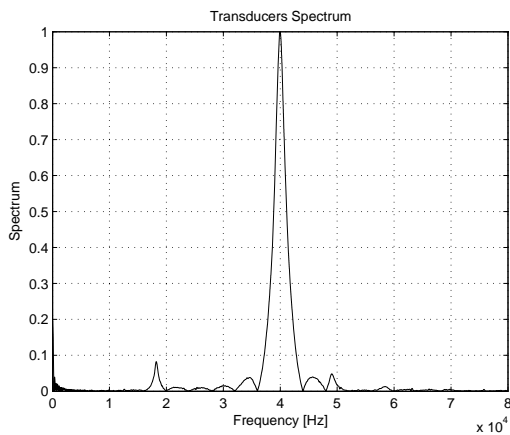


Figura 3c

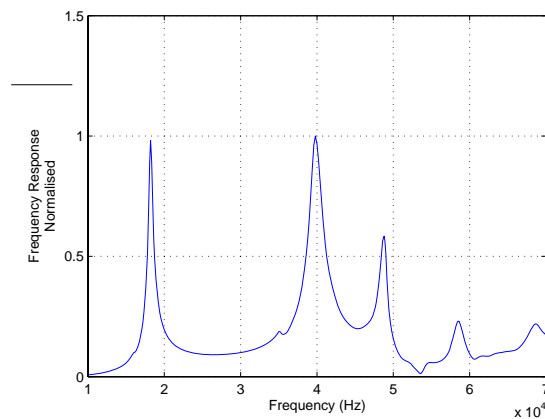


Figura 3d

Figura 3. a) Admitancia eléctrica del transductor, b) Respuesta temporal del transductor receptor, normalizada a la unidad, cuando se enfrentan ambos transductores, c) Transformada de Fourier de la respuesta temporal anterior y d) Respuesta en frecuencia de los dos transductores enfrentados medida con un analizador

Evidentemente, cuando se introducen vidrios monolíticos o laminados entre los transductores la respuesta temporal del sistema varía. En la figura siguiente se presenta un resumen representativo de los resultados. Como se puede apreciar, se puede distinguir, a simple vista el efecto de intercalar distintas láminas

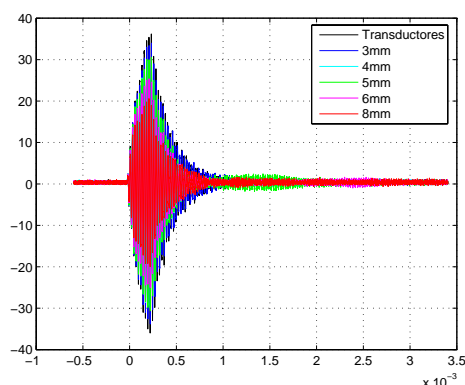


Figura 4 a) Vidrios monolíticos de diferentes espesores

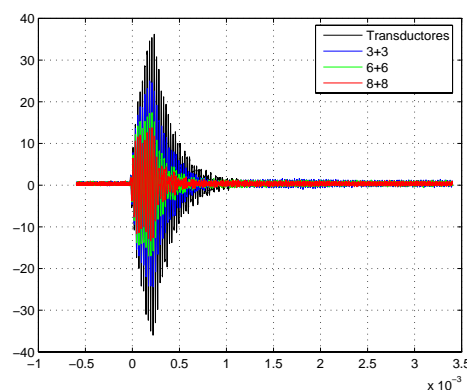


Figura 4 b) Vidrios laminados

Figura 4. Respuesta temporal para distintos dispositivos

3.2 Resultados del procesado

Los resultados anteriores, directamente obtenidos de los registros del osciloscopio digital pueden ser tratados, bien en el tiempo, bien en la frecuencia con el objeto de parametrizar la respuesta temporal o frecuencial

a) En el tiempo:

En las figuras siguientes, se presenta la curva integrada hacia atrás de la respuesta normalizada de distintas láminas. Se ha señalado en todas las curva el tiempo que tarda en caer la señal hasta la mitad de su nivel energético máximo. Una vez más, se puede apreciar fácilmente que la resolución del método es suficiente para distinguir todas las configuraciones.

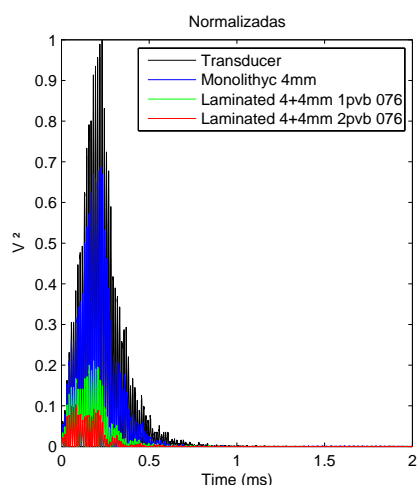


Figura 5 a

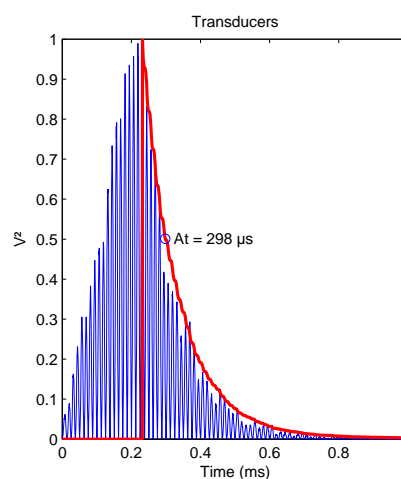


Figura 5b

Figura 5: a) Respuesta energética normalizada para los transductores y distintos vidrios monolíticos y laminados b) Respuesta energética de la configuración con los dos transductores enfrentados con la curva integrada hacia atrás. Se ha señalado el tiempo que tarda en caer la señal a la mitad

En las figuras 6 a y 6 b se muestran las respuestas energéticas y la curva integrada hacia atrás para un vidrio monolítico de 4 mm de espesor y para otro de 8 mm. Otros espesores y configuraciones de laminados ofrecen resultados coherentes de forma que, por ejemplo, el tiempo que tarda en atenuarse la señal hasta la mitad del valor máximo es menor para configuraciones de mayor espesor y con mayor poder atenuante esperado

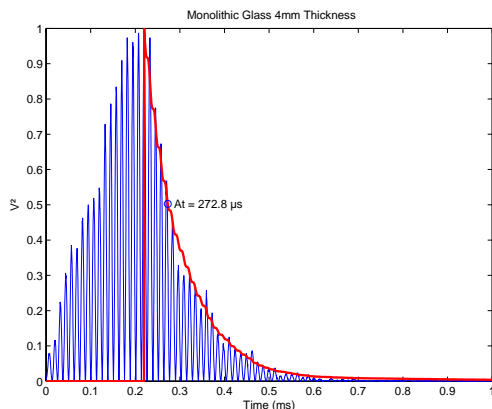


Figura 6 a

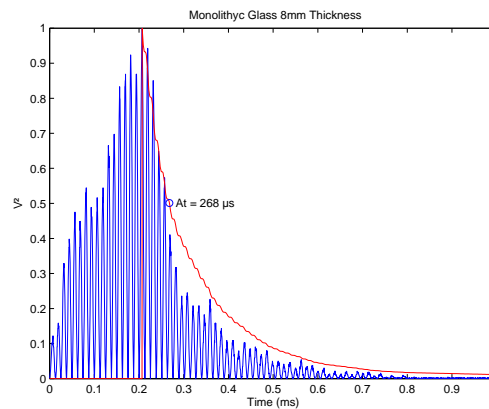


Figura 6 b

Figura 6. Respuestas energéticas y la curva integrada hacia atrás para un vidrio monolítico de 4 mm de espesor (6 a) y para otro de 8 mm (6 b)

b) En la frecuencia

Las figuras 7 a y 7 b muestran el resultado de realizar la transformada de Fourier a la respuesta temporal de vidrios monolíticos de diferente espesor (a) y distintas configuraciones de vidrio laminado. Se aprecia un desplazamiento del máximo de resonancia hacia las bajas frecuencias en ambos casos conforme aumenta el espesor del monolítico y al aumentar el número de capas y su tipo

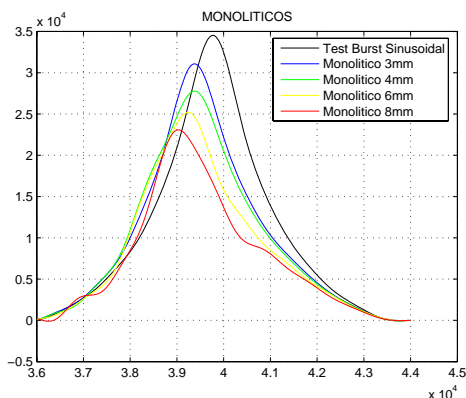


Figura 7a.

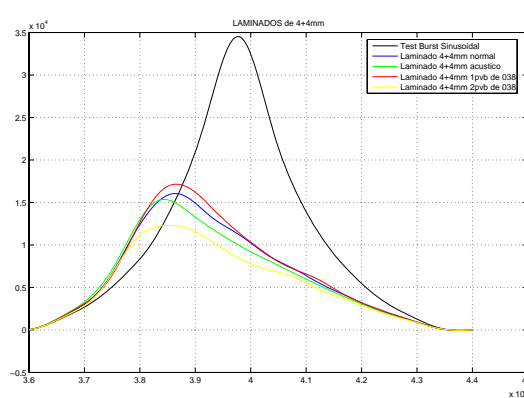


Figura 7b.

Figura 5. Transformada de Fourier de la respuesta temporal correspondiente a distintos vidrios monolíticos (a) y laminados (b)

3.3 El modelo analítico

Se presentan a continuación tres modelos analíticos para las tres configuraciones aplicadas

Configuración 1: Dos transductores enfrentados

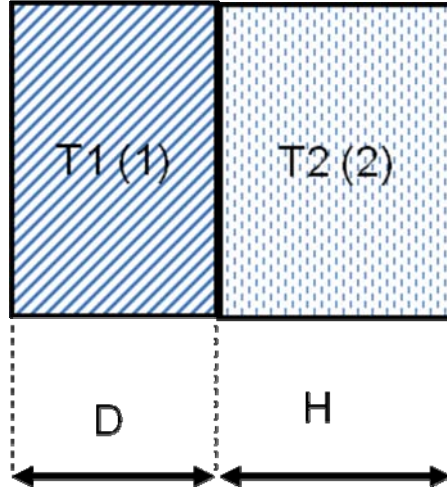


Figura 8. Dos transductores enfrentados

$$Z_2 = \frac{R_{T2} \frac{Rad + j \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H)}{\frac{R_{T2}}{S_e} + jRad \cdot \text{tag}(k_{T2}H)}}{\cong j \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H) = Z_D} \quad (7)$$

(No radia hacia atrás Rad = 0)

$$Z_1 = \frac{R_{T1} \frac{Rad + j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D)}{\frac{R_{T1}}{S_e} + jRad \cdot \text{tag}(k_{T1}D)}}{\cong j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D)} \quad (8)$$

(No radia hacia adelante Rad = 0)

$$Z_T = Z_1 + Z_D = j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D) + j \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H)$$

Si los transductores son iguales

$$Z_T = Z_1 + Z_D = 2j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D)$$

Los máximos se obtendrían cuando la parte imaginaria de la impedancia es máxima

Configuración 2: “Transductor-vidrio-transductor”

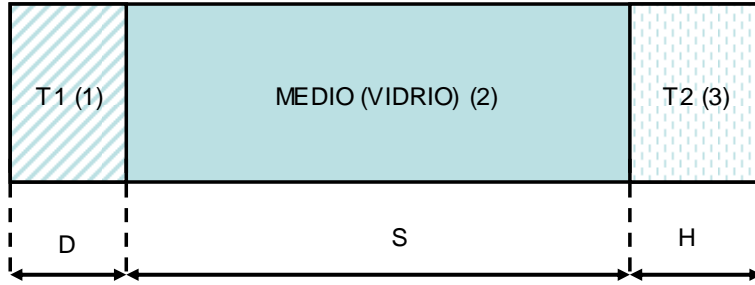


Figura 9. Dos transductores enfrentados con vidrio monolítico intercalado

$$Z_3 = \frac{R_{T2}}{S_e} \frac{\text{Rad} + j \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H)}{\frac{R_{T2}}{S_e} + j \text{Rad} \cdot \text{tag}(k_{T2}H)} \cong j \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H)$$

(No radia hacia atrás Rad = 0)

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{Z_3 + j \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)}{\frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} + j Z_3 \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)} = \\ &= \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{j \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H) + j \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)}{\frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} - \frac{R_{T2}}{S_e} \text{tag}(k_{T2}H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)} = \\ &= j \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{R_{T2} \text{tag}(k_{T2}H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)}{R_{\text{vidrio}} - R_{T2} \text{tag}(k_{T2}H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)} = Z_D \end{aligned}$$

$$Z_1 = \frac{R_{T1}}{S_e} \frac{\text{Rad} + j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D)}{\frac{R_{T1}}{S_e} + j \text{Rad} \cdot \text{tag}(k_{T1}D)} \cong j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D)$$

(No radia hacia adelante Rad = 0)

$$Z_T = Z_1 + Z_D = j \frac{R_{T1}}{S_e} \text{tag}(k_{T1}D) + j \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{R_{T2} \text{tag}(k_{T2}H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)}{R_{\text{vidrio}} - R_{T2} \text{tag}(k_{T2}H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}}S)}$$

En la resonancia :

$$R_{T1} \operatorname{tag}(k_{T1} D) + R_{\text{vidrio}} \frac{R_{T2} \operatorname{tag}(k_{T2} H) + R_{\text{vidrio}} \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S)}{R_{\text{vidrio}} - R_{T2} \operatorname{tag}(k_{T2} H) \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S)} = 0$$

Se debe verificar $R_{\text{vidrio}} - R_{T2} \operatorname{tag}(k_{T2} H) \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S) \neq 0$ entonces:

$$R_{T1} \operatorname{tag}(k_{T1} D) (R_{\text{vidrio}} - R_{T2} \operatorname{tag}(k_{T2} H) \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) + R_{\text{vidrio}} (R_{T2} \operatorname{tag}(k_{T2} H) + R_{\text{vidrio}} \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) = 0$$

Con las simplificaciones:

$$R_{T1} = R_{T2} = R_T$$

$$k_{T1} = k_{T2} = k_T$$

$$\frac{R_T}{R_{\text{vidrio}}} = R$$

Se tiene:

$$R \operatorname{tag}(k_T D) (1 - R \operatorname{tag}(k_T H) \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) + R \operatorname{tag}(k_T H) + \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S) = 0$$

$$R (\operatorname{tag}(k_T H) + \operatorname{tag}(k_T D)) - R^2 \operatorname{tag}(k_T D) \operatorname{tag}(k_T H) \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S) + \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S) = 0$$

Si se tienen espesores idénticos, ($H = D$), y se tiene:

$$2R \operatorname{tag}(k_T H) - \operatorname{tag}(k_{\text{vidrio}} S) (1 - R^2 \operatorname{tag}^2(k_T H)) = 0$$

Si no hay vidrio: $S = 0$

$$2R_T \operatorname{tag}(k_T H) = 0$$

Configuración 3: “Transductor+vidrio monolítico+PVB+vidrio monolítico+transductor”

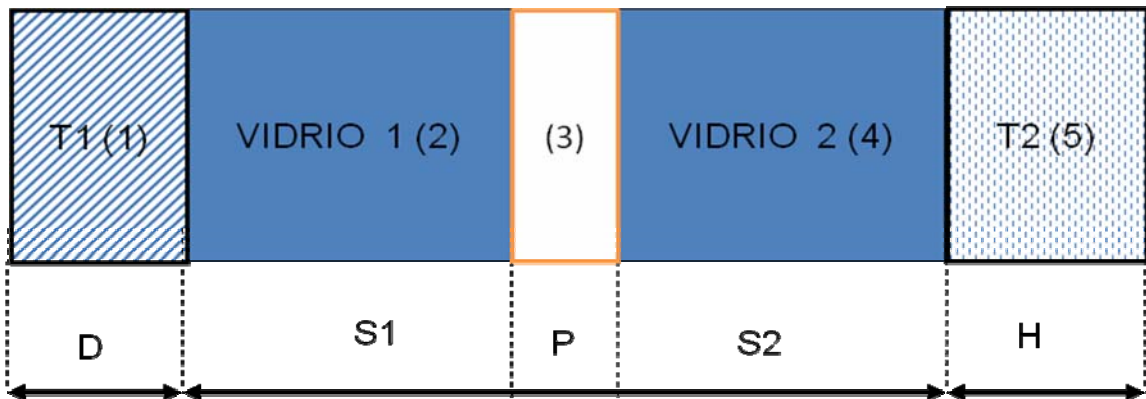


Figura 10. Dos transductores enfrentados con vidrio laminado intercalado

Suponiendo simetría en la configuración y con la notación:

$$\begin{aligned} R_{T1} &= R_{T2} = R_T \\ R_{\text{vidrio1}} &= R_{\text{vidrio2}} = R_v \\ k_{T1} &= k_{T2} = k_T \\ k_{\text{vidrio1}} &= k_{\text{vidrio2}} = k_v \\ H &= D \\ S1 &= S2 = S \end{aligned}$$

$$Z_5 \cong j \frac{R_T}{S_e} \text{tag}(k_T H)$$

$$Z_4 = j \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)}{R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)}$$

Por simetría, (mitad de PVB):

$$\begin{aligned} Z_3 &= \frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} \frac{Z_4 + j \frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)}{\frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} + j Z_4 \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)} = \\ &= \frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} \frac{j \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)}{R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)} + j \frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)}{\frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} - \frac{R_{\text{vidrio}}}{S_e} \frac{R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)}{R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)} \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)} = \\ &= j \frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} \frac{R_{\text{vidrio}} (R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) + (R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) R_{\text{PVB}} \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)}{R_{\text{PVB}} (R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) - R_{\text{vidrio}} (R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)} = \\ &= Z_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_T &= 2Z_D = \\ &= 2j \frac{R_{\text{PVB}}}{S_e} \frac{R_{\text{vidrio}} (R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) + (R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) R_{\text{PVB}} \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)}{R_{\text{PVB}} (R_{\text{vidrio}} - R_T \text{tag}(k_T H) \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) - R_{\text{vidrio}} (R_T \text{tag}(k_T H) + R_{\text{vidrio}} \text{tag}(k_{\text{vidrio}} S)) \text{tag}(k_{\text{PVB}} P / 2)} \end{aligned}$$

Los datos experimentales permiten obtener las frecuencias de resonancia (para las cuales la impedancia es máxima). Con estos datos, a partir de las ecuaciones anteriores es posible establecer un sistema de ecuaciones que permite caracterizar la lámina intermedia

4 Conclusiones

Se ha presentado una alternativa para la caracterización de vidrios monolíticos y laminados basada en la utilización de ultrasonidos de baja frecuencia. En concreto se ha utilizado un transductor con una frecuencia de resonancia cercana a los 40 kHz. El método ofrece suficiente resolución tanto en espacio

frecuencial como en el temporal y es fácil de aplicar ya que no exige instrumentación compleja. El siguiente paso será tratar de diferenciar distintos vidrios laminados (diferentes tipos de PVB). Queda pendiente, asimismo, un estudio sistemático comparativo de la incertidumbre asociada al método basado en el análisis modal frente al propuesto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02

Referencias

- [1] ISO/PAS 16940:2400(E) – Glass in building – Glazing airborne sound insulation –Measurement of the mechanical impedance of laminated glass.
- [2] E 758-98 ”Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials”,ASTM International, PA 19428-2959.
- [3] C 623 – 92 (Reapproved 2000) Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance
- [4] P. Pintelon et Al. ”Identification of Young’s modulus from broadband modal analysis experiments”, Mechanical Systems and Signal Processing 18,699-726 (2004).
- [5] “Ultrasonics. Fundamentals and Applications”, Heinrich Kuttruff, Editorial Elsevier Applied Science.
- [6] “Ultrasonic Measurements and Technologies”, Stefan Kočič and Zolenko Figura, Editorial Chapman & Hall.
- [7] “Ultrasonic Testing and Materials”, J. Krautkrämer & H. Krautkrämer, Editorial Springer-Verlag.
- [8] Ravi Mittal et Al. “Mechanical constants characterization of thin layers by low frequency ultrasonics”. CMNE/CILAMCE 2007. Porto, 13-15.Junho, 2007.© APMTAC, Portugal
- [9] Ramis, J. et Al. “PVB mechanical constants characterization in laminated glasses using low frequency Ultrasound”, Acoustic’08 Congress . June 29-July 04. Paris.