

**REVISIÓN DE ALGORITMOS DE PREDICCIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO DE
PAREDES**

REFERENCIA PACS: 43.55.Rg

Mondaca Marino, C.; González Suárez, J.; Machimbarrena Gutiérrez, M.¹.

Dpto. de Física de la ETS de Arquitectura. Universidad de Valladolid

Avda. Salamanca s/n. 47014 Valladolid

Tel: 983 423 446

Fax: 983 423 425

E-mail: juliog@opt.uva.es y mariaio@opt.uva.es

ABSTRACT

In this paper, we review twelve o'clock prediction algorithms airborne sound insulation found in the literature, which simulate typical configurations used in the construction of habitable enclosure and are contrasted with real walls measurements performed in accredited laboratory. The results show that there is no single model capable of simulating all existing configurations and proposals should advance to more complex configurations considering the current materials used in construction.

RESUMEN

En este trabajo, se revisan doce algoritmos de predicción de aislamiento de sonido aéreo encontrados en la literatura especializada, que simulan configuraciones típicas utilizadas en la construcción de recintos habitables y se han contrastados con mediciones de paredes reales realizadas en laboratorio acreditados. Los resultados muestran que no existe un único modelo que sea capaz de simular todas las configuraciones existentes y se debe avanzar en propuestas de configuraciones más complejas considerando los actuales materiales usados en construcción.

1 INTRODUCCIÓN

Los algoritmos de predicción para el aislamiento acústico del ruido aéreo de elementos de separación verticales son una herramienta importante a la hora de estimar el índice global de aislamiento acústico (R_w) y el comportamiento del aislamiento acústico en frecuencia y así determinar su efectividad frente a determinados espectros de ruido. Son necesarios debido a que cada proyecto plantea el uso de nuevas configuraciones o materiales y se debe determinar si estos elementos constructivos cumplen con la normativa nacional o comunitaria existente en relación con el aislamiento acústico.

Existe una variedad muy amplia de modelos que buscan predecir el aislamiento acústico, en base a propiedades físicas de los materiales utilizados, de la configuración entre ellos (dimensiones y espaciado) y del número de elementos o capas utilizadas.

Partiendo desde la versión más simple (una capa) propuesta por Cremer [1] o Josee y Lamure [2] y sus variaciones ó agregación de términos de corrección (Fahy y Gardonio [3] entrega un completo resumen de este tema) a configuraciones de doble capa planteada por Beranek y Work [4], Crocker y Price [5], entre muchos otros modelos existentes los cuales por espacio no podemos detallar aquí (Hongisto [6] realiza una detallada recopilación de modelos propuestos para doble capa); modelos de tres capas como los propuestos por Brekke [17], y Vinokur [18] y finalmente modelos multicapa propuestos por Ookura y Saito [8], Brouard et al [7] entre muchos otros, los cuales pueden ser aplicados a las configuraciones anteriores y todo tipo de configuraciones multicapa simples.

El objetivo de este estudio es presentar un análisis cuantitativo de 12 modelos de predicción que se han considerado de baja complejidad en cuanto a su implementación y factibilidad de obtener los parámetros para sus cálculos (4 para capa simple, 5 para capa doble y 3 para capa triple, además de la ecuación de masa simple en todos los casos) los cuales se han programado en Matlab 7.9 y contrastados con 4 tipo de configuraciones utilizadas en la construcción de recintos habitables.

2 MODELOS DE PREDICCIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACUSTICA

Para determinar el índice de reducción acústica se debe calcular el cociente entre la energía sonora incidente y la transmitida por un elemento de separación producto de la pérdida de energía que este elemento produce. Los principales mecanismos de pérdida de energía se deben a la absorción de sonido en el tránsito por los materiales porosos o con cavidades y por cambios de la impedancia acústica en la banda de transmisión para el caso de los elementos que son impermeables al sonido. Esto sin considerar los aportes de energía producto de las transmisiones indirectas que el elemento constructivo puede presentar en su instalación a través de puentes acústicos y vibratorios o uniones rígidas entre elementos o rendijas u orificios presentes en el sólido.

Los modelos en general se basan en varias teorías como el Método de Onda progresiva, el método de Impedancia Progresivo, el Análisis Modal y el Análisis Estadístico de Energía (SEA), entre otros. Los parámetros más recurridos para implementar estos algoritmos son las propiedades físicas de los elementos: su masa, espesor, amortiguamiento interno, rigidez a la flexión, factor de radiación, considerándose estos valores como valores constantes. Sin embargo, diversos estudios demuestran que estos valores son dependientes del rango de frecuencia considerado y en general son de difícil medición (factor de radiación y de pérdida) y las aproximaciones empíricas existentes son muy complejas o no se adecuan a la realidad variada de materiales existentes.

Respecto de los fenómenos físicos que estos modelos consideran para modelar el factor de transmisión y con él calcular el índice de reducción acústica, cobran relevancia las frecuencias de resonancia y frecuencia crítica en los sistemas considerados, las cuales definen las transiciones del aislamiento y su comportamiento en tramos, además de señalar los tramos en donde existe un probable decaimiento del nivel de aislamiento.

2.1 Modelos de una capa

Para los modelos de una capa, su índice de reducción acústica queda determinado por su: masa superficial, tipo de material (densidad, modulo de elasticidad y de rigidez a la flexión, velocidad del sonido en el sólido), factor de amortiguamiento, factor de radiación y su tamaño en la mayoría de los modelos considerados; su comportamiento en frecuencia se caracteriza por presentar tramos de crecimiento no uniforme, junto con frecuencias de transición, en los cuales el nivel de aislamiento decae fuertemente.

En este aspecto, la frecuencia crítica define tramos de aislamiento y el lugar en donde el sistema es menos eficiente y experimentará fuertes caídas en su aislamiento acústico (ver cuadro 1), que depende de las características del material utilizado, de su masa superficial y del grosor de la placa considerada en una relación inversa, es decir a mayor grosor la frecuencia crítica es de menor frecuencia, luego es este criterio el que determina el grosor adecuado de los elementos constructivos, buscándose que esta frecuencia quede por debajo (paredes macizas y de gran espesor) o muy por encima del rango de frecuencia de interés (paredes delgadas, en donde todos los materiales tienen alto aislamiento en alta frecuencia) y en donde se precisa aislamiento acústico. Además, marca la transición entre la eficiencia de radiación del sistema, bajo este valor, el aislamiento acústico queda determinado por su densidad superficial (ley de masa), en cambio sobre esta frecuencia, el sistema depende fuertemente del factor de radiación y del amortiguamiento interno del sistema.

La otra frecuencia importante es la primera frecuencia natural o de resonancia modal de la placa, la cual en general es de baja frecuencia (ver recuadro 1), la cual depende de la geometría de la placa y de su frecuencia crítica. En esta frecuencia existe un decaimiento importante del aislamiento acústico, además de moverse a una amplitud máxima, lo que favorece las transmisiones indirectas entre las uniones. La ley de masa simple no permite predecir el comportamiento de aislamiento en este rango de frecuencia, el cual dependerá fuertemente de su rigidez.

Recuadro 1: frecuencias de transición en una placa simple.

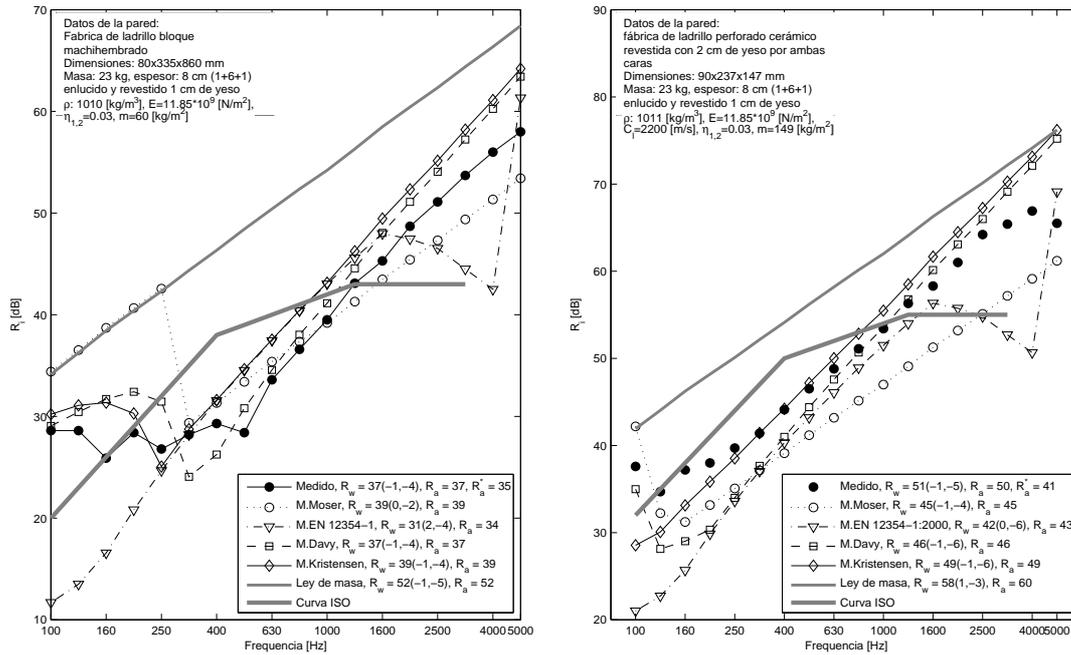
Frecuencias de transición	Ecuaciones
Frecuencia crítica	$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}$
Frecuencia de resonancia (primer modo (1,1))	$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right)$
Frecuencia superior	$f_h = \frac{1}{f_c} \left(\frac{c_0}{6h} \right)^2$

Finalmente en alta frecuencia también puede existir una banda de frecuencia con un decaimiento del aislamiento, debido a la transición dominante de las ondas de corte respecto de las ondas de flexión; la transición de este tramo lo marca la frecuencia superior (ver recuadro 1), que depende inversamente de la frecuencia crítica y del grosor de la placa, y es de considerar, si los espesores son mayores que 30 mm y con densidades superficiales mayores que 100 kg/m², puede estar dentro del rango de interés del aislamiento acústico (100-5000 Hz.). Por lo tanto a la hora del diseño de los elementos constructivos y predicción de los niveles de aislamiento acústico, estas frecuencias de deben tener muy en cuenta.

Los modelos considerados en esta fase son: Davy [9], Möser [10], Kristensen & Rindel [11], UNE-EN 12354-1 (anexo B) [12] y la ecuación de la ley de masa para incidencia normal.

En la figura 1 se puede ver aplicados a dos tipos de paredes simples, una delgada (8 cm) y otra de mayor espesor (14.7 cm) en donde se puede ver que en general los modelos se ajustan bastante bien a los valores medidos, existiendo dispersión sólo en los extremos.

En el recuadro 2 un resumen estadístico del comportamiento de los índices globales respecto de los valores medidos para estos dos casos puntuales, en donde se puede apreciar que los modelos de Davy y Kristensen y Rindel entregan un valor de índice de reducción cercano al obtenido con los datos medidos ajustándose más el modelo de Davy a la pared más delgada y el de Kristensen y Rindel a la más gruesa. Sin embargo bajo los 250 Hz todos los algoritmos sobrestiman el Ri a excepción de UNE-EN 12354-1 (anexo B); en alta frecuencia los modelos de Davy y Kristensen y Rindel sobreestiman el valor de Ri y los demás lo subestiman.



* en la parte superior del la figura se incluye las características de la pared y los parámetros utilizados en la simulación.

Figura 1: Índice de reducción acústica para una fábrica de ladrillo de bloque machihembrado con enlucido y revestido de yeso de 1 cm de yeso y una fábrica de ladrillo perforado cerámico, revestida con 2 cm de yeso por ambas caras. Datos de lo.

Recuadro 2: Resumen de índices de reducción acústica y error medio para los modelos considerados.

Modelos	fábrica de ladrillo machihembrado			fábrica de ladrillo perforado cerámico		
	Rw (Ca,Ctr)	Ra	Error medio (min,max)	Rw (Ca,Ctr)	Ra	Error medio (min,max)
Medido	37(-1,-4)	37, 35*	-	51(-1,-5)	50,41*	-
Möser	39(0,-2)	39	5 (0.3,15.8)	45(-1,-4)	45	6 (2.5,9.1)
UNE-EN 12354-1 (anexo B)	31(2,-4)	34	6 (0,16.9)	42(0,-6)	43	7 (1.9,16.6)
Davy	37(-1,-4)	37	3 (0.5,5,8)	46(-1,-5)	46	4 (0.1,9.7)
Kristensen y Rindel	39(-1,-4)	39	4 (0.6,6,3)	49(-1,-6)	49	3 (0,10.7)
Ley de masa simple	52(-1,-5)	52	13 (5.5,20.0)	58(1,-3)	60	9 (4.3,10.8)

* utilizando formula para valor aproximado del índice de reducción sólo considerando su masa.

2.2 Modelos de doble capa

Los modelos de doble capa son utilizados por sus mejores prestaciones de aislamiento y menor masa requeridos para un aislamiento dado, que en comparación con el entregado por una pared simple. Sin embargo, los algoritmos son más complejos que los anteriores porque agrega el efecto de las resonancias producidas por la cavidad, que se comporta como un sistema masa-resorte-masa y se define como,

$$f_{mam} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8\rho_0 c_0 (m_1 + m_2)}{dm_1 m_2}} \cong 80 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{dm_1 m_2}} \quad (1)$$

Que depende de la masa superficial de los paneles y de la distancia de separación entre ellos. Además se debe considerar la frecuencia de resonancia de la cavidad (producto de la rigidez

de la masa de aire), que se define a continuación, la cual depende del espacio de separación entre las placas.

$$f_d = \frac{c_0}{2\pi d} \quad (2)$$

También se debe considerar el efecto que puede provocar las uniones existentes entre las placas, además de la posibilidad de agregar un material absorbente acústico y los efectos del tipo de fijación del panel en sus bordes y en su superficie (marcos portantes, puntos de unión entre placas y marcos, etc.) y frecuencias estructurales de estos componentes que pueden provocar caídas en los niveles de aislamiento en las frecuencias medias.

Los modelos utilizados para predecir el aislamiento acústico de una pared de doble capa con cámara de aire, son los siguientes: Bies & Hansen [13], Davy (versión doble capa) [14], Gu & Wang [15], Ookura & Saito (versión doble capa) [8] y Sharp [16].

En la figura 2 se pueden ver los algoritmos aplicados a un tabique de placa de yeso laminado con una cámara de aire.

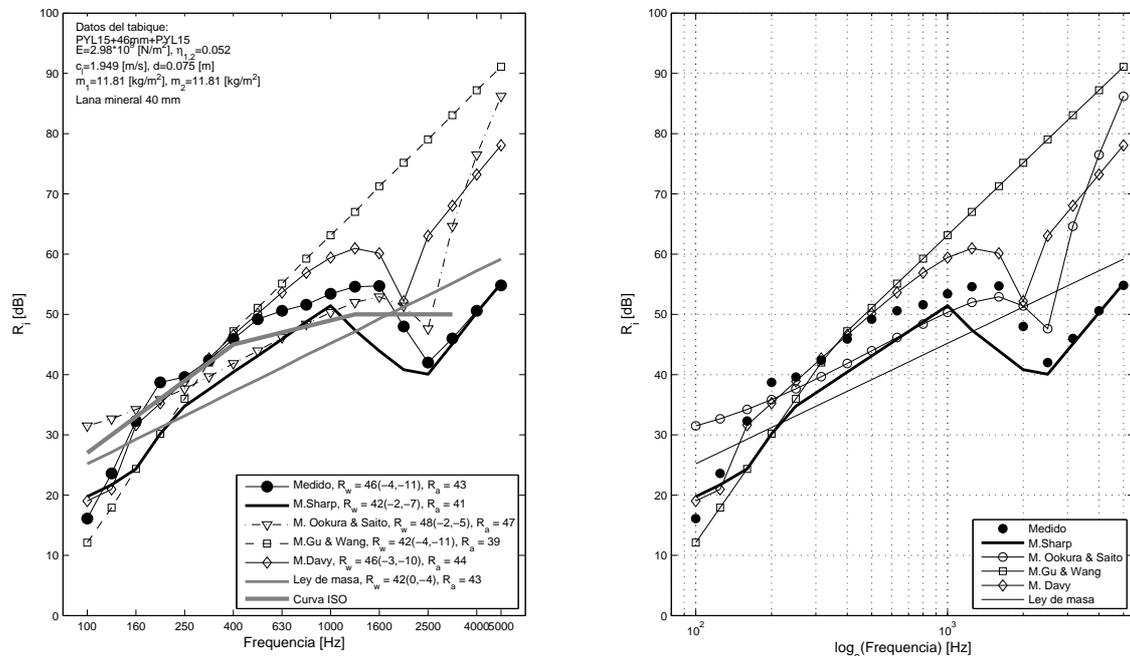


Figura 2: Índice de reducción acústica para tabique doble de placa de yeso laminado y material absorbente en la cámara.

De la figura se puede apreciar un comportamiento muy heterogéneo de los modelos, que se expresa mayormente en los extremos del rango de frecuencia considerado (100-5000 Hz) y el efecto de la frecuencia crítica en el aislamiento del panel. En baja frecuencia los modelos de Gu & Wang, Sharp y Davy se ajustan bastante bien a los datos medidos hasta los 300 Hz, en alta frecuencia sólo el modelo de Sharp se ajusta a los datos medidos.

Recuadro 3: Resumen de índices de reducción acústica.

Modelos	Tabique autoportante placa de yeso laminado con lana mineral en la cámara interior		
	Rw (Ca,Ctr)	Ra	Error medio (min,max)
Medido	46(-4,-11)	43	-
Davy	46(-3,-10)	44	7(0.3,23.3)
Gu & Wan	42(-4,-11)	39	14(0.4,37.1)
Ookura & Saito	48(-2,-5)	47	8(1.8,31.4)
Sharp	42(-2,-7)	41	5(0.3,10.8)
Ley de masa	42(0,-4)	43	7(3.0,11.2)

Del cuadro 3, se puede ver que el modelo de Davy se ajusta al valor de índice de reducción acústica del tabique, sobreestimando en un decibel el R_a ; sin embargo, es el modelo de Sharp el que presenta menor error medio entre los datos medidos y los valores entregados por los algoritmos y además tiene la menor dispersión entre sus valores.

2.3 Triple Capa

Las configuraciones de triple capa, buscan incrementar el gran aislamiento logrado por las dobles capas, agregando una cámara de aire más al sistema de la pared y lograr altos niveles de aislamiento acústico sobre todo en las frecuencias medias y altas. Sin embargo el agregar esta cámara introduce otras frecuencias de resonancias a baja frecuencia producto de la interacción entre las cámaras de aire y los paneles, que se comporta como un sistema acoplado masa-resorte-masa-resorte, provocan una disminución del índice de reducción incluso a valores menores que los que podría entregar un panel con doble capa. Estas dos frecuencias se pueden calcular con la siguiente expresión,

$$f_{r1,r2} = D\sqrt{a \pm \sqrt{a^2 - b}} \quad (3)$$

$$\text{Con: } D = \frac{\sqrt{\rho_0 c_0^2}}{2\pi}, \quad a = \frac{1}{2m_2} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 d_1} + \frac{m_2 + m_3}{m_3 d_2} \right), \quad b = \frac{(m_1 + m_2 + m_3)}{m_1 m_2 m_3 d_1 d_2}$$

que dependen de las masas superficiales de los paneles y de las distancias de separación entre las placas y se pueden calcular con las siguientes expresiones.

Las prestaciones de triple capa son eficientes en la medida que integran material absorbente acústico en las cámaras de separación, se evitan las uniones rígidas entre paneles y las simetrías de las placas y espaciamientos utilizados, con el objetivo final de evitar fenómenos de coincidencia entre frecuencias de resonancia de las placas o entre frecuencias de resonancia de las cavidades de aire existentes, los cuales son mucho mas gravitantes que aumentar la masa en las configuraciones (este comentario es valido para el caso de capa doble).

Los modelos que se han considerado para un panel de tres capas son: Brekke [17], Ookura & Saito (versión tres capas) [8] en su versión para tres capas y Vinokur [18].

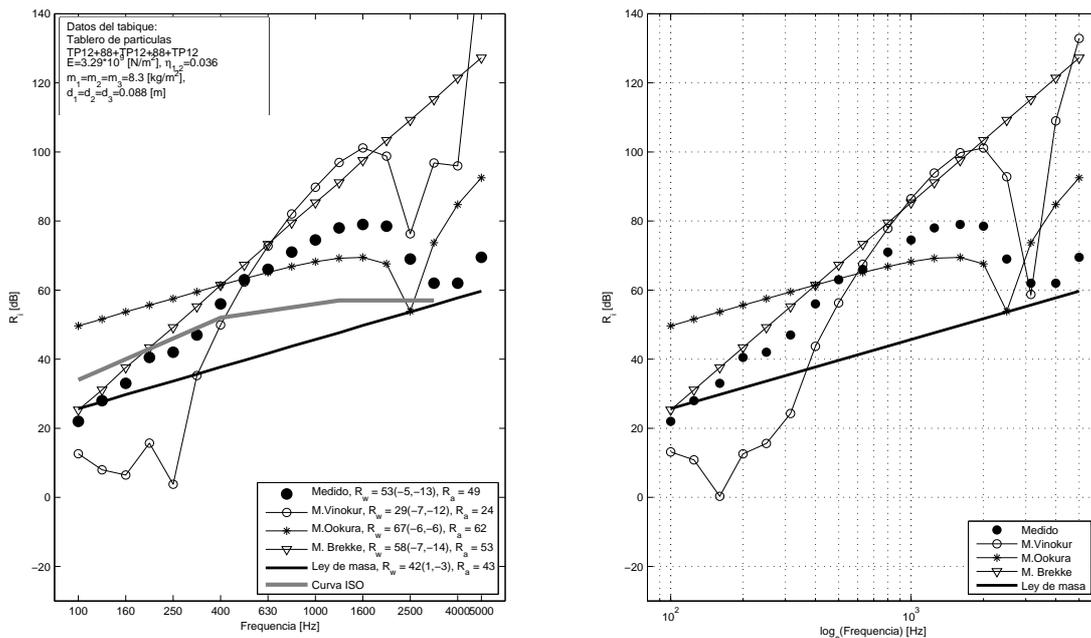


Figura 3: Índice de reducción acústica para un tabique simple de Tablero de partícula.

En la gráfica 3 se muestran los algoritmos aplicados a un tabique triple capa de tablero de partículas sin material absorbente en las cámaras de aire interiores, en donde se puede apreciar que, en general los modelos no se ajustan a los datos medidos en el rango de medición considerado, a excepción del modelo de Brekke que se aproxima mejor al índice de reducción acústica en baja frecuencia con una pendiente de 16 db/oct. Sobre los 500 Hz. todos los algoritmos sobreestiman o subestiman el aislamiento acústico alcanzado por el panel. Además es evidente que el aislamiento logrado por esta configuración es muy superior al de una capa simple con la misma masa.

Recuadro 4: Resumen de índices de reducción acústica.

Modelos	Tabique autoportante placa de yeso laminado con lana mineral en la cámara interior		
	Rw (Ca,Ctr)	Ra	Error medio (min,max)
Medido	53(-5,-13)	49	-
Brekke	58(-7,-14)	53	19(2.9,59.4)
Ookura & Saito	67(-6,-6)	62	13(0.3,27.7)
Vinokur	29(-7,-12)	24	20(1.5,63.4)
Ley de masa simple	42(1,-3)	43	16(0.4,30.4)

Del recuadro 4 se puede ver que los errores son muy grandes siendo el algoritmo con mejor desempeño el modelo de Brekke sobrestimando los índices globales entre 4 a 5 dB. En este caso particular el alto valor de error de los modelos está asociado a valores de alto aislamiento que los algoritmos predicen para alta frecuencia, que no se corresponden con la realidad.

3 CONCLUSIONES

Existe una variedad muy amplia de modelos, de comportamientos muy heterogéneos entre sí, muchos de los cuales son aplicables a situaciones específicas y acotadas. Desde aquellos que requieren tan solo un parámetro (masa superficial en el caso de la ley de masa simple), hasta aquellos que requieren más de 12 parámetros (modelos de Davy), muchos de los cuales son difíciles de obtener y dependiendo del material son representativos en orden de magnitud. Los parámetros más requeridos por los modelos son: densidad, frecuencia de resonancia de la placa, factor de amortiguamiento interno, módulo de Young y velocidad del sonido en el sólido, además de las dimensiones de la muestra (longitud y área). Los modelos más complejos (Davy: capa simple, EN 12354-1, Ookura & Saito) requieren un conocimiento de la tecnología de montaje utilizada para fijar el material y sus uniones, parámetros físicos especiales del material utilizado (factor de radiación, rigidez a la flexión), de los elementos portantes (factor de rigidez) y del material absorbente (absorción, resistencia al flujo a lo menos).

Las soluciones de aislamiento en base de una pared simple no son suficientes para obtener niveles de aislamiento altos, debido a la dependencia del índice de transmisión acústica y la masa de la pared. Esto obliga a soluciones de al menos dos capas y cámara intermedia a modelos de tres capas o multicapa, siendo todavía una tarea pendiente el generar modelos adecuados a las realidades de configuración y nuevos materiales usados actualmente.

Los resultados muestran que no existe un único modelo que sea capaz de simular todas las configuraciones existentes y se debe avanzar en propuestas de configuraciones más complejas considerando los actuales materiales usados en construcción.

REFERENCIAS

[1] Cremer, V. L. "Theorie der schalldämmung dünner Wände beu schrägem einfall", Akustische Zeitschrift VII, Drittes Heft, Siebenter Jahrgang, 1942 81-104.

[2] Josse, R. y Lamure, C. "Transmisión du son par une paroi simple", Acustica 14, 266-280 (1964).

[3] Fahy, F. y Gardonio, P., *Sound and Structural Vibration Radiation, Transmission and Response Second edition*, Academic Press, Elsevier 2007.

[4] Beranek, L. y Work, G., "Sound transmission through - multiple structures containing flexible blankets". J. Acoust. 291. Soc. Am. 21 (1949) 419-428.

[5] Crocker, M. y Price, A., "Sound transmission using statistical energy analysis". J. Sound. Vib. 9 (1969) 469-486.

[6] Hongisto, V. "Sound Insulation of Double Panels - comparison of Existing Prediction Models", Acta ACUSTICA United with ACUSTICA Vol. 92 (2006) 61-78.

[7] Brouard, B., Lafarge, D. y Allard, J. "A general method of modelling sound propagation in layered media", J. of Sound and Vibration (1995) 183 (1), 129-142.

[8] Ookura, K. y Saito, Y. "Transmission loss of multiple panels containing sound absorbing materials in a random incidence field", Proceeding of Inter Noise 78, San Francisco, 1978, 637-642.

Modelos para una capa

[9] Davy, J. "Predicting the sound insulation of single leaf walls: Extension of Cremer's model", J. of the Acoustical Society of America, vol 126, nº. 4, pp. 1871-1877 (2009).

[10] Möser, M. *Engineering Acoustics, An Introduction to Noise Control Second Edition*, cap. 8 Building Acoustics, Editorial Springer (2009).

[11] Remes, M. *Sound insulation of wooden double-leaf partitions*, Thesis Master of Science in Espoo, Finland, (2009).

[12] UNE EN 12354-1, "Acústica de la edificación, Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos", AENOR, España (2000).

Modelos para doble capa

[13] Bies, D. y Hansen, C., *Engineering Noise Control, fourth Edition*, cap. 8 Partitions, Enclosures and Barriers, editorial Taylor & Francis (2009).

[14] Davy, J. "The improvement of a simple theoretical model for the prediction of the sound insulation of double leaf walls", J. of the Acoustical Society of America, vol 127, nº. 2, pp. 841-849 (2010).

[15] Gu, Q. y Wang, J. "Effect of resilient connection on sound transmission loss of metal stud double panel partitions" Chinese J. Acoust. 2 (1983) 113-126.

[16] Sharp, B.H. (1973). A study of techniques to increase the sound insulation of building elements, Wyle Laboratory Report No. WR 73-5 (1973).

Modelos para triple capa

[17] Brekke, A. "Calculation method for the transmission loss of single, double and triple partitions", Applied Acoustics 14 (1981) 225-240.

[18] Vinokur, R. "Transmission loss of triple partitions at low frequencies", Applied Acoustics 29 (1990) 15-24.