

## MODELADO DEL AISLAMIENTO ACUSTICO DE DIVISORIOS DE MAMPUESTOS DE LADRILLOS

Antonio Moreno, M<sup>a</sup> José Fernández, Carlos de la Colina, Francisco Simón

Instituto de Acústica, CSIC, Serrano 144, Madrid 28006

[amoreno@ia.cetef.csic.es](mailto:amoreno@ia.cetef.csic.es), [casona@hotmail.es](mailto:casona@hotmail.es), [ccolina@ia.cetef.csic.es](mailto:ccolina@ia.cetef.csic.es), [iacsh18@ia.cetef.csic.es](mailto:iacsh18@ia.cetef.csic.es)

### Resumen

Los modelos del aislamiento acústico de divisorios en placa dan para divisorios de ladrillo resultados que pueden diferir de los experimentales en cuantía suficiente para hacerlos poco eficientes como predictores en las aplicaciones prácticas, dando pie al uso de modelos empíricos, lo que representa un cierto retroceso por el abandono de la dinámica de los procesos implicados. Esta contribución representa un esfuerzo para explicar en términos mecano-acústicos el comportamiento de divisorios de ladrillo, principalmente de ladrillos huecos, bajo la hipótesis de considerar estos divisorios como placas anisótropas. Siguiendo esta línea se mostrará que los cálculos numéricos se ajustan bien a los valores experimentales no solamente en cuanto a los valores de los índices globales del aislamiento acústico ( $R_A$  o bien  $R_w$ ) sino también en los detalles de las curvas  $R(f)$ , en donde se demuestra que la influencia del tipo de ladrillos tiene una influencia decisiva.

**Palabras-clave:** modelos de aislamiento a ruido aéreo, divisorios de mampuestos de ladrillo, ecuaciones predictivas sencillas.

### Abstract

Current models of sound insulation of like plate partitions become rather inefficient to predict sufficiently accurate airborne sound insulation of traditional masonry walls in practical situations. So empirical models have become more and more in use, which is in favour of a certain abandon of dynamic basis. This paper represents an effort to recover reliable acoustic foundations to explain the airborne sound insulation behaviour of brick walls. The main idea is to introduce anisotropic elastic properties of plates. In this way it will be shown that numeric computations fit well experimental results not only concerning global sound insulation indices ( $R_A$  o bien  $R_w$ ) but also detailed curves  $R(f)$  where in turn it will be shown that the influence of the type of bricks and the mounting conditions play a capital role.

**Keywords:** airborne sound insulation models, masonry partitions, simple predictive equations.

## 1 Introducción

El desarrollo de modelos del aislamiento acústico de elementos constructivos ha constituido desde principios del siglo pasado uno de los objetivos principales de la acústica de edificios. Conocer las magnitudes de que depende y su forma analítica ha atraído la atención de bastantes acústicos destacando sobre todo Cremer [1] y Josse [2]. Desde el punto de vista práctico estos modelos han contribuido y contribuyen a la optimización de productos tradicionales y al desarrollo de otros nuevos que facilitan la consecución de mayores cotas de calidad acústica de los edificios [3], [4].

En el momento actual, y muy particularmente en España con la entrada en vigor del CTE-DB HR, estos modelos permiten dotar a los modelos generales de predicción del aislamiento acústico en edificios de una gran agilidad dinámica para encontrar las soluciones más idóneas de acuerdo con los niveles de exigencias en vigor [5], evitando el tedioso y poco eficaz método de prueba y error. Encontrar las geometrías más idóneas y los elementos constructivos compatibles con una determinada tecnología constructiva e incluso mejorar ésta pasan por un uso adecuado de estos modelos.

Pero aun más, conviene descender hasta los modelos específicos de las distintas tipologías de productos [6], al necesitar minimizar los errores entre los supuestos de un diseño o proyecto y el producto final terminado. La optimización final dependiente de las preferencias de diseñadores y constructores particulares será entonces el último peldaño a superar en este proceso.

Como modelo general de predicción del aislamiento frente al ruido aéreo de elementos en placa en función de la frecuencia,  $R(f)$ , tenemos nuestras preferencias y usaremos en este trabajo el modelo de tipo analítico y explícito al que se refiere un apéndice de la norma UNE EN 12354 [7]. Usa como magnitudes específicas del constituyente material de la placa (de espesor  $w$ ) la densidad, la velocidad de las ondas longitudinales y el factor de pérdidas:  $\rho$ ,  $c_1$ , y  $\eta$  respectivamente.

Abordamos este trabajo el caso tan difundido en nuestro país como son los divisorios de mampuestos y en particular el de mampuestos de ladrillo que tienen más complicaciones de las que pueden parecer en principio.

Se ha seguido un método de análisis comparativo de modelos versus población de resultados experimentales seleccionados, de un laboratorio, para evitar errores cruzados. Después se pueden verificar con los resultados de otros laboratorios.

En las fases iniciales de este estudio se consideraron los divisorios como homogéneos aunque usando los valores ‘efectivos’ de la densidad y parámetros elásticos correspondientes a capas de ladrillo entre enlucidos de yeso, que se abandonó a continuación después de comprobar que, aparte de alguna complicación del cálculo, no aportaba nada sustantivo.

## 2 Predicción de índices de aislamiento acústico globales

El Código Técnico de la Edificación implantado en España en 2007, en cuanto a exigencias acústicas (DB HR), [8], utiliza el índice global  $R_A$ , de aislamiento frente al ruido aéreo para caracterizar los elementos constructivos tipo placa. Para mediciones experimentales según UNE EN ISO 140-3, o sus equivalentes numéricos para modelos predictivos, viene dado, en su forma más general, por la ecuación:

$$R_A = \left( 10 \lg \sum_{f=f_i}^{f_n} 10^{A_i/10} \right) / 10 \lg \sum_{f=f_i}^{f_n} 10^{(-R_i+A_i)/10} \quad (1)$$

donde  $A_i$  y  $R_i$  son respectivamente los valores de la ponderación  $A$  (norma CEI) y del índice de aislamiento frente al ruido aéreo  $R$ , en la frecuencia o banda de frecuencia  $f_i$ .

Usando el modelo para predicción numérica de  $R(f)$  incluido en la norma UNE EN 12354-1, Moreno et al. [9], demuestran que cada material conformado en placa tiene su ley de masa  $R_{A,mat}(m)$ , y que la media de los materiales de construcción usados en España, y en la mayoría de los países, es muy próxima a la incluida en el DB HR del CTE como Ley de Masa empírica. Este modelo necesita el espesor ( $w$ ), densidad ( $\rho$ ), velocidad de las ondas longitudinales ( $c_l$ ) y factor de pérdidas ( $\eta$ ) de un material en placa para obtener su curva  $R(f)$ , que se puede adaptar a un laboratorio conforme a UNE EN ISO 140-1.

Para el caso de divisorios de ladrillo, se usan de un conjunto de mas de 80 casos, todos medidos en las instalaciones del Instituto de Acústica, SCIC, de Madrid. Si todos los divisorios respondieran a una misma terna de valores el modelo anterior daría una buena aproximación de este conjunto de resultados experimentales. Usando la terna  $\rho = 1600 \text{ Kg/m}^3$ ,  $c_l = 3100 \text{ m/s}$  y  $\eta = 0.01$ , aceptada usualmente para la arcilla cocida se obtiene una gráfica que aparece en la figura que sigue comparada a los resultados experimentales citados.

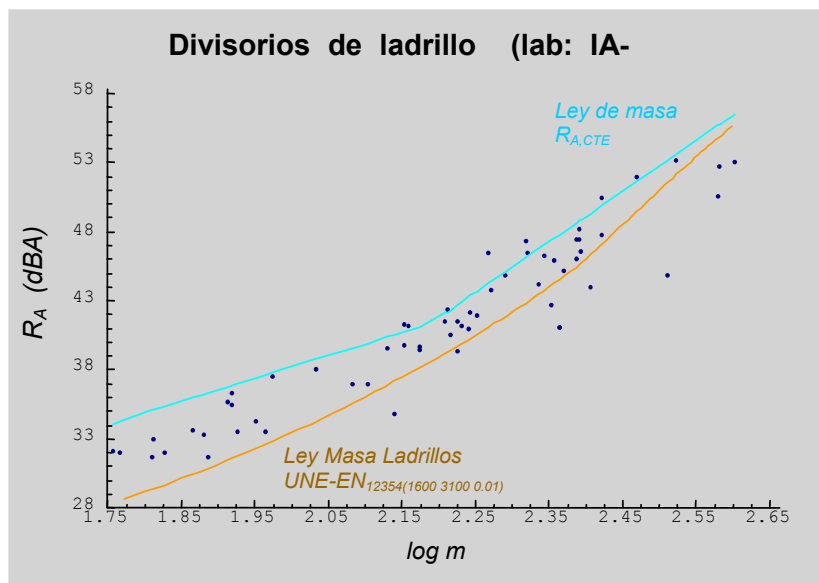


Figura 1 – Resultados experimentales, Ley de Masa CTE, y Ley de Masa EN general para ladrillos

La curva numérica (continua en color oro) da una pobre aproximación de los resultados experimentales. Su uso en métodos predictivos del aislamiento en edificios llevaría a valores en exceso inferiores a los que se conseguirían en los casos reales, sobre todos para masas por debajo de  $225 \text{ Kg/m}^2$ .

Para superar las deficiencias de esta aproximación puede pensarse en valores mas adecuados de los parámetros  $w, \rho, c_l$  y  $\eta$ , para lo cual se exploró la viabilidad de obtenerlos a partir de los datos iniciales de los divisorios y de las propias gráficas  $R(f)$ .

Para ello se necesitan algunas condiciones complementarias a cuyo fin se usaron las dos ecuaciones siguientes:

$$w \cdot f_c = (c^2 \sqrt{3}) / (\pi c_l) \quad (2)$$

$$m \cdot f_c = \sqrt{(10^{(R(f_c)+50)/10}) / \eta} \quad (3)$$

La primera es bien conocida y suele usarse para definir el valor de la frecuencia crítica de una material conformado en placa. La segunda ecuación da el valor del aislamiento en la frecuencia crítica [10] que nosotros preferimos frente a otras propuestas.

Ambas ecuaciones son hipérbolas que se convierten en líneas rectas por aplicación de logaritmos: ambas de pendiente -1, en los planos de ejes coordenados  $(w, f_c)$  y  $(m, f_c)$  respectivamente. Para un divisorio dado estas ecuaciones nos permiten determinar sus valores  $c_l$  y  $\eta$  respectivamente. En ambas ecuaciones resulta crucial la determinación de la frecuencia crítica a partir de la gráfica  $R(f)$ .

Normalmente esta determinación de  $f_c$  en las gráficas no es suficientemente clara, lo cual se simplifica mediante la información facilitada por un modelo concreto del aislamiento frente al ruido aéreo. En este trabajo se toma el incluido en un apéndice de la norma EN 12354. Según este modelo  $f_c$  es ‘algo inferior’ a la frecuencia en que  $R(f)$  cambia bruscamente de pendiente para trazar la parte de variación suave, correspondiente a  $f > f_c$ .

Una serie amplia de pruebas sobre la población de divisorios inicial para adquirir soldadura en la determinación de  $f_c$  ya con uso numérico-gráfico del método EN, nos ha indicado la conveniencia de aplicar el procedimiento a las curvas de los divisorios seleccionado ya clasificados en grupos específicos según los tipos de ladrillos huecos, macizos y termoarcilla. También se han analizado la importancia de los morteros, de los enlucidos y de las piezas gran formato (GF). El mortero queda contabilizado normalmente mediante el incremento de la densidad real del divisorio. Los enlucidos sin embargo tienen un efecto más drástico en  $R(f)$ : causan un decremento general en bajas frecuencias y un decremento de intensidad progresiva al aumentar la frecuencia, afectando al tramo  $f > f_c$ , con lo cual enmascaran el efecto de  $\eta$  en este intervalo, lo que aconseja la introducción de un ‘factor de pérdidas efectivo’ variable con la frecuencia, del que hablaremos más adelante. Las piezas GF sin mortero en sus ensambles verticales presentan efectos parecidos a los citados para la carencia o defectos en los enlucidos, mientras que montadas con mortero en estas uniones no difieren apreciablemente de las piezas de formato normal.

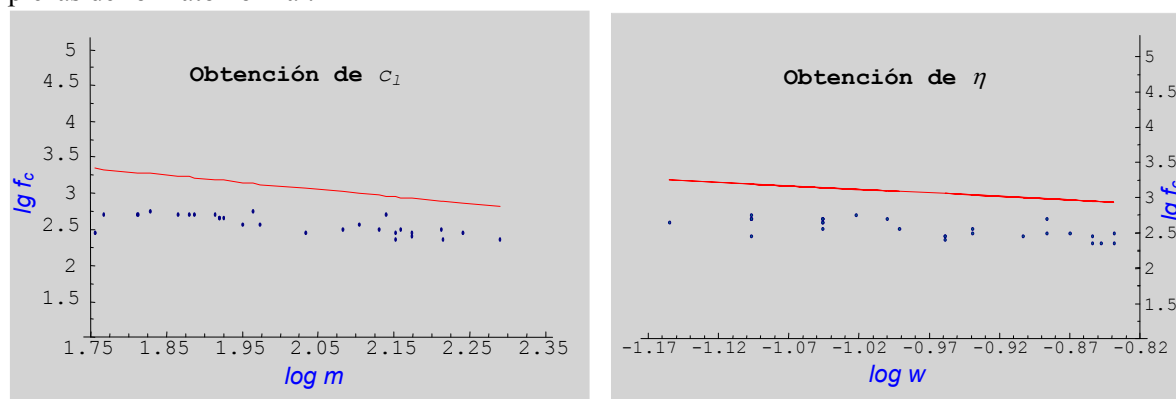


Figura 2 – Formas experimentales de las ecuaciones (1) (izquierda, para  $c_l$ ) y (2) (derecha para  $\eta$ ), forma logarítmica, para ladrillos huecos. En rojo rectas de pendiente -1.

La figura 1, anterior, contiene las gráficas de las ecuaciones (1) y (2), compuestas con los resultados ‘experimentales’ obtenidos para ladrillos huecos a las que se han superpuesto rectas de pendiente -1.

Aunque la apariencia es buena, un estudio más detallado muestra una dispersión patente en torno a un valor medio. Es incluso posible clasificar estos puntos (casos) en grupos cada uno en torno a un valor  $c_l$  en la gráfica izquierda. Sucede análogamente en la gráfica de la derecha para  $\eta$ , pero los grupos no están formados por los mismos divisorios lo cual solamente permite considerar todos juntos y caracterizarlos con un valor medio. Situaciones parecidas se obtienen para los divisorios de ladrillos perforados y bloques térmicos (termoarcilla).

Con los valores medios de  $\rho$ ,  $c_b$  y  $\eta$  para cada grupo de divisorios se han calculado las respectivas leyes de masa para  $R_A$  y comparado a los valores experimentales, que en general no representan

buenas aproximaciones, excepto para termoarcilla en el montaje moderno con el mortero de las llagas separados en dos hiladas, cada una hacia una cara externa del divisorio. Con variaciones de los valores anteriores de  $\rho$ ,  $c_l$ , y  $\eta$ , a veces pequeñas, se han obtenido aproximaciones de las leyes de masa muy buenas, de hecho análogas a los polinomios de mejor aproximación por mínimos cuadrados de grados variables que en ocasiones alcanzaba el grado 6 o mayor.

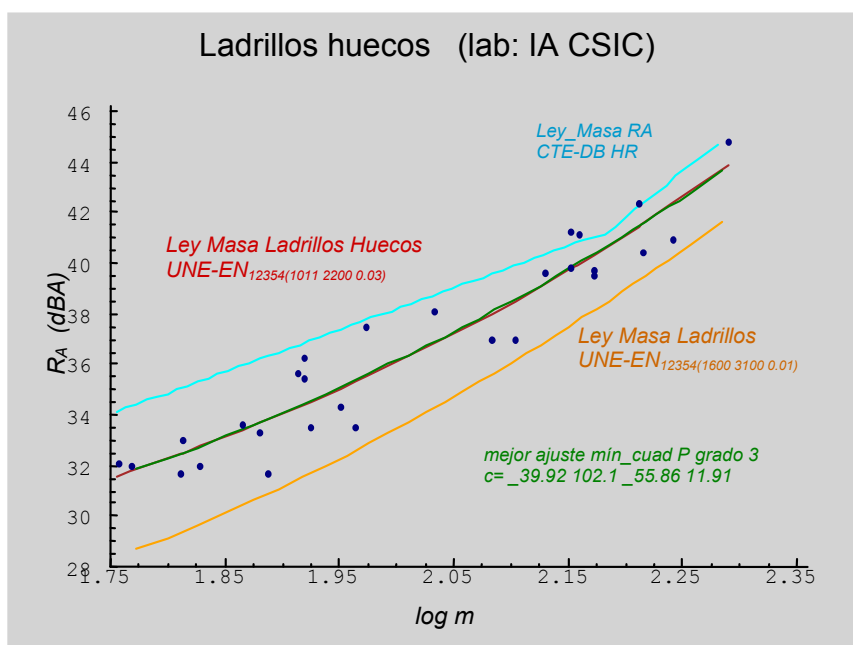


Figura 3 – Puntos experimentales, leyes de masa y polinomio de mejor ajuste para ladrillos huecos

Tabla 1 – Parámetros mecano-acústicos y leyes de masa polinómicas de los grupos de divisorios de ladrillo

Piezas constitutivas de los divisorios		Origen de los datos	Densidad $\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Velocidad $c_l$ m/s	Factor de pérdidas $\eta$	Ley Masa $R_A$ (rectas de regresión)
Ladrillos huecos		Obtenidos	1011	1695	0.058	$-8.6 + 22.55 \lg(m)$
		Mejor aprox.	1011	2200	0.03	$m <: 220 \text{ Kg/m}^2$
Ladrillos perforados		Obtenidos (1/2 pié)	1750	1800	0.07	$-6.3 + 22.86 \lg(m)$
		Mejor aprox. (todos)	1850	1800	0.09	$180 <: m <: 450 \text{ Kg/m}^2$
Bloques térmicos	Llagas plenas	Obtenidos	1100	1525	0.13	$-21.2 + 28.87 \lg(m)$
		Mejor aprox.	1060	1650	0.065	$145 <: m <: 390 \text{ Kg/m}^2$
	Mortero en 2 hiladas	Obtenidos	1000	950	0.05	$3.5 + 17 \lg(m)$
		Mejor aprox.	1000	950	0.05	$218 <: m <: 325 \text{ Kg/m}^2$

Se han encontrado desviaciones típicas inferiores a 1.5 dBA, en todos los casos

Los enlucidos tienen una gran importancia en el aislamiento acústico. Su carencia disminuye el aislamiento respecto a con dos enlucidos, en cuantías muy considerables: 10 dBA o más. La presencia de un enlucido (en una cara) puede no disminuir el aislamiento de manera notable, o si, pero si además las piezas de ladrillo son machihembradas y no llevan mortero en esta unión, el aislamiento acústico disminuye prácticamente igual que si careciera de ambos enlucidos. Se puede decir que esta disminución

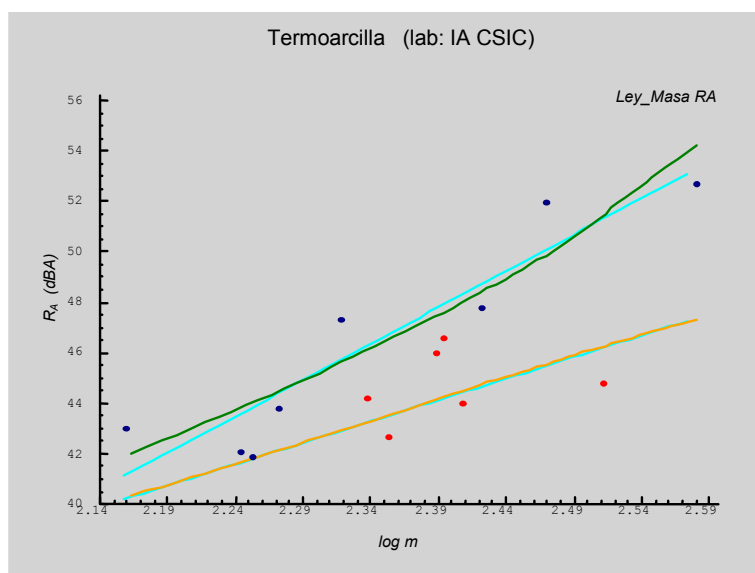


Figura 4 – Puntos experimentales y leyes de masa para divisorios de termoarcilla. Montaje antiguo: puntos azules (experimentales), continua verde oscuro (UNE EN 12354) y turquesa (recta de regresión). Montaje moderno: puntos rojos, línea oro, y recta turquesa

### 3 Predicción de curvas de aislamiento $R(f)$

Cuando se usan los valores  $\rho$ ,  $c_l$  y  $\eta$  y la masa, para predecir las curva  $R(f)$  de aislamiento de un divisorio cualquiera de ladrillo dentro de un grupo, mediante el modelo EN los resultados no son tan convincentes como para el índice global  $R_A$ . Es mas incluso se puede afirmar que se trata de malas predicciones. Aplicando este procedimiento a un buen número de los casos experimentales disponibles se observan tres tipos de diferencias: por debajo de la frecuencia critica los valores experimentales son inferiores a los numéricos, en la frecuencia critica los valores numéricos son inferiores y para frecuencias superiores son mayores que los experimentales y además con pendientes mayores y menores curvaturas.

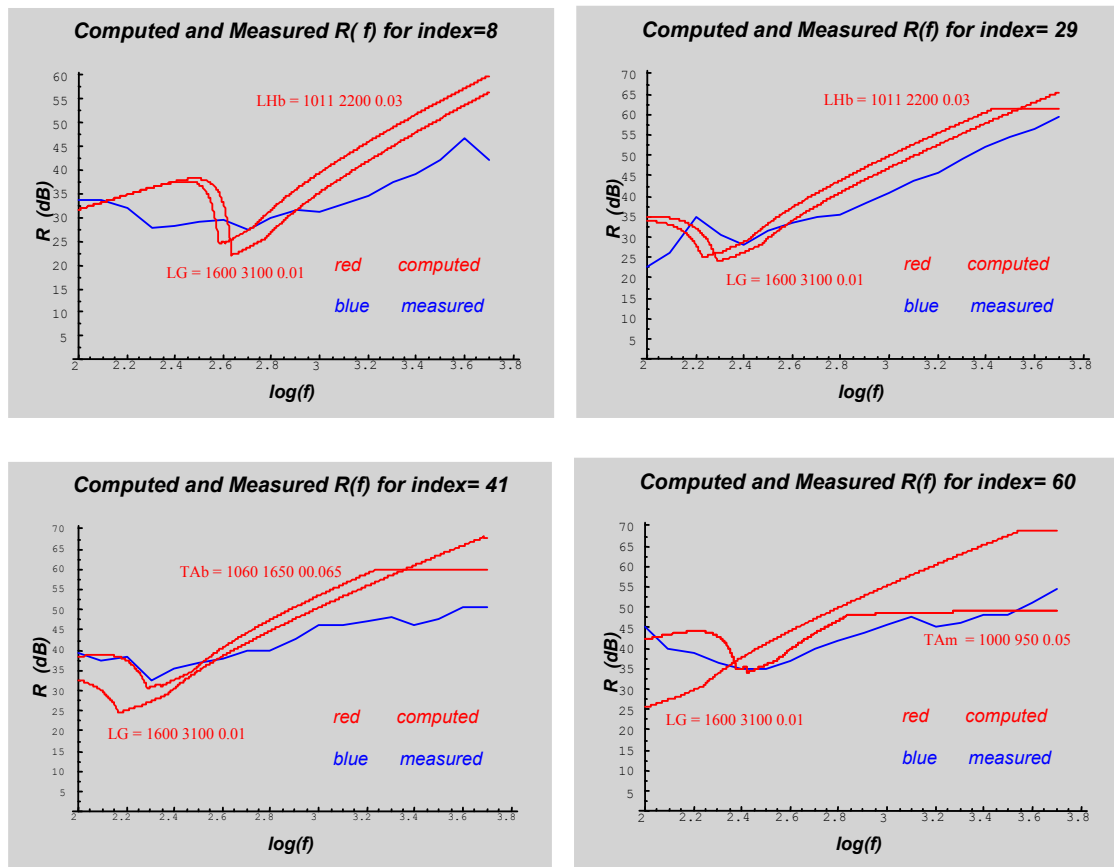


Figura 5 – Curvas  $R(f)$  experimentales (azul) y teóricas (rojo) para los parámetros mecano-acústicos y divisorios indicados. Fila superior: ladrillos huecos. Fila inferior: termoarcilla (TAb y TAm).

Habida cuenta de estas consideraciones y las anteriores sobre la falta de estanquidad en la que la aplicación de los morteros y enlucidos tiene tanta importancia, se plantea un procedimiento para mejorar la adaptación entre los valores numéricos y los experimentales introduciendo las hipótesis:

a) los divisorios son como mínimo ortotrópicos (que constructivamente se justificaría fácilmente para algunos tipos de divisorios, tales como termoarcillas y varios de gran formato), y

b) el factor de pérdidas es función de la frecuencia pudiendo tomar distintas cuantías y formas.

Se usarán los valores de  $f_c$ , determinados con anterioridad y se valorarán, también a partir de las figuras  $R(f)$  de cada divisorio, los valores secundarios correspondientes a la otra dirección que se supone a  $90^\circ$ .

Se considerará a continuación el grupo de divisorios de ladrillos huecos por disponer de una población mas amplia.

Para encontrar las múltiples posibles formas del factor de pérdidas y basándose en la forma de las curvas  $R(f)$  experimentales se ha ‘diseñado’ la función

$$\eta(f) = \frac{400}{300 + (f - 30)^{g(n)}} \quad \because \quad g(n) = 1.06^n \quad \because \quad n = \pm \text{entero} \quad (4)$$

Esta función proporciona una gran variedad de posibles formas. Normalizando al primer valor ( $f=100$  Hz), y haciendo  $15 > n > -10$ ,  $n$  entero sucesivo decreciente, da la figura que sigue, que contiene el arsenal de curvas utilizado en este estudio.

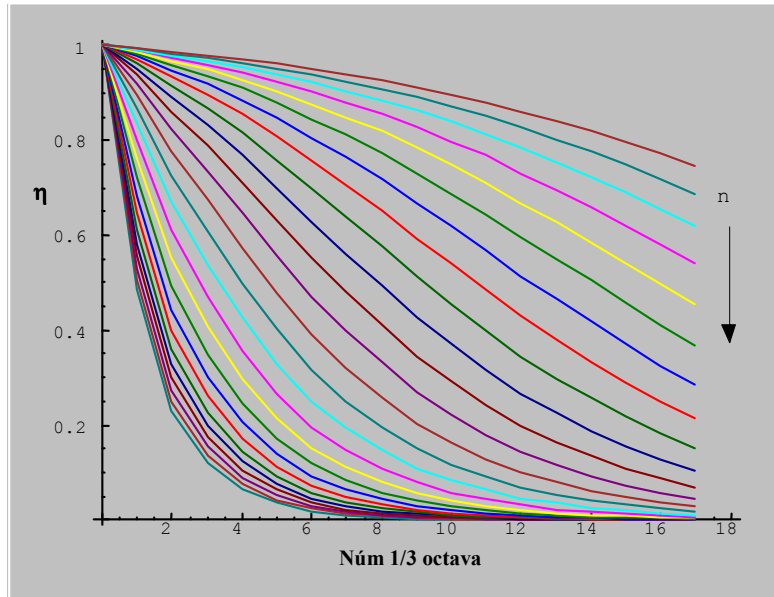
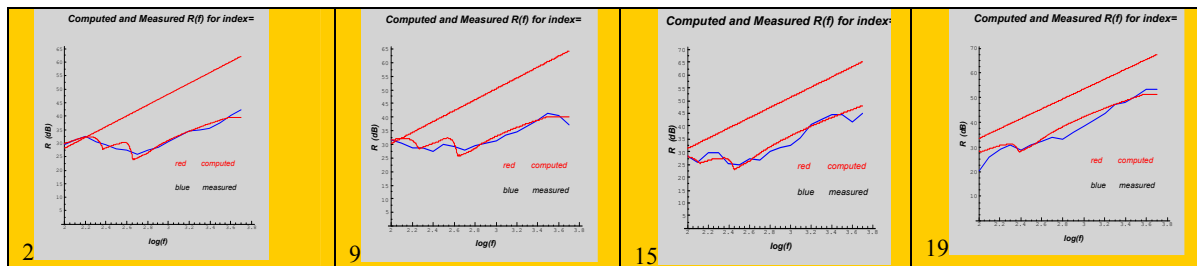


Figura 6 – Formas hipotéticas de  $\eta(f)$  consideradas

El entero  $n$  selecciona la forma y multiplicando por un factor adecuado se adapta la cuantía. La función resultante constituye el factor de pérdidas totales (internas mas periféricas y de radiación). Cada una de las dos direcciones de la placa diferenciadas por su  $c_i$ , da una curva de aislamiento. Hemos elegido la media de las dos como regla de composición que es la mas sencilla y acorde con la hipótesis de Cremer de aislamiento en la frecuencia crítica y en la línea de Heckl [11]. De este modo los baches de  $R(f)$  en  $f=f_c$ , quedan bastante neutralizados, mas en consonancia con la realidad experimental.

El proceso de ajuste también afecta a los dos valores de  $f_c$  estimados inicialmente en las figuras experimentales  $R(f)$ . Afecta poco, casi nada, al valor superior y el cambio está condicionado por el modelo EN, en el cual la rama de aislamiento para  $f > f_c$  es básica para determinar  $f_c$ , ya no condicionada por los valores discretos de  $R(f)$  experimental. El proceso de ajuste elaborado, que se hace visualmente sobre las figuras resultantes, converge muy rápidamente.

Solamente se han considerado los divisorios de ladrillo hueco re-seleccionados en el proceso anterior de ajuste de los valores globales  $R_A$ . En total 28 divisorios. La figura que sigue agrupa los resultados para los siete divisorios de orden 4 8 12 16 20 24 28 ( $28=7 \times 4$ ), que corresponden a los números de orden de nuestro archivo que figuran en cada gráfica y recorren regularmente el intervalo de masa.





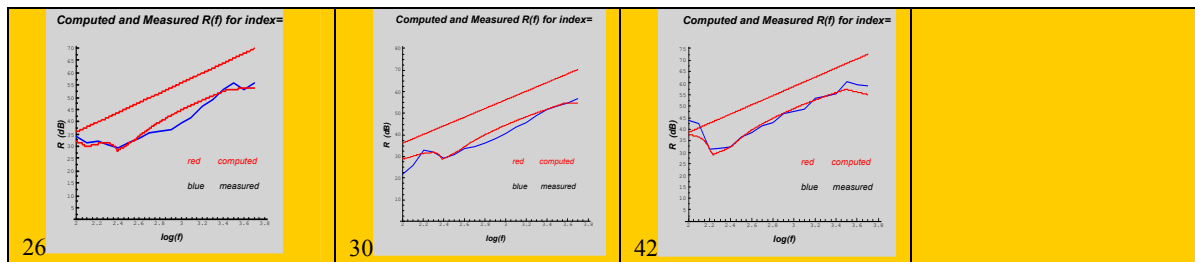


Figura 7 – Ajuste de curvas experimentales con hipótesis de placas ortótropas y  $\eta(f)$  variable

La bondad de los ajustes (compárese con la figura 5) y la rapidez en conseguirlo con el protocolo manual citado, están a favor del fundamento de las hipótesis de partida. El estudio está en curso y se siguen analizando ‘leyes’ de variación de permitan una derivación fácil de  $f_{c1}$  y  $f_{c2}$ , así como de los factores de forma y cuantía del factor de pérdidas. En la figura que sigue se repiten los ajustes de los casos de la figura anterior, a partir de los valores medios tanto de las dos frecuencias críticas como de los parámetros de forma y cuantía del factor de pérdidas, expresados en función exclusiva de la masa del divisorio.

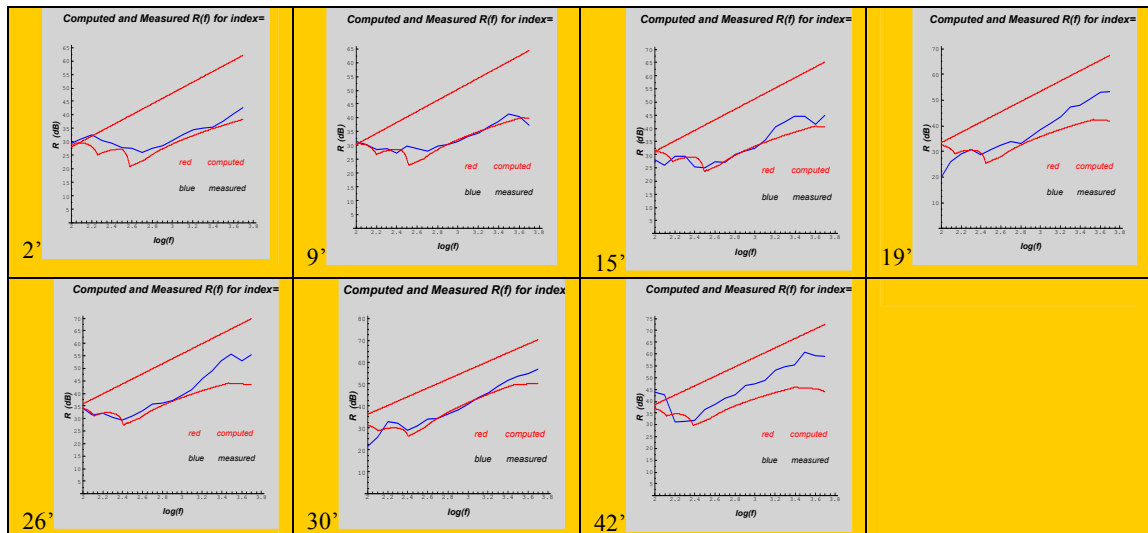


Figura 8 – Ajustes usando valores medios de  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ , y de cuantía y forma de  $\eta(f)$  en función de  $m$

No es necesario aclarar que este nuevo modelo permitiría la simulación completa de las curvas  $R(f)$ , en cualquier tipo de aplicación acústica, incluidas las que consideran especificaciones en función de la frecuencia, situación hacia la que concretas evolucionarán las exigencias del CTE.

## 4 Conclusiones

Por su interés en métodos predictivos se han obtenidos los valores  $\rho$ ,  $c_1$  y  $\eta$  que proporcionan mediante el modelo EN las leyes de masa de ladrillos huecos, perforados y bloques térmicos (termoarcilla), prácticamente coincidentes con los polinomios de mejor ajuste, por el método de mínimos cuadrados, de los valores experimentales de una población de casos seleccionados. Para estos casos se dan además sus mejores aproximaciones con rectas de regresión en función de  $lg(m)$ .

Mediante las hipótesis de que estos divisorios se comportan como placas ortótropas, con dos frecuencias críticas principales, y de que el factor de pérdidas total es función de la frecuencia se han

conseguido buenas aproximaciones de las curvas  $R(f)$  experimentales, desarrollando polinomios sencillos para describir estos parámetros en función exclusiva de la masa para el caso de divisorios de ladrillos huecos con gran probabilidad de hacerla extensiva a los otros tipos principales de divisorios de ladrillo: perforados y temoarcilla.

Se facilita de esta manera el uso eficiente con fines de diseño y optimización de este tipo de divisorios en modelos de propagación acústica en edificios.

## Agradecimientos

Una parte sustancial de este estudio se ha llevado a cabo dentro del proyecto BIA 2004-07 102-CO3-01 del Plan Nacional de Investigación 2004-2007, de España.

## Referencias

- [1] Cremer, L. Theorie der Schaldämmung dünner Wände bei schrägen Einfall. *Akust.Zeitschrift*, 7, 1942, 81-104.
- [2] Josse, R.; Lamure, J. Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*, 14, 1964, pp. 266-280.
- [3] Moreno, A.; Simón, F.; Colina, C.; Fernández, M<sup>a</sup> J. Lightweight wall backings: a emergent technique on acoustic insulation against airborne noise, *Revista de Acústica*, vol.36 Especial Nums. 3-4, 2005.
- [4] Borg, V. ; Villot, M. ‘Constructions en brique et acoustique: réponses à la réglementation, *Acoustique&Techniques*, Núm. 23, Octubre 2000, pp 24-35.
- [5] Peña, M. A.; Colina, C.; Moreno A. Software to predict acoustic insulation in buildings in accordance with EN 12354/1/2, *Revista de Acústica*, vol.33 Especial, núms. 3-4, 2002.
- [6] Moreno, A. ; Simón, F.; Colina, C.; Fernández, M<sup>a</sup> J.; Luque P.; Fernández, D. ‘Divisorios ligeros de ladrillo que superan las exigencias del CTE’, I Congreso Nacional de Aislamiento Térmico y Acústico, de AECOR, Madrid, 7-9 Junio 2006.
- [7] UNE EN 12354-1, Acústica de Edificios: estimación de las propiedades acústicas de edificios a partir de las propiedades de los elementos . Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo entre recintos.
- [8] REAL DECRETO 1371/2007, de 19 de octubre por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación, *BOE 254, 23 Octubre 2007*.
- [9] Moreno A., Simón, F., Colina C., Fernández, M<sup>a</sup> J. ‘Estudios preliminares sobre fundamentos teóricos de la ley de masa empírica para  $R_A$ ’, *Revista de Acústica*, vol. 36 Especial, Nums. 3-4, 2005.
- [10] Cremer, L. Die wissenschaftlichen Grundalgen der Raumakustik, vol 3, Hirzel Verlag, Leipzig 1950
- [11] Vér I. L.; Holmer C. I. Interaction of sound waves with solid structures, Chapter 11, en L. L. Beranek, *Noise and Vibration Control*, McGraw-Hill, 1971;