

ESTUDIOS PRELIMINARES SOBRE FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA LEY DE MASA EMPIRICA PARA R_A

PACS: 43.55.Ev

Moreno, Antonio; Simón, Francisco; Colina, Carlos; M^a J. Fernández
Instituto de Acústica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Serrano 144
28006 Madrid. España
Tel: 34 915 618 806
E-Mail: amoreno@ia.cetef.csic.es

ABSTRACT

The empirical mass law for single number ratings of sound insulation, which become popular around seventies in some countries for R_A , is analysed under the basis of up-dated theoretical models of sound insulation for single leaf walls. Mass-law is found to depend upon the sample of walls used. However this influence, for usual building materials, is bounded to rather low values along the entire mass range, then supporting the idea of a certain 'mean mass law for snrs'. Large discrepancies with this 'mean mass-law' should be attributed to the laboratory itself, then supporting the idea that closeness of experimental results of a laboratory to that mass law could be used as a positive laboratory quality parameter.

RESUMEN

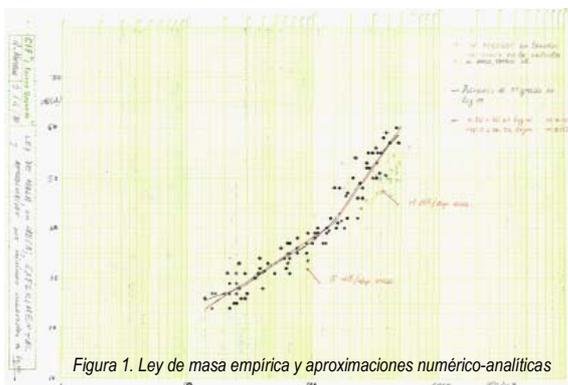
Se analizan las bases teóricas que fundamentan la ley de masa empírica del aislamiento global R , para divisorios monolíticos de una sola hoja. La ley de masa depende de la población de materiales usada, que para materiales usuales de construcción, converge en una 'ley de masa media'. Esta propiedad puede usarse como parámetro de calidad de un laboratorio, pudiendo afirmarse que resultados experimentales de un laboratorio ajustados a esta ley de masa media son un indicador positivo del laboratorio mientras que valores discrepantes son un indicador adverso.

ANTECEDENTES

La inclusión en la NBE-CA Condiciones Acústica en los Edificios del entonces Ministerio de Obras Públicas [1], de una Ley de Masa para el aislamiento global de divisorios se fundamentó en resultados experimentales obtenidos en prestigiosos laboratorios y en el Instituto de Acústica para divisorios comunes en la edificación de aquellos años. Justo es reconocer la destacada ayuda recibida del CSTB que nos facilitó la consulta de sus datos experimentales [2], [3]. También se consultaron datos de otras instituciones y laboratorios reputados en aislamiento acústico[4], [5].

El ajuste, por mínimos cuadrados, a los resultados experimentales mediante un polinomio de grado elevado (grado siete y superiores) [6], mostraba la buena aproximación que

se podía conseguir mediante dos rectas de pendientes aproximadas de 5 y 11 dB/octava por debajo y por encima de 150 Kg/m², respectivamente. Figura 1



laboratorios conforme a la norma Une 140, es debida al comportamiento intrínseco de los divisorios como aislantes del ruido aéreo, y a las características del aislamiento global R_A , en función de la forma de $R(f)$ [9].

No obstante, de la ley de masa anterior, se sospecha alguna fluctuación para masas inferiores a 20 Kg/m² que permita alcanzar un aislamiento de 0 decibelios para m igual a 0 kg/m² con una pendiente de 6 dB por duplicación de masa.

MODELO TEORICO DEL AISLAMIENTO DE PAREDES DE UNA HOJA

El modelado del aislamiento frente al ruido aéreo (incluso de paredes de una hoja) sigue teniendo un gran interés y se siguen desarrollando modelos computacionales [10], [11], y haciendo investigaciones avanzadas sobre aspectos directamente relacionados [12], [13], con objeto de mejorar la equivalencia entre los valores calculados y los medidos. Para nuestros propósitos, mas útiles que estos modelos computacionales basados en técnicas numéricas avanzadas, son los modelos descriptivos según las propiedades de los elementos. De entre estos modelos elegimos y usaremos aquí el incluido en la norma UNE EN 12354/1 Anexo B. Resulta de la aportación de un sinnúmero de investigadores entre los que cabe destacar a Cremer, Josse, Heckl, Maidanik, Sewell, Ljunggren, Gerretsen y Novac.

Como características generales del modelo hay que señalar que el aislamiento depende de magnitudes macroscópicas de los divisorios tales como densidad, parámetros elásticos, tamaño de la muestra y elementos constructivos circundantes. Sitúa bien la coincidencia y los valores de aislamiento para frecuencias por debajo de ella, y también la disminución de aislamiento a altas frecuencias al aumentar el grosor d del divisorio hasta valores cercanos a la primera resonancia de las ondas longitudinales ($f_r = c_l / 2d$). Incluye el efecto de las pérdidas en los divisorios circundantes lo que le hace aplicable en aproximaciones tanto de montajes en laboratorio como en las edificaciones reales. En todo caso hay que señalar que este modelo, sobre todo por el aislamiento en la zona de coincidencia, da genéricamente valores del índice global de aislamiento R_A , inferiores a los reales medidos en el laboratorio, en una cuantía que puede estimarse en 1 a 2 dB.

La posición de la zona de coincidencia (particularmente la frecuencia crítica) en el intervalo de las frecuencias de interés (100-5000 Hz) y la cuantía del aislamiento en ella juegan un papel decisivo en los valores del índice global del aislamiento R_A (y consecuentemente también en R_w):

- a) cuando está por encima de este intervalo domina la masa y las curvas $R(f)$ presentan pendientes en torno a 5 dB/octava;
- b) cuando está por debajo de este intervalo, domina el factor de pérdidas totales, y las curvas $R(f)$ presentan pendientes medias efectivas en torno a 10 dB/octava, (cuando, además, los divisorios son suficientemente gruesos la última parte de la curva $R(f)$ es decreciente);

d) cuando está dentro del intervalo de frecuencias de interés es el elemento dominante en el valor global R_A (o R_w), pudiendo neutralizar en buena medida valores de aislamiento grandes en el resto del intervalo de frecuencia.

Para un material dado la variación del espesor ocasiona movimientos de la curva de aislamiento tanto en la cuantía del índice de aislamiento como en la posición de la zona de coincidencia.

En el uso de este modelo, hemos programado dos variantes relativas a la cuantía del aislamiento en la frecuencia crítica: una conforme a la norma citada EN 12354/1, y otra conforme a Maidanik. En cuanto a la frecuencia también se han previsto dos variantes, una para tercios de octava y otra para 'frecuencia continua' (1000 puntos, equiespaciados, entre 100 Hz y 5000 Hz). Cuando se usa la aproximación de Maidanik las curvas obtenidas para las leyes de masa son continuas, apareciendo discontinuidades cuando se usa la aproximación EN. Este efecto se acentúa algo cuando se pasa de frecuencia continua a tercios.

MATERIALES DE CONSTRUCCION

Los elementos constructivos de una sola hoja, tanto horizontales (forjados y cubiertas) como verticales (paredes y tabiques) están constituidos de una variedad relativamente limitada de materiales que puede variar y de hecho varía de unas regiones a otras y de unos países a otros en función sobre todo de las condiciones climáticas y de razones de mercado.

Dado un material, el conjunto de los valores de los parámetros elásticos y su densidad, para una masa por unidad de superficie de pared fija sitúa la frecuencia de coincidencia en un punto de la escala de frecuencias. Esta posición se desplaza hacia frecuencias inferiores al aumentar la masa (aumento del espesor) y viceversa. El aumento de masa causa además una cierta deformación de la curva de aislamiento en general y un desplazamiento en la misma hacia valores mayores de aislamiento.

LEY DE MASA

Las cuestiones que nos proponemos responder pueden resumirse de la siguiente manera: ¿Responden todos los materiales a la misma ley de masa?. Si no fuera así ¿las variaciones entre los distintos materiales son suficientemente pequeñas (en general o para grupos de materiales constructivos) como para que tenga sentido hablar de ley de masa?. (Estas preguntas no implican las variaciones adicionales atribuibles a la medición experimental: variaciones debidas a las instalaciones, a los métodos y a las personas).

Si no se limita en intervalo de masas recorrido cada material posee en sentido creciente de masa una primera zona en que la frecuencia de coincidencia está por encima del intervalo de frecuencia y domina la masa en las curvas $R(f)$ cuyo incremento progresivo al aumentar la masa da un primer tramo recto en la ley de masa del índice global, R_A , de pendiente en torno a 5 dB al duplicar la masa. Al seguir aumentando la masa aparece en $R(f)$, en la zona alta de frecuencias el bache de aislamiento debido a la coincidencia, que se desplaza progresivamente hacia frecuencias menores causando primero una disminución de R_A para ir aumentando hasta conseguir valores de la pendiente cercanos e incluso algo superiores al valor indicado de 5 dB/duplicación de masa. Aumentos mayores progresivos de la masa acaban 'sacando' la zona de coincidencia aguda, por el extremo inferior del rango de frecuencia, que dada la pendiente habitual de las curvas de $R(f)$ en esta zona ocasiona incrementos prácticamente constantes en R_A , que otorgan a la ley de masa otro tramo recto de pendiente del orden de 12 dB por duplicación de masa. Si todavía es posible aumentar mas la masa del material nos encontramos con decrementos de $R(f)$ en la zona mas alta de frecuencia, lo que causa una progresiva disminución de la pendiente de $R_A(m)$ que suele estabilizarse de nuevo en unos 6 dB por duplicación de la masa.

Las amplitudes de cada una de las zonas anteriores así como su posición en el rango de masas considerado puede variar, incluso fuertemente, de unos materiales a otros dependiendo de su densidad y velocidad de propagación c_l .

Por tanto la respuesta a la primera pregunta que nos planteábamos es bastante clara y rotunda: NO, cada material tiene su 'ley de masa particular' para el índice global de aislamiento frente al ruido aéreo.

La Figura 2, obtenida usando las opciones 'frecuencia continua' y 'factor de radiación s/ Maidanik', muestra las leyes de masa para dos materiales antagónicos, el yeso-cartón y el plomo, y un tanto cuestionables, en cuanto a su uso en edificación, restringida a un pequeño intervalo de masa por metro cuadrado, aunque se hayan representado desde 20 a 1000 Kg/m².

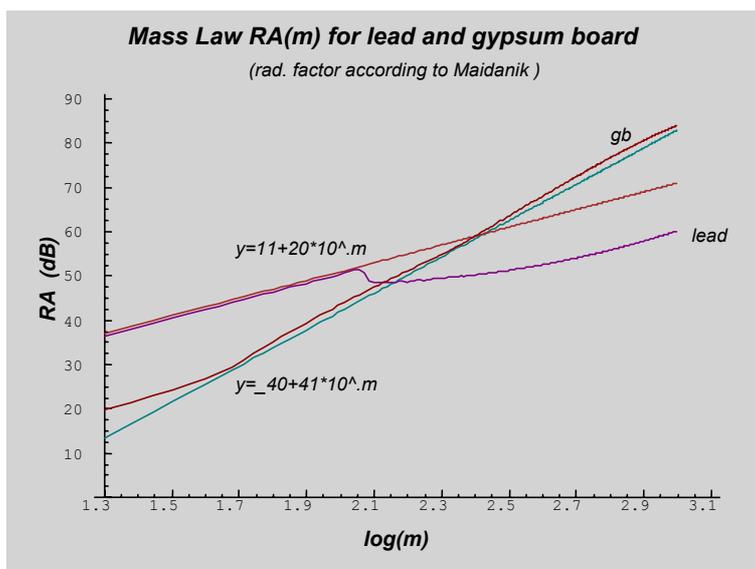


Figura 2. Ley de masa $RA(m)$ computada con el modelo teórico, para yeso cartón y plomo

El yeso-cartón, del que se ha supuesto que mantiene las propiedades para todos los espesores estudiados, representa valores muy próximos a los límites inferior de aislamiento a bajas masas y superior a masas altas, obtenibles para cualquier material. El plomo representa la situación inversa: límite superior a bajas masas e inferior a masas altas, aunque este último puede ser mas dudoso. En la misma figura 2 se han representado dos rectas cuya pendiente se ha ajustado a las pendientes de los tramos rectos de las funciones anteriores.

La Figura 3 muestra una ampliación hacia masas menores de los materiales de la figura anterior, aunque calculados con la variante 'factor de radiación de la norma EN'. Se aprecia claramente como se alcanzan para los dos materiales las condiciones suficientes de aproximación suficiente de la 'ley de masa teórica' en que todos los materiales de igual masa se comportan idénticamente, y que la pendiente es de 6 dB al duplicar la masa.

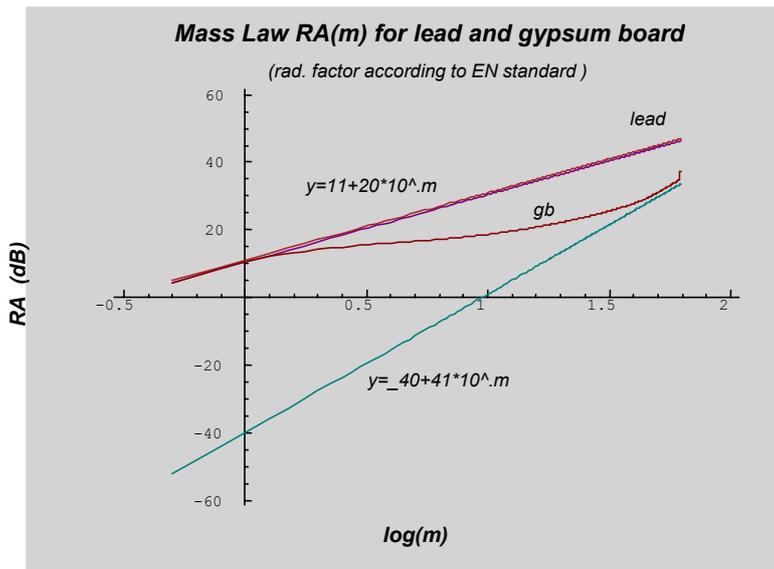


Figura 3. Ampliación de la Figura 2, para valores inferiores de la masa m

Por razones estructurales, o de espesor, casi ningún material se usa en toda la gama de masas aquí considerada de 20 a 1000 kg/m², ni en otras gamas más reducidas. Tal vez los divisorios a base de cemento pueden escapar a esta regla, aunque no son los más usuales en nuestro país. Los divisorios de materiales poco densos quedan excluidos en la gama alta de pesos por los grandes espesores requeridos. En la tabla que sigue se indican los espesores en cm necesarios para alcanzar 1000, 500 y 250 Kg, así como el peso máximo para 45 cm de espesor u otra circunstancia de uso (15 mm para el aluminio, 20 mm para el vidrio y 60 mm para la madera).

Material	Espesor (cm) Para conseguir:			
	1000 (Kg/m ²)	500 (Kg/m ²)	250 (Kg/m ²)	Masa límite para 45 cm (Kg/m ²)
Cemento (armado)	43.5	21.7	11	1035
Aglomerados silicocalcáreos	57.1	28.6	14	788
Cemento aligerado	76.9	38.5	19	585
Cemento celular (trat. Autoclave)	153.8	76.9	38	293
Vidrio (plano)	40	20	10	50 ⁽¹⁾
yeso laminado (cartón-yeso)	153.8	76.9	38.5	293
madera	166.7	83.3	42	40 ⁽²⁾
ladrillo (macizo)	62.5	31.3	16	720
yeso (en placa)	111.1	55.6	28	202
aluminio	37	18.5	9	40 ⁽³⁾

⁽¹⁾ 20 mm ; ⁽²⁾ 50 mm ; ⁽³⁾ 15 mm

Usando los intervalos de masa correspondientes a la última columna, en la Figura 4, usando las opciones 'factor de radiación según norma EN' y 'frecuencia en tercios de octava', se presentan los resultados correspondientes a esos materiales (puntos '•••'), junto con la ley de masa para R_A prevista en el CTE-DB-HR (línea continua azul) y el mejor ajuste por mínimos cuadrados con un polinomio de grado 9 (línea continua en rojo). Es autoexplicativa:

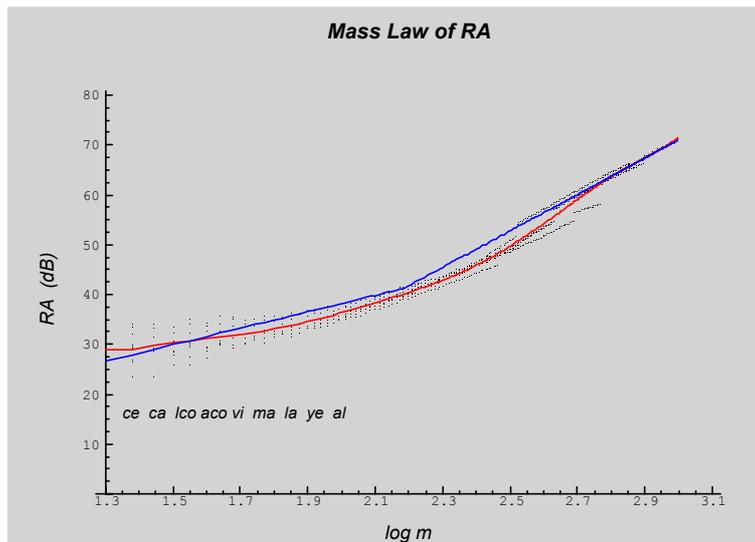


Figura 3. Ley de masa $R_A(m)$ media computada con el modelo teórico, para materiales de edificación y ley de masa empírica del CTE-DB-HR

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las variaciones de los parámetros macroscópicos constitutivos de los divisorios de construcción respecto de los utilizados son suficientemente escasas como para que causen modificaciones significativas respecto de los resultados aquí obtenidos.

Los materiales con densidad mayor suelen presentar valores de R_A superiores a los de densidades inferiores, para masas inferiores a unos 150 Kg/m², sucediendo lo contrario por encima de 150 Kg/m².

La dispersión de R_A presenta valores casi constantes entre 100 y 250 Kg/m², acotados entre valores máximos estimables en ± 1 dB. En esta zona, que se podría denominar zona de cruce, se compensan los efectos contrapuestos de la densidad y de la velocidad de las ondas longitudinales, obteniéndose valores de aislamiento prácticamente independientes del material. Esta propiedad, junto con la pendiente del aislamiento en función de la masa por unidad de área puede usarse para chequear si un laboratorio es apto para medir aislamientos de divisorios de una hoja: si da valores por debajo presenta transmisiones indirectas importantes y si da valores bien por encima (5 dB o más), se han producido montajes inadecuados (muy probablemente resonantes con fuertes acoplamientos entre la muestra y el portamuestras) que influyen en los valores de aislamiento.

Esta dispersión presenta valores mayores y crecientes al disminuir la masa por unidad de área, por debajo de esta zona, en donde pueden alcanzar los extremos valores estimables en ± 5 dB. También crece la dispersión por encima de esta zona al aumentar la masa del divisorio por unidad de área, aunque manteniéndose acotada en unos ± 2 dB.

Por tanto para divisorios de una hoja, usuales en edificación, tiene sentido hablar de ley de masa media para R_A , que puede muy bien aproximarse por una línea quebrada de tres tramos dados por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} R_A &= 16 + 9.5 \lg m & m < 82 \text{ Kg/m}^2 \\ R_A &= -6 + 21 \lg m & 82 < m < 215 \text{ Kg/m}^2 \\ R_A &= -55 + 42 \lg m & m > 215 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] NBE-CA Condiciones Acústica en los Edificios, 1981, Ministerio de Obras Públicas.
- [2] Comunicaciones personales de R. Josse y S. Auzou.

- [3] R. Josse et al., Acoustique, REEF-Volume II; Publicación del CSTB, 1982.
- [4] Reports of the Building Research Establishment, Watford, UK.
- [5] J. Sadowski et al, Noise protection in apartments , Building Research Institute, Warsaw.
- [6] C. de la Colina et al., Investigaciones en materiales acústicos, Revista de Acústica, vol. XXXI, núms. 3-4, (2000)
- [7] E. Gerretsen, Calculation of sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures, Applied Acoustics, 12 (1979), 413-433;
- [8] Norma UNE EN 12354/1, Anexo B.
- [9] A. Moreno, Factors influencing global ratings for sound insulation: incident noise spectrum and shape of the transmission loss curve, Journal Sound Vib. (1984), **97**(2), 337-348.
- [10] A. Bermúdez et al, Programa predictivo de cálculo del aislamiento acústico de elementos multicapa, U. Santiago de Compostela, 2004.
- [11] J. António, A. Tadeu e L. Godinho, Analytical evaluation of the acoustic insulation provided by double infinite walls, Journal of Sound and Vibration, Vol. 263 (1), 2003, 113-129.
- [12] Ā Novac, Studies of sound insulation in buildings, Doctoral Thesis, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm, 1995.
- [13] J. Anderson, M. Bratos-Anderson, Radiation efficiency of rectangular orthotropic plates, Acustica united Acta Acustica, 2005, vol 91, no. 1 pp 61-76..

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del Programa Nacional de Investigación PN 2004, Proyecto: BIA 2004-07 102-CO3-01.