

# Influencia del ángulo límite en la predicción del índice de reducción sonora



Jesus Alba Fernandez <sup>1</sup>; Romina Del Rey Tormos <sup>1</sup>; Jaime Ramis Soriano <sup>2</sup>;  
Eva Escuder Silla <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras  
Escuela Politécnica Superior de Gandía.  
Universidad Politécnica de Valencia

E-mail: jesalba@fis.upv.es, roderey@doctor.upv.es, evescude@fis.upv.es

<sup>2</sup> Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría.

Universidad de Alicante

e-mail: jramis@ua.es

PACS: 43.55. Rg

## Resumen

Este trabajo se inscribe en el contexto del esfuerzo por acotar incertidumbres en las predicciones del aislamiento acústico. El objeto del mismo es cuantificar la incertidumbre asociada a la elección del ángulo límite al realizar predicciones del Índice de reducción sonora de una partición. En él se realiza una valoración de la incertidumbre, tanto en función de la frecuencia, como del parámetro ponderado global en decibelios A. El estudio se concreta para el caso de materiales de uso común en la edificación y para el caso de una placa delgada, infinita y elástica, de forma que separa dos regiones del espacio sin que haya conexión alguna entre ambas. La importancia de este término queda reflejada en la cuantificación que se realiza de la incertidumbre para ciertos materiales y ángulos para los cuales puede ser del orden de 3 dB(A).

## Abstract

This work is done in the context of trying to limit the uncertainties in the predictions of the acoustic isolation. Our aim is to quantify the uncertainty due to the choice of the limit angle on the prediction of the Transmission Loss of a partition.

We have evaluated how this uncertainty depends on the frequency and on the weighted global parameter in dB(A). Specifically, we have studied in this work material of common use in building and the case of a thin, infinite, and elastic plate that separates two regions of the space without connection between them. The importance of the choice of the limit angle is reflected in the quantification of the uncertainty for certain materials and angles, for which it can be of the order of 3 dB(A).

## Introducción

La reciente publicación del Documento Básico de Protección Contra el Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) [1], pone fin a un proceso de varios años sobre la necesidad de proteger a las personas del ruido y al mismo tiempo definir y replantear criterios objetivos, dentro de las limitaciones asociadas a los diferentes factores y agentes involucrados. En este diálogo abierto durante este periodo, se han definido diferentes procedimientos para poder minimizar en la edificación, siempre bajo esa base de sostenibilidad, el riesgo sobre la salud de las personas.

Para cumplir criterios respecto a la protección frente al ruido aéreo, los procedimientos definidos pueden pasar por

el uso de una solución simplificada, con tipologías tipo tanto para elementos separadores de diferentes unidades de uso, tabiquerías, forjados, etc. Esto queda plasmado en el DB-HR [1]. La segunda opción factible es la de realizar un estudio detallado a partir de los métodos de predicción que actualmente se reconocen, que para el caso del aislamiento a ruido aéreo se refleja en la UNE EN 12354-1: 2000 [2].

Al final, independientemente de la opción adoptada para valorar el cumplimiento de lo exigido en el DB-HR, es necesario conocer datos obtenidos en cámara de transmisión, es decir, el índice de reducción sonora  $R$ , además de la masa y de cuestiones geométricas (superficies, longitudes, etc.). En el caso que nos ocupa, además, con la ponderación en decibelios  $A$ .

Por tanto, debemos tener un dato del índice de reducción sonora con la mínima incertidumbre posible que nos permita realizar un diseño partiendo de valores base que no produzcan una acumulación de errores en fórmulas o procedimientos de cálculo o diseño sucesivos. En esta línea, se plantean las normas UNE EN ISO 140-1: 1998 [3] sobre condiciones de los laboratorios, UNE EN 20140-2: 1994 [4] sobre verificación y precisión y la UNE EN ISO 140-3: 1995 [5] sobre la medida en cámara de transmisión. Actualmente estas normas son de referencia, no sólo para el DB-HR sino que son de obligado cumplimiento en la Comunidad Valenciana, donde además se exige que la empresa, organismo o laboratorio tenga una acreditación para cierto tipo de mediciones [6] que pasa por una única entidad de acreditación a nivel estatal por un único laboratorio de verificación a nivel de comunidad autónoma, pasando a un segundo plano en algunos casos los procedimientos de calidad y visado de los diferentes Colegios Profesionales que tratan el tema.

Desde el punto de vista de la normativa asociada a los laboratorios, en ellas se hace referencia a condiciones de volumen, tiempo de reverberación, difusión, etc. Las condiciones de volumen y tiempo de reverberación son claras y fácilmente conseguibles y medibles. Sin embargo, desde el punto de vista de la difusión, se hace referencia a la necesidad de campo difuso en el recinto de medida, o a la colocación de difusores si es necesario.

Algunos modelos [7][8] nos permiten predecir el comportamiento en cámara de transmisión a partir de las características físicas de las particiones. El índice de reducción sonora obtenido debe promediarse para todos los ángulos de incidencia, desde el ángulo  $0^\circ$  (incidencia normal) hasta un determinado ángulo límite para obtener un índice de reducción sonora difuso como veremos en el siguiente apartado.

En este trabajo se aborda el problema de la dependencia de las predicciones en función de la elección de este ángulo límite. La cuestión tiene su relevancia ya que cada vez adquiere más importancia acotar la imprecisión de las predicciones. Los resultados abordan de forma indirecta, el efecto que podría tener en el resultado final del Índice de Reducción Sonora medido en la cámara de transmisión, variaciones del grado de difusión en las cámaras de transmisión, a través del efecto del ángulo límite de incidencia sobre la pared de ensayo.

## Índice de reducción sonora

De manera genérica el índice de reducción sonora,  $R$ , se puede obtener a partir del coeficiente de transmisión,  $\tau(\theta)$ , que representa la energía transmitida respecto a la incidente en función del ángulo de incidencia en la pared de ensayo [9-11]. Se puede utilizar esta variable para obtener un coeficiente de transmisión en campo difuso,  $\tau_d$  que vendría dado por la expresión:

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad (1)$$

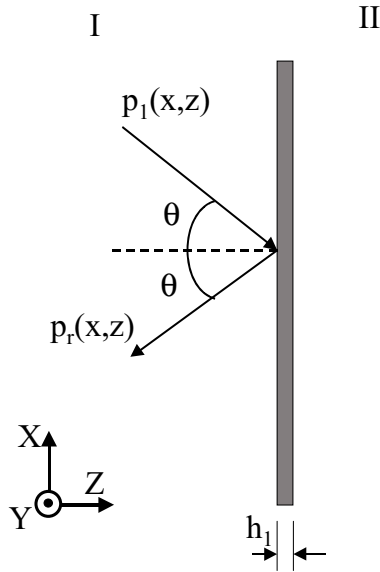
donde  $\theta_{lim}$ , representa el ángulo límite de nuestro recinto, es decir, la mayor inclinación respecto al vector superficie que podemos conseguir incidiendo sobre la pared de ensayo. En este punto, en función de diferentes autores puede haber cierta discrepancia. Hay quien decide que ese ángulo límite es  $90^\circ$  (es decir, dirección paralela a la pared de ensayo) o hay autores que indican que, por limitaciones de condiciones de diseño de éstas, que es difícil conseguir una incidencia por encima de los  $80^\circ$  [7][8][12].

A partir de esta expresión, podemos obtener una estimación del Índice de Reducción Sonora a través de la relación

$$R = -10 \log \tau_d \quad (2)$$

Por tanto, si se considera como válida la estimación (1), podemos estimar un valor de  $R$ , que además es dependiente del ángulo límite de incidencia.

Para el caso de una placa delgada, infinita y elástica, de masa por unidad de área  $m$ , de forma que separa dos regiones del espacio, I y II, sin que haya conexión alguna entre ambas [7][8], existen expresiones relativamente sencillas que derivan de una mejora de la Ley de Masas:



(Figura 1: Placa delgada e impermeable separando dos espacios)

$$\tau(\theta) = \frac{(2\rho_o)^2}{\left(\frac{\omega^3 \cos \theta D \text{sen}^4 \theta \eta}{c_o^5} + 2\rho_o\right)^2 + \frac{\omega^2 \cos^2 \theta (D\omega^2 \text{sen}^4 \theta - mc^4)^2}{c_o^{10}}} \quad (3)$$

En el caso de campo difuso, es decir, aplicando (1):

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{\text{lim}}} \frac{(2\rho_o)^2 \cos \theta \text{sen} \theta d\theta}{\left(\frac{\omega^3 \cos \theta D \text{sen}^4 \theta \eta}{c_o^5} + 2\rho_o\right)^2 + \frac{\omega^2 \cos^2 \theta (D\omega^2 \text{sen}^4 \theta - mc^4)^2}{c_o^{10}}}}{\frac{\text{sen}^2 \theta_{\text{lim}}}{2}} \quad (4)$$

D es la rigidez a flexión de la placa,  $\eta$  el factor de pérdidas total,  $c_o$  la velocidad de propagación del sonido en el aire,  $\rho_o$  la densidad del aire y  $\omega$  la frecuencia angular. Esta última expresión nos permite acercarnos al problema, en el caso de capas impermeables delgadas.

## Cálculo de la incertidumbre

A partir de la expresión del coeficiente de transmisión para campo difuso (1) podemos realizar una estimación del error cometido. Para ello se supone un desglose de la expresión del coeficiente de transmisión para campo difuso en dos términos, la contribución desde incidencia normal hasta el ángulo límite (supuesto ángulo de corte) y desde éste hasta  $90^\circ$ :

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \text{sen} \theta d\theta} = \frac{\int_0^{\theta_{\text{lim}}} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta + \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{\text{lim}}} \cos \theta \text{sen} \theta d\theta + \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \cos \theta \text{sen} \theta d\theta} \quad (5)$$

Separando términos de numerador como A y denominador como B en la expresión anterior:

$$\tau_d = \frac{A}{B} \quad (6)$$

Podemos realizar una valoración de la incertidumbre cometida desde este punto de vista. Para el numerador:

$$A = \int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta = \int_0^{\theta_{\text{lim}}} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta + \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta = \tau_{dcam} + \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta \quad (7)$$

Y para el denominador:

$$B = \int_0^{\pi/2} \cos \theta \text{sen} \theta d\theta = \int_0^{\theta_{\text{lim}}} \cos \theta \text{sen} \theta d\theta + \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \cos \theta \text{sen} \theta d\theta = \frac{\text{sen}^2 \theta_{\text{lim}}}{2} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\text{sen}^2 \theta_{\text{lim}}}{2}\right) \quad (8)$$

Aplicando (7) y (8) y la teoría de errores asociada a un cociente de dos términos:

$$\left| \frac{\partial \tau_d}{\tau_d} \right| = \left| \frac{\partial A}{A} \right| + \left| \frac{\partial B}{B} \right| = \frac{\left| \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta \right|}{\left| \int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta \right|} + \left| \frac{\frac{1}{2} - \frac{\text{sen}^2 \theta_{\text{lim}}}{2}}{\frac{\text{sen}^2 \theta_{\text{lim}}}{2}} \right| = \frac{\left| \int_{\theta_{\text{lim}}}^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta \right|}{\left| \int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \cos \theta \text{sen} \theta d\theta \right|} + |1 - \text{sen}^2 \theta_{\text{lim}}| \quad (9)$$

Por tanto, la expresión (9) nos muestra el error relativo de forma genérica asociado al ángulo límite. Del análisis de su expresión puede verse como, el primer término depende de las condiciones del material, frecuencia, etc, y el segundo nos introduce un error relativo fijo, que para  $82^\circ$  sería del 2%.

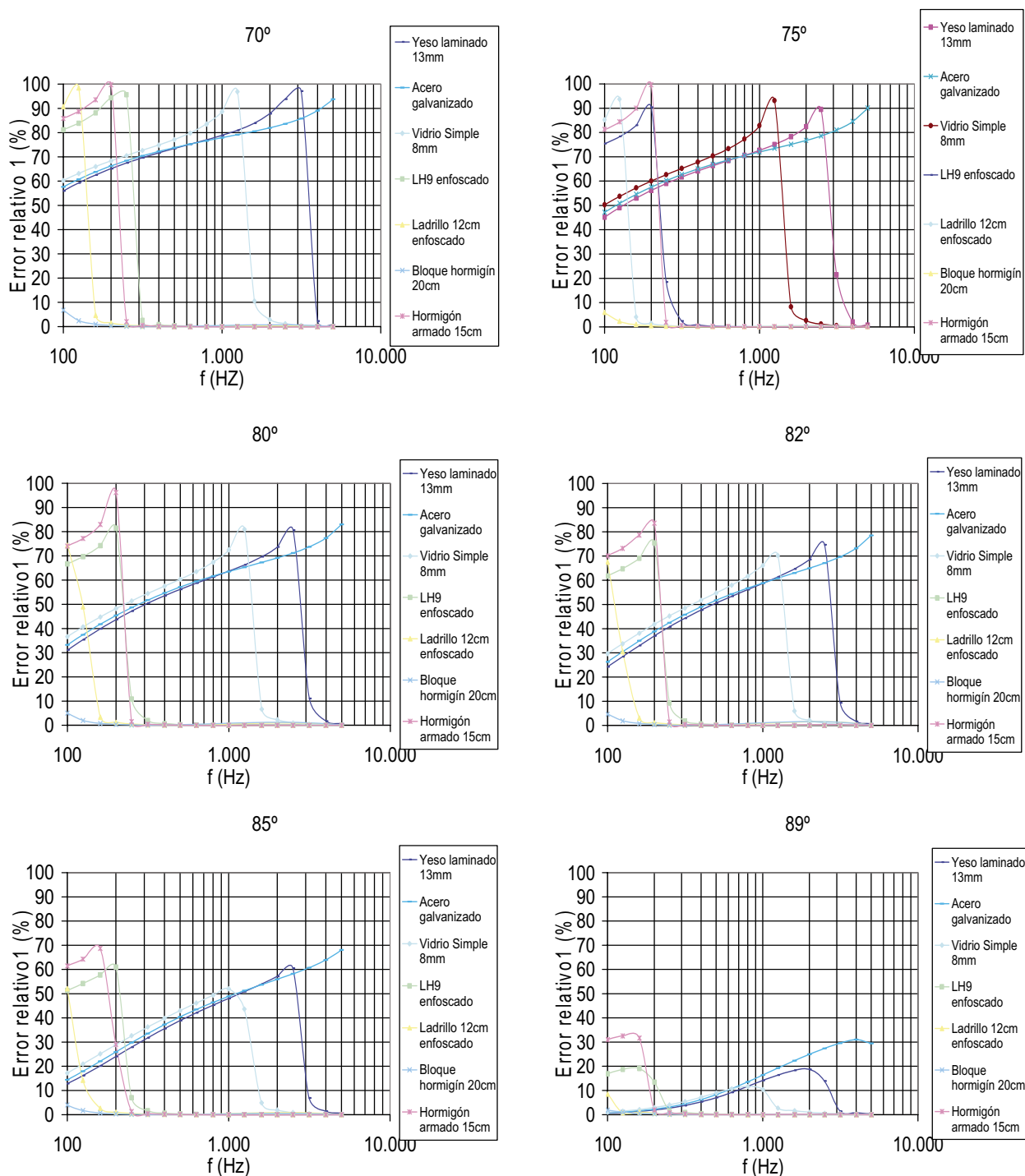
## Algunos resultados para capas impermeables delgadas

Se ha realizado un primer estudio combinando la expresión (4) y la (9). Los materiales que se han estudiado en este trabajo se muestran en la tabla 1.

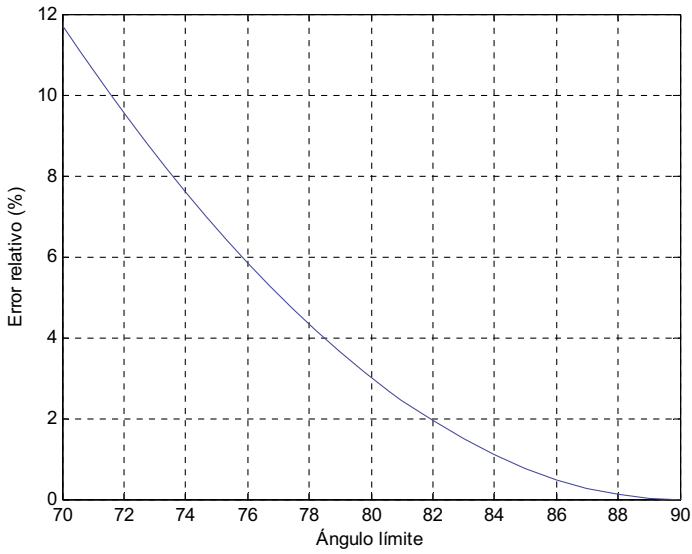
En primer lugar, se realiza un estudio del primer término asociado al numerador. En la figura 2 se muestra su comportamiento en función del ángulo. En la figura 3, se analiza el segundo término, asociado al denominador, y la dependencia con el ángulo límite. En la figura 4, ambas contribuciones. En todos los casos en función de la frecuencia.

Capa Impermeable	m (kg/m <sup>2</sup> )	D (Nm)	η	h (mm)
Yeso laminado 13 mm	9,0	377,3	0,01	13
Acero galvanizado	10,0	95,2	0,004	1
Vidrio simple 8 mm	12,0	2523,1	0,054	8
LH9 enfoscado	117,6	797870,7	0,017	120
Ladrillo 12 cm enfoscado	123,0	2965528,4	0,02	150
Bloque hormigón 20 cm	270,0	17224946,5	0,1	200
Hormigón armado 15 cm	351,0	3166955,15	0,006	150

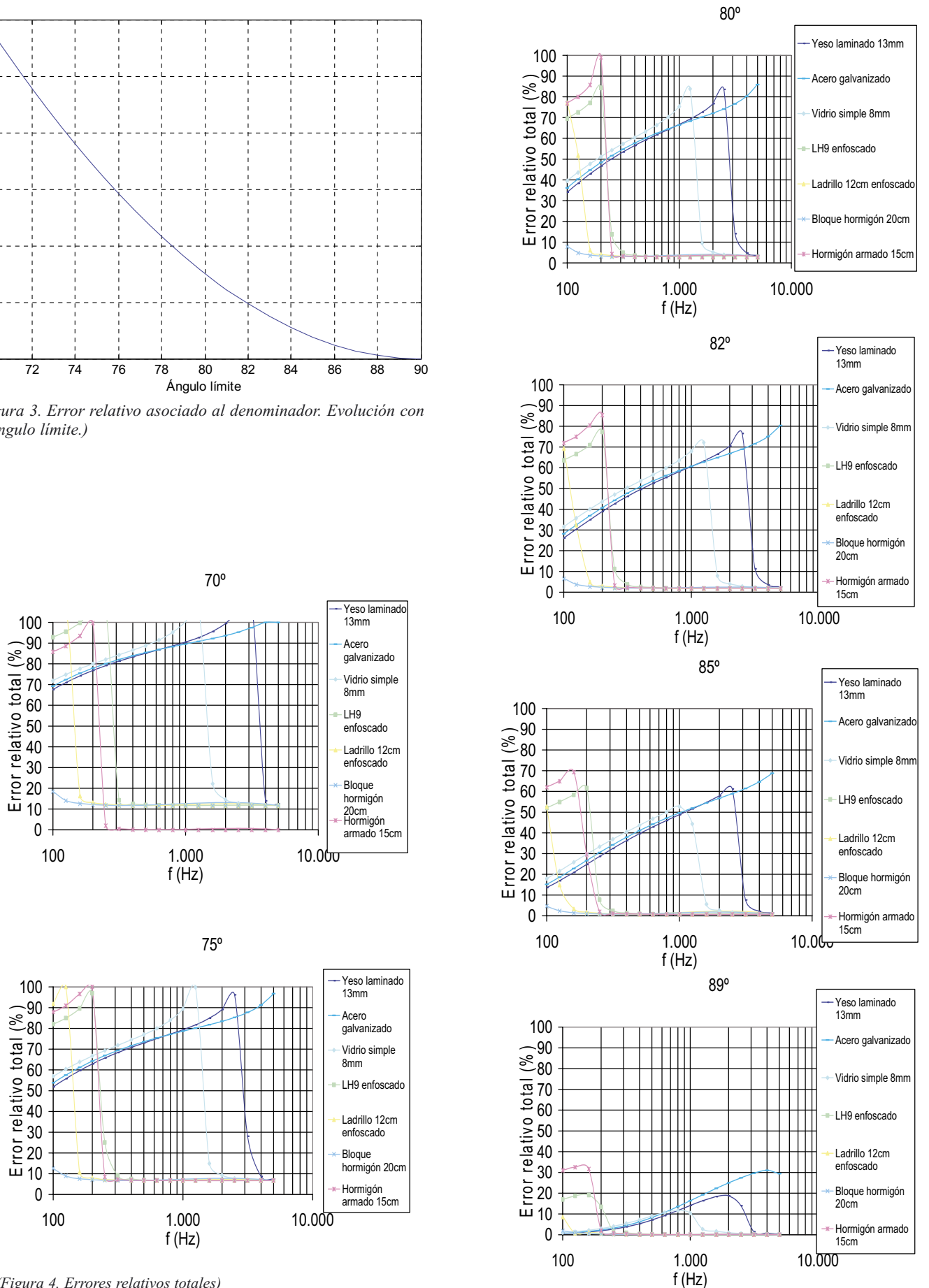
(Tabla1. Particiones estudiadas (capas impermeables simples), valores de su masa, rigidez a flexión, factor de pérdidas y espesor.)



(Figura 2. Errores relativos asociados al numerador para las diferentes particiones estudiadas y para diferentes ángulos límite.)



(Figura 3. Error relativo asociado al denominador. Evolución con el ángulo límite.)



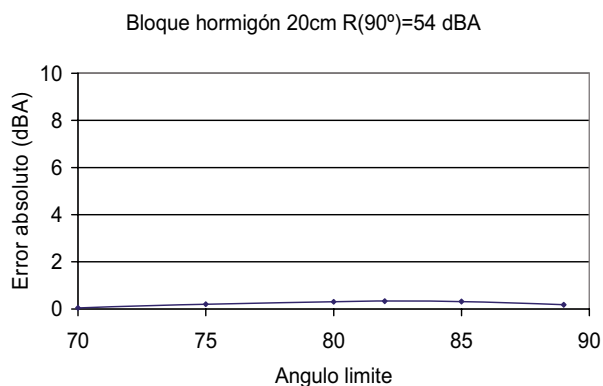
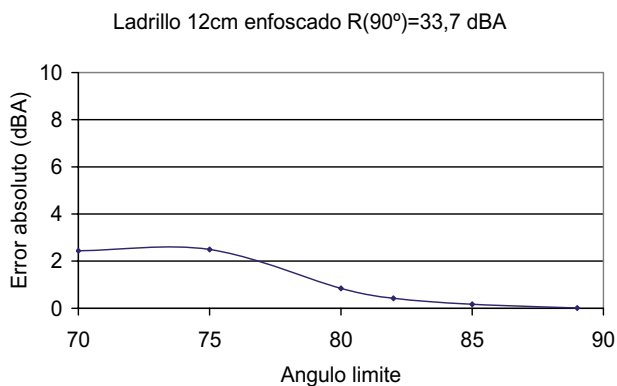
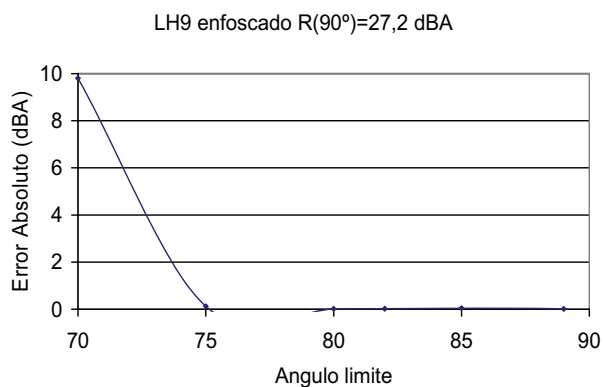
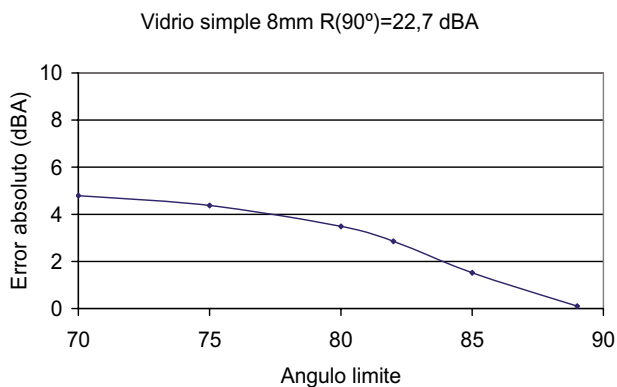
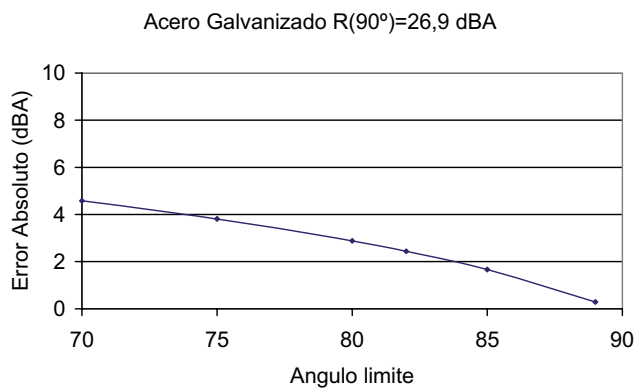
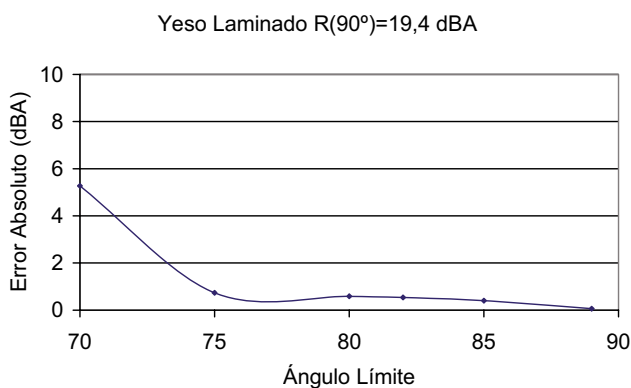
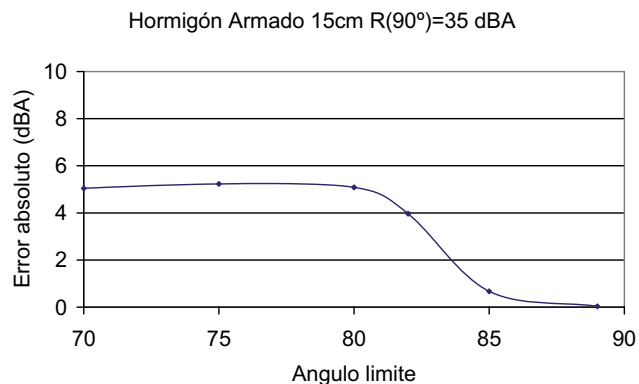
(Figura 4. Errores relativos totales)

Se ha estudiado también el error global cometido en el índice de reducción sonora  $R$ , global en dB(A), estimado de la siguiente forma:

$$E_{ABSOLUTO}(dBA) = |R_{90^\circ}(dBA) - R_{cam}(dBA)| \quad (10)$$

donde  $R_{cam}$  es el índice de reducción sonora de la cámara de transmisión, a un ángulo límite propio de la cámara de transmisión y  $R_{90^\circ}$  el límite a  $90^\circ$  ideal.

En la figura 5 se muestran los errores absolutos para cada elemento simulado.



(Figura 5. Evolución con el ángulo límite, valores globales.)

## Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Las conclusiones que se pueden observar son las siguientes. En la figura 2 se muestra una tendencia clara y una dependencia con la frecuencia crítica de los materiales estudiados. Los materiales más ligeros con frecuencias críticas más altas, tienen un error según el término de numerador mayor a grosso modo.

Lo contrario ocurre cuando mayor es la masa. En este caso esto parece indicar que el término asociado a la elasticidad (la rigidez a flexión) es crítico en cuanto al término de este error relativo.

La figura 3, indica una tendencia independiente asociada al ángulo límite, y por tanto inherente de la difusión. Como ejemplo, para asegurar un 2% el ángulo límite debe ser de 82°. En la figura 4, se ve la acumulación de ambos efectos, y cómo en los materiales pesados, es el segundo término el que influye en el resultado final.

Respecto al efecto en los valores globales en dB(A) del índice de reducción sonora, si bien a partir de 82° tenemos valores relativamente bajos, aunque en algunos casos tenemos errores absolutos de 3 dB. Cabría plantearse buscar mejorar la difusión o asumir este error en algunos materiales. Este error no es fijo y depende del tipo de materiales. En el caso concreto de vidrios la normativa exige un ángulo límite concreto de 75° [13], y como se puede observar en la figura 5 el error absoluto que se comete es, aproximadamente 4 dB(A) hasta casi 90°.

Como línea de trabajo, actualmente se está extendiendo este estudio a otras particiones dobles, para ver su influencia y se está realizando un análisis a través de un software de simulación para valorar la influencia en el ángulo límite de las diferentes posiciones de la fuente de ruido.

## Agradecimientos

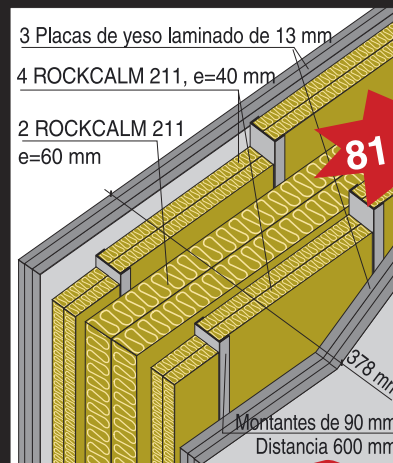
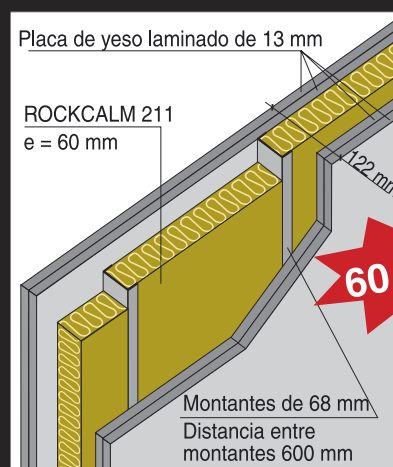
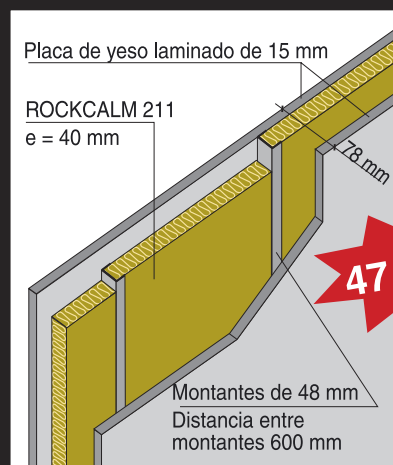
Este trabajo ha sido financiado por el MINISTERIO DE EDUCACION Y CIENCIA -D.G. INVESTIGACION (BIA2007-68098-C02-01 y BIA2007-68098-C02-02)

## Referencias

- [1] 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 y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación
- [2] UNE EN 12354-1: 2000. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.
- [3] UNE EN ISO 140-1: 1998. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Requisitos de las instalaciones del laboratorio sin transmisiones indirectas. (ISO 140-1: 1997)
- [4] UNE EN 20140-2: 1994. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Determinación, verificación y aplicación de datos de precisión. (ISO 140-2: 1991)
- [5] UNE EN ISO 140-3: 1995. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción. (ISO 140-3: 1995)
- [6] Decreto 266/2004 de la Generalitat Valenciana, de 3 de diciembre, por el que se establecen normas de prevención y corrección de la contaminación acústica en relación con actividades, instalaciones, edificaciones, obras y servicios.
- [7] Ookura K., Saito Y., “Transmission Loss Of Multiple Panels Containing Sound Absorbing Materials In A Random Incidence Field”, *Internoise 78*, 637-642
- [8] Trochidis A., Kalaroutis A., (1986) Sound Transmission Through Double Partitions With Cavity Absorption, *Journal Of Sound And Vibration* 107 (2), 321-327
- [9] J. Alba Fernández; J. Ramis Soriano; J. Llinares Galiana (2001), Caracterización de capas impermeables a partir de medidas de aislamiento, *REVISTA DE ACÚSTICA* 32, 11 – 15
- [10] Alba J., Ramis J, (2003), Modelling of impervious layers from measurements of the sound reduction index, *Applied Acoustic* 64, 385-400
- [11] J. Alba Fernández; J. Ramis Soriano; F.J. Redondo (2003), “Aplicación de la transformada de Fourier espacial a la predicción del índice de reducción sonora de ventanas con vidrio laminar”, *REVISTA DE ACÚSTICA*
- [12] Alba J., Ramis J, Sánchez-Morcillo Victor J., “Improvement of the prediction of transmission loss of double partitions with cavity absorption by minimization techniques”, *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 273, (4-5), pp. 793-804, (2004)
- [13] ISO/PAS 16940:2004(E), Glass in building – Glazing and airborne sound insulation – Measurement of the mechanical impedance of laminated glass.

# SOLUCIONES ACÚSTICAS

## ENSAYOS REALIZADOS CON INSTALACIONES ELÉCTRICAS



TENEMOS LAS SOLUCIONES QUE NECESITA

- ROCKWOOL lanza al mercado las nuevas soluciones ROXUL para tabiquería seca.
- Observe los resultados obtenidos y se sorprenderá.
- Soluciones constructivas para aislar acústicamente particiones distributivas y separativas.
- Soluciones ideales para viviendas, oficinas, locales de ocio, locales comerciales, hospitales, hoteles, escuelas, rehabilitación...

# ROCKWOOL®

[www.rockwool.es](http://www.rockwool.es) - [info@rockwool.es](mailto:info@rockwool.es)



**SOLICÍTENOS  
MÁS INFORMACIÓN**