

eman ta zabal zazu



Universidad Euskal Herriko  
del País Vasco Unibertsitatea  
Escuela de Ingeniería de Bilbao

## TESIS DOCTORAL

# *Estudio de las prestaciones acústicas de materiales de construcción que incorporen subproductos industriales*



*Autor*

*Alberto Esteban González*

*Directores*

*Dr. José Tomás San José Lombera*

*Dra. Milagros Losañez González*

*Bilbao, noviembre 2017*



---

eman ta zabal zazu



Universidad Euskal Herriko  
del País Vasco Unibertsitatea  
Escuela de Ingeniería de Bilbao

**eraiker**

**TESIS DOCTORAL**

*Estudio de las prestaciones acústicas de  
materiales de construcción que  
incorporen subproductos industriales*

*Autor*

*Alberto Esteban González*

*Directores*

*Dr. José Tomás San José Lombera*

*Dra. Milagros Losañez González*

*Bilbao, noviembre 2017*

---

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

---

A mis hijos, Irati y Eneko,  
luz de mi vida

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

---

## **Agradecimientos**

*Primero de todo, el autor quiere reconocer y agradecer la financiación del presente trabajo (fondos FEDER y del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad MINECO), vía el proyecto BLUECONS (BIA2014-55576-C2-2-R), así como al grupo de investigación Consolidado del Gobierno Vasco (IT781-13).*

*En la literatura científica es muy habitual utilizar la máxima “Si he visto más lejos, es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes”. Y ciertamente, es una frase llena del genuino y necesario reconocimiento a los que, antes de nosotros, han contribuido al conocimiento y al saber en el cual uno se apoya. Sin embargo, no menos importantes son aquellos con los que cruzamos nuestros caminos en la vida y nos ayudan a que seamos buenos profesionales y mejores personas. Desde luego, yo puedo decir con orgullo que “Si he llegado hasta aquí, es porque he estado hombro con hombro con grandes personas”. Y a estas personas quiero mostrar mi agradecimiento por la presente Tesis Doctoral.*

*A Azu, por la que siempre tendré especial cariño y admiración personal, y que además me enseñó casi todo lo que sé sobre acústica.*

*A los profesores Bob Craik (Heriot-Watt University, Edimburgo) y Luis Arizmendi (QEPD, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de San Sebastián, UPV/EHU), con los que empezó este viaje hace ya muchos años.*

*A Mila, Tomás y Javier, por haberme dado esta segunda oportunidad y por acompañarme y ayudarme luego a lo largo del camino.*

*A todo el equipo “Bluecons” por haber abierto el camino hasta aquí y por la ayuda en fabricación de las muestras, dosificaciones y demás consejos y apoyo. Y a mis compañeros de GIKESA/ERAIKER por facilitarme la vida durante todos estos meses.*

*No podría dejar de mencionar al equipo de acústica de Labein y del LCCE del GV. Y especialmente a Marta y Susana por su compañía y apoyo en nuestro pequeño grupo de terapia acústica a distancia. Y también a Ana por su ayuda “incróspita” y a Giovanni por enseñarme lo qué es una obra y a salirme del dogma acústico.*

*Por último, lo más importante... a mi familia, amigos y seres queridos, que han sufrido paciente y amorosamente mis ausencias y mis nervios. Y muy especialmente a mi madre y mi padre. Os quiero.*

*A todos: Gracias de corazón!*

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

---



## Resumen

En un escenario de recursos naturales y energéticos menguantes, la innovación a través del concepto de economía circular se convierte en el impulso hacia un sistema económico que no desperdicie recursos y maximice la utilidad de los productos.

La presente tesis doctoral busca contribuir al conocimiento de las propiedades mecánicas (en este caso centradas en el aislamiento acústico) de materiales destinados al sector construcción que incorporen subproductos industriales, especialmente escorias de acería. Para ello:

- Se ha desarrollado un método válido para la medida de las prestaciones de aislamiento a ruido aéreo en muestras pequeñas, abaratando además en costes y recursos futuras investigaciones.
- Se han evaluado las prestaciones acústicas de hormigones con áridos siderúrgicos y con otros subproductos industriales como sustitutivo de los áridos naturales de cantera.
- Se han evaluado las prestaciones acústicas de placas de yeso con áridos siderúrgicos como sustitutivos parciales de yesos y escayolas.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el uso de áridos procedentes de escoria de arco eléctrico, sin llegar a suponer una mejora frente a los naturales pese a su mayor densidad, sí que alcanzan unas prestaciones acústicas suficientes que permiten su uso en edificación según las normativas actuales y futuras de protección frente al ruido.

En el caso de los yesos, la incorporación de escorias negras tiene un efecto muy positivo especialmente en bajas frecuencias y abre una prometedora línea de trabajo al mejorar precisamente la zona acústicamente más débil de los sistemas de cerramientos y trasdosados directo y de entramado autoportante.

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

---

## Abstract

In a scenario of natural and energetic resources being reduced, innovation through the concept of circular economy becomes the impulse towards an economic system that does not waste resources and maximizes the usefulness of products.

This PhD thesis aims to contribute to the knowledge of the mechanical properties (in this case, focused on acoustic insulation) of building materials incorporating industrial by-products, especially Electric Arc Furnace slags.

To do so:

- A valid method has been developed for measuring airborne noise insulation in small samples, reducing costs and resources for future research.
- The acoustic performance of concretes with EAF slags and other industrial by-products has been evaluated, as a substitute for natural aggregates.
- The acoustic performance of plaster plates with EAF slags has been evaluated as partial substitutes for natural plaster.

The results obtained show that, despite their higher density, the use of aggregates from electric arc furnace slags does not improve natural aggregates. Though, they achieve an acoustic performance that allows their use in buildings, according to current and future noise protection regulations.

In the case of plasters, the incorporation of black slag sets a very positive effect, especially at low frequencies and opens up a promising line of research improving the acoustically weaker area of lightweight walling systems.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

---

## Índice de contenidos

### Capítulo 1.- Introducción

1.1.- Límites del crecimiento y economía circular	3
1.2.- Sinergias para una construcción sostenible	8
1.3.- El problema del ruido	11
1.4.- Objetivos y alcance de la Tesis	14
1.5.- Estructura de la Tesis	15

### Capítulo 2.- Estado del Arte

2.1. Impacto del sector de la construcción	19
2.1.1.- Perspectivas económicas a medio plazo	19
2.1.2.- Innovación y sostenibilidad en el sector	23
2.2. Escorias siderúrgicas	27
2.2.1.- El problema de las escorias	27
2.2.2.- Valorización de escorias para su uso en construcción	30
2.3.- Acústica en edificación	32
2.3.1.- Transmisión de ruido en edificios	32
2.3.2.- Estimación numérica del aislamiento	37
2.3.3.- Medida del aislamiento en laboratorio	50
2.3.4.- Modelos a escala en acústica	62
2.3.5.- Ruido de impactos y reciprocidad	66
2.4. Conclusiones	69

### Capítulo 3.- Escalado experimental y su propuesta metodológica de medida

3.1.- Introducción	73
3.2.- Cámaras de transmisión acústica a escala.	75
3.2.1- Diseño y construcción	75
3.2.2- Ajuste y cualificación de las cámaras	89
3.3.- Metodología de ensayo	102
3.3.1.- Procedimiento de medida	102
3.3.2.- Equipos de medida	104
3.3.3.- Incertidumbre de las medidas	106
3.4.- Aplicación de escala al resultado de las medidas	108
3.5.- Corrección de los valores obtenidos	110
3.6.- Validación de resultados	112
3.6.1.- Validación en vidrios	112
3.6.2.- Validación en yesos	117
3.6.3.- Validación en hormigones	119
3.6.4.- Pruebas fallidas	123
3.7.- Conclusiones	127

## **Capítulo 4.- Aislamiento acústico de hormigones con Áridos siderúrgicos**

4.1.- Descripción de los elementos ensayados	133
4.1.1.- Hormigones con áridos siderúrgicos	135
4.1.2.- Hormigones con áridos siderúrgicos y fibras	138
4.1.3.- Hormigones con serrín	140
4.1.4.- Amasadas de referencia	140
4.1.5.- Resumen de propiedades mecánicas	142
4.2.- Representatividad de las muestras	144
4.3.- Resultados de aislamiento acústico obtenidos	148
4.3.1.- Hormigones bombeables con árido siderúrgico	149
4.3.2.- Hormigones autocompactantes con árido siderúrgico	152
4.3.3.- Hormigones con árido siderúrgico y fibras	157
4.3.4.- Otros ensayos (serrín y referencias)	159
4.4.- Análisis de los resultados	161
4.5.- Ruido de impactos	165
4.6.- Aplicabilidad acústica de los hormigones con subproductos industriales	166
4.7.- Conclusiones	167

## **Capítulo 5.- Aislamiento acústico de yesos con Áridos siderúrgicos**

5.1.- Descripción de los elementos ensayados	171
5.2.- Comentarios sobre las muestras	176
5.3.- Resultados de aislamiento acústico obtenidos	178
5.4.- Análisis de los resultados	183
5.5.- Conclusiones	185

## **Capítulo 6.- Conclusiones y futuras líneas de investigación**

6.1.- Conclusiones principales	189
6.2.- Futuras líneas de investigación	191

## **Capítulo 7.- Bibliografía**

Bibliografía	193
--------------	-----

## Índice de figuras

Figura 1.1: Curva de producción sugerida originalmente por M. King Hubbert en 1956. (Imagen: Han-Kwang Nienhuys).....	5
Figura 1. 2. Rango de frecuencias audibles por el ser humano frente a otros animales.....)	11
Figura 2.1: Producción del sector construcción por países. Estimación 2017 y proyección de crecimiento anual promedio 2018-2019 a precios constantes.....	20
Figura 2.2: Evolución por subsectores europeos. Índices de producción a precios constantes, base 2012=100.....	21
Figura 2.3: Evolución de los distintos subsectores en el mercado español. Índices de producción a precios constantes, base 2012=100.....	22
Figura 2.4: Vertedero de escorias en Zumarraga (Gipuzkoa). Foto: Google maps.....	29
Figura 2.5: Caminos de transmisión del sonido entre recintos adyacentes.....	33
Figura 2.6: Parámetros utilizados en los modelos simplificado y detallado.....	34
Figura 2.7: Efecto de coincidencia que marca la aparición de la denominada frecuencia crítica Fuente: B&K.....	39
Figura 2.8: eficiencia de radiación medida para una pared de ladrillo.....	40
Figura 2.9: Zona controlada por masa y controlada por amortiguamiento, separadas por la frecuencia crítica. Fuente [Esteban- jornadas IETcc].....	41
Figura 2.10: Loss factor total en función de la frecuencia medido y estimado teóricamente. Elaboración propia.....	42
Figura 2.11: Comportamiento de un cerramiento de sección homogénea frente a uno hueco (p.e. una pared de ladrillo). Fuente [Cortés y Esteban, 2003].....	44
Fig. 2.12: Colocación de palpadores para medir la velocidad CL en un bloque cerámico.....	46
Fig. 2.13: Medida de CL mediante el uso de acelerómetros.....	47

Fig. 2.14: Excitación mediante impacto de martillo para la medida del loss factor.....	48
Fig. 2.15: Caída de la vibración estructural, donde se aprecian las dos pendientes en la curva integrada.....	49
Fig. 2.16: En un laboratorio el sonido sólo se transmite de una cámara a la otra a través del elemento separador. Fuente: LCCE GV.....	50
Fig.2.17: Medida de niveles de presión sonora en las cámaras dl LCCE del GV. La muestra (un muro cortina) permite ver al otro lado la cámara emisora, con la fuente acústica omnidireccional.....	52
Figura 2.18: Muestras para acústica construidas en un marco de hormigón, pendientes ensayo en Lab. Control de Calidad de la Edificación de Gobierno Vasco. Área de Acústica .....	55
Figura 2.19: Pérdidas por radiación, por bordes e internas.....	56
Figura 2.20: Ondas estacionarias.....	59
Figura 2.21: Modos axiales, tangenciales y oblicuos.....	60
Figura 2.22: Modelo de vidrio acrílico para estudiar los efectos de amortiguación y la influencia de la densidad modal en el aislamiento acústico. Fuente PTB.....	62
Figura 2.23: Modelo a escala de un auditorio. Fuente: Bridget Shield, Trevor Cox 1999/2000. University of Salford.....	63
Figura 2.24: Máquina de impactos (sin carcasa para mostrar el sistema de martillos),sobre un suelo de baldosa.....	66
Figura 2.25: Comprobación experimental del cumplimiento de la Ley de Reciprocidad.....	68
Figura 3.1: Construcción de cerramientos verticales para su ensayo acústico. (fuente: Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco).....	73
Figura 3.2: Laboratoire européen d'acoustique du CSTB (LABE), en Marne-la-Vallée. ....	76
Figura 3.3: Laboratoire européen d'acoustique du CSTB (LABE). ....	76
Figura 3.4: Paredes paralelas, que favorecen la aparición de ondas estacionarias y por lo tanto disminuyen la difusividad del campo.....	79



Figura 3.5: Cámaras receptora y emisora durante su construcción. ....	80
Figura 3.6: Ruedas iniciales (falla) frente a las definitivas, ya en su ubicación definitiva.....	81
Figura 3.7: Construcción de la cámara emisora (de izquierda a derecha y de arriba a abajo).....	82
Figura 3.8: Cámara receptora (móvil respecto a su caja exterior).....	.83
Figura 3.9: Borde de madera colocado en ambas cámaras.....	.84
Figura 3.10: Sellado elástico con cámara emisora.....	84
Figura 3.11: Bandas de material bicapa para mejor el sellado: detalle y colocación.	85
Figura 3.12: Construcción del marco portamuestras.....	86
Figura 3.13: Detalle de la unión entre marco y cámaras.....	87
Figura 3.14: Cinchas colocadas en las cámaras asegurando la estanqueidad del conjunto.....	87
Figura 3.15: Acceso al interior, con doble puerta.....	88
Figura 3.16: Interior pintado. Las líneas rojas marcan los límites de colocación de posiciones de micro.....	88
Figura 3.17: Bocetos de diseño iniciales, donde se aprecian las ideas de cámaras móviles, paredes interiores no paralelas, minimización de las transmisiones indirectas mediante un aislamiento reforzado de cada una de las cámaras así como de sellado de la muestra mediante cámara interior móvil.....	89
Figura 3.18: Cámaras emisora (izquierda, con una muestra de placas de yeso laminado) y receptora (con una muestra de hormigón colocada), durante la realización de ensayos.....	89
Figura 3.19: Tiempo de reverberación (promedio y desviación estándar), en frecuencias. ....	90
Figura 3.20: Pruebas iniciales utilizando una fuente unidireccional y tamaño relativo de una fuente comercial respecto a las propias cámaras.....	92
Figura 3.21: Construcción de una fuente específica con arreglo al empleo de 6 altavoces de 2,5".....	93
Figura 3.22: Fuente omnidireccional colgada del techo de la cámara emisora...93	
Figura 3.23: Fuente omnidireccional, según diversas posiciones.....	95

Figura 3.24: Desviación estándar entre los niveles sonoros registrados en la cámara emisora.....	95
Figura 3.25: Desviación estándar entre los niveles sonoros registrados en la cámara receptora.....	96
Figura 3.26: Desviación estándar de los niveles sonoros en ambas cámaras frente al criterio de la norma UNE-EN ISO 140-14.....	97
Figura 3.27: Modelización de las transmisiones indirectas: aislamiento del elemento separador (en rojo) frente a las contribuciones de los elementos de flanco (en azul).....	98
Figura 3.28: niveles esperados por vía aérea (en azul) frente a los niveles medidos (en rojo).....	99
Figura 3.29: niveles de ruido de fondo medidos en el interior de la cámara receptora .....	100
Figura 3.30: Contacto mecánico entre marco portamuestras y cámara (caja exterior).....	101
Figura 3.31: Generador de ruido (mp3) y amplificador.....	104
Figura 3.32: sonómetro 2260 (con cable pasa puertas) y micrófono 4189.....	105
Figura 3.33: Software “Noise Explorer” mostrando uno de los espectros de ruido rosa medidos.....	105
Figura 3.34: Escalado de una curva de aislamiento, desplazando directamente la curva a las frecuencias a escala .....	108
Figura 3.35: Ensayo corregido de forma teórica por debajo de la zona de validez de medida de las cámaras. ....	111
Figura 3.36: Muestra de vidrio de 8mm durante su ensayo.....	112
Figura 3.37: Resultados en frecuencias para los vidrios de 4 y 8mm.....	113
Figura 3.38: Al doblar el espesor, la frecuencia crítica se reduce a la mitad. La pendiente a partir de dicho punto es igual en ambos casos.....	114
Figura 3.39: Valores en frecuencias obtenidos frente a datos bibliográficos.....	115
Figura 3.40: Valores corregidos por debajo de la zona de medición de las cámaras.....	116
Figura 3.41: Datos disponibles sobre aislamiento en muestras similares. ....	116
Figura 3.42: Aislamiento a ruido aéreo de una placa estándar frente a otra de prestaciones acústicas mejoradas, ambas con el mismo espesor.....	118

Figura 3.43: Muestras de hormigón almacenadas tras su ensayo. ....	119
Figura 3.44: Valores de referencia (R, en dB) para las muestras de hormigón (datos a escala real).....	120
Figura 3.45: Valores de de aislamiento para dos muestras similares de losas de hormigón, en dos laboratorios acreditados diferentes.....	120
Figura 3.46: Valores de de aislamiento para dos muestras diferentes de la misma amasada de hormigón autocompactante.....	121
Figura 3.47: Valores de de aislamiento para las muestras de hormigón bombeable y autocompactante, frente al valor de referencia.....	122
Figura 3.48: Tolerancia entre una muestra y el marco y sellado correcto de la misma.....	123
Figura 3.49: Influencia de un sellado deficiente en el resultado del ensayo..	124
Figura 3.50: Muestra fisurada durante su manipulación y reparación realizada.....	125
Figura 3.51: Influencia de la presencia de fisuras en la muestra sobre el valor de aislamiento medido.....	125
Figura 4.1: Elaboración de vigas con la misma amasada que se ensayará acústicamente.....	133
Figura 4.2: Probeta de hormigón aligerado con serrín, durante su fabricación.....	134
Figura 4.3: Granulometría de las muestras P y SC. (fuente Tesis Dra. Santamaría).....	135
Figura 4.4: Gradación de los finos. (fuente Tesis Dra. Santamaría).....	136
Figura 4.5: Elaboración de las probetas acústicas en las amasadas de noviembre de 2015 (bombeables).....	137
Figura 4.6: Probeta acústica y viga a escala real con las amasadas de diciembre de 2015 (autocompactantes).....	137
Figura 4.7: Probetas acústicas con fibras sintéticas y metálicas.....	138
Figura 4.8: Virutas de serrín (partículas oscuras) en la masa de hormigón de la muestra I-SD. ....	140
Figura 4.9: Aspecto de la masa fresca Ref-SC durante el ensayo de escurrimiento.....	141

Figura 4.10: Aspecto de la masa fresca Ref-P durante el ensayo de escurrimiento.....	142
Figura 4.11: medida del espesor con un reloj comparador en diferentes puntos de una muestra.....	144
Figura 4.12: muestra de espesor no homogéneo debido a las propias texturas del hormigón bombeable.....	145
Figura 4.13: Diferentes muestras con diferencias en el espesor real.....	146
Figura 4.14: gráfica con el aislamiento ( $R_w$ ) de losas de hormigón macizo de diferentes espesores (mismo hormigón).....	146
Figura 4.15: muestra I-SC-S. En la fotografía de la izquierda se aprecia la lechada concentrada en la parte inferior.....	147
Figura 4.16: aislamiento de las muestras I-P-1 e I-P-2.....	149
Figura 4.17: aislamiento de las muestras IV-P-1 e IV-P-2.....	150
Figura 4.18: aislamiento de las muestras de hormigón bombeable con árido natural y escoria negra.....	151
Figura 4.19: aislamiento de las muestras de hormigón I-SC-1 e I-SC-2.....	152
Figura 4.20: aislamiento de las muestras de hormigón IV-SC-1 e IV-SC-2.....	153
Figura 4.21: aislamiento de las muestras de muestras de referencia autocompactantes.....	154
Figura 4.22: comparación del aislamiento de los tres tipos de muestras autocompactantes.....	155
Figura 4.23: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y cemento tipo I.....	156
Figura 4.24: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y cemento tipo IV.....	156
Figura 4.25: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y cemento tipo I, sin aditivos y con fibras sintéticas.....	157
Figura 4.26: comparación del aislamiento de muestras con fibras sintéticas (SF) y metálicas (MF).....	158
Figura 4.27: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y áridos silíceos (I-SC-S) y calizos (I-SC-3).....	159
Figura 4.28: comparación del aislamiento de una muestra con serrín frente a las amasadas de referencia.....	160

Figura 4.29: Cálculo del índice $R_w$ para la muestra II-SD, comparando su curva de aislamiento con una curva de referencia desplazada.....	161
Figura 4.30: Índice $R_w$ de las muestras de hormigón ensayadas.....	162
Figura 4.31: Índice $R_w$ corregido por espesor, frente a masa y módulo de Young en muestras ensayadas.....	164
Figura 4.32: Índice $L_{n,w}$ corregido por espesor, obtenido por la ley de reciprocidad.....	165
Figura 5.1: Revestimiento de fábrica de ladrillo mediante trasdosado directo de placa de yeso laminado o natural. Imagen cortesía de Hispalyt.....	171
Figura 5.2: Mejora en el aislamiento modificando el material de revestimiento sobre fábricas de prefabricado de hormigón y de arcilla cocida. Fuente: Esteban 1999.....	172
Figura 5.3: Sección de una de las placas de yeso laminado, donde se aprecia la presencia de fibras sintéticas.....	173
Figura 5.4: Muestra de los finos de escoria negra utilizados .....	174
Figura 5.5: Amasada de yeso con escorias EAFS.....	174
Figura 5.6: Amasada de escayola con escorias EAFS.....	175
Figura 5.7: Manchas de óxido superficiales .....	177
Figura 5.8: aislamientos medidos para las muestras comerciales de PYL.....	179
Figura 5.9: aislamientos medidos para las muestras de yeso de 15 mm (placa de yeso laminado, yeso natural y yeso con escoria negra).....	180
Figura 5.10: aislamientos medidos para las muestras de escayola de 15 mm (natural y con escoria negra).....	181
Figura 5.11: aislamientos medidos para las dos muestras (yeso y escayola) incorporando escoria negra.....	182
Figura 5.12: Índice $R_w$ de las muestras de yeso/escayola ensayadas.....	183
Figura 5.13: aislamientos medidos para las muestras de yeso (natural y con EAFS), ya aplicado el factor de escala 1:6,3.....	184

## Índice de tablas

Tabla 2.1.- Comparación de parámetros necesarios para calcular el aislamiento de un elemento simple en 14 de las teorías más habituales. [Valtteri Hongisto, 2000].....	39
Tabla 2.2: propiedades típicas para materiales de construcción. Fuente: Anexo B – UNE EN ISO 12354-1.....	45
Tabla 3.1: Distancias respetadas en las medidas de tiempo de reverberación.....	90
Tabla 3.2: Equipos utilizados.....	104
Tabla 3.3: Incertidumbres típicas asociadas al aislamiento a ruido aéreo, para el caso de laboratorio. (fuente: norma UNE-EN ISO 12999-1).....	106
Tabla 3.4: Incertidumbres típicas para los valores únicos de la UNE-EN ISO 717-1, para el caso de laboratorio.(fuente: norma UNE-EN ISO 12999-1).....	107
Tabla 3.5: Factores de cobertura para diferentes niveles de confianza. (fuente: norma UNE-EN ISO 12999-1).....	107
Tabla 3.6: Espesores y masas de las muestras de vidrio. ....	113
Tabla 4.1: Proporciones de materiales. (fuente Tesis Dra. Santamaría).....	136
Tabla 4.2: Composición química y propiedades físicas de las EAF. (fuente Tesis Dra. Santamaría).....	137
Tabla 4.3: Propiedades mecánicas en amasadas P y SC, ensayando dos probetas/amasada.....	142
Tabla 4.4: Resumen de propiedades mecánicas para las diferentes muestras.....	143
Tabla 4.5: Frecuencia crítica mínima y máxima esperadas según los espesores y módulos de Young medidos. ....	148
Tabla 4.6: Aislamiento $R_w$ obtenido junto a otras propiedades significativas en cada muestra. ....	162
Tabla 4.7: Aislamiento $R_w$ corregido para normalizar el espesor a 160mm para todas las muestras. ....	162
Tabla 5.1: Densidades de las muestras de yeso ensayadas.....	176



# Capítulo **1**

## *Introducción*

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

---



## **1.1.- Límites del crecimiento y economía circular**

Desde los comienzos de la historia, y muy especialmente desde la revolución industrial, la humanidad ha tenido un acceso relativamente fácil tanto a abundantes materias primas como a fuentes de energía barata, especialmente en los países que comenzaron antes su desarrollo industrial. Dicho crecimiento y prosperidad ha ido aumentando con el paso de los años, abarcando un porcentaje cada vez mayor de países y de población mundial. Población que, asimismo, ha crecido de manera exponencial fruto de los avances científicos en muchos campos del conocimiento, tales como la medicina o la agricultura.

Sin embargo, es evidente que un planeta con recursos naturales, necesariamente finitos, no puede sostener indefinidamente las necesidades de una población creciente a un nivel económico creciente también.

Este problema ha sido analizado en detalle ya desde antes de la primera crisis del petróleo, con el informe (encargado al MIT por el Club de Roma) publicado en 1972 *Los límites al crecimiento* [Meadows et al., 1972] como la primera publicación que aborda el asunto con rigor. La conclusión del informe fue la siguiente: con el incremento de la población mundial, la industrialización, la contaminación, la producción de alimentos y la explotación de los recursos naturales existentes en 1972, se alcanzarían los límites absolutos de crecimiento en la Tierra en el entorno del año 2072. Esta primera conclusión no contradice lo que dicta el sentido común, pero en su época dejaba un horizonte temporal lo suficientemente amplio como para no considerar una emergencia este asunto.

Sin embargo, el mismo informe se ha ido actualizando en diversos momentos (1992, 2004 y 2012), incorporando mayor cantidad de datos recolectados (sobre todo en las áreas de clima y biosfera), de mayor fiabilidad y actualizando los mismos a las distintas fechas. Cada una de estas *revisiones* ha ido acortando el plazo predicho por el informe original. Según lo recogido en la última edición (de hace 5 años) ya estaríamos en los límites físicos e incluso se dedican dos capítulos para proponer posibles transiciones para evitar un temido colapso.

Los autores destacan la importancia de la necesaria transición hacia una sociedad que consuma recursos sostenibles, lo cual necesita tanto de la generación de conocimiento como de las inversiones necesarias en múltiples ámbitos.

Nuestra civilización industrial está actualmente basada en un modelo de producción que transforma los recursos que extrae de la naturaleza —escasos y no renovables— en residuos, como consecuencia de su ineficiente utilización en las actividades humanas. El consumo de materias primas (incluida el agua potable y la energía) han permanecido hasta fechas muy recientes en un segundo plano. Y lo han hecho frente a la prioridad que se ha dado a los requerimientos del producto principal de cara a la satisfacción de las necesidades del mercado [*Del Val, 2011*].

En estas circunstancias no es de extrañar que la importancia otorgada a los residuos haya sido generalmente marginal, siendo un subproducto sobre el que se desarrollan estrategias orientadas a hacerlos menos visibles y molestos o, si acaso, a tratar de reducir su generación cuando un excesivo volumen o peligrosidad ha obligado a ello.

Además del problema que supone el agotamiento de los recursos naturales, el incremento de la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera terrestre está provocando alteraciones en el clima [*Oreskes, 2004*]. Los gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, metano, etc...) actúan de manera similar al techo de vidrio de un invernadero, atrapando el calor y recalentando el planeta. El aumento de las temperaturas conduce al cambio climático que incluye efectos tales como el aumento del nivel del mar, cambios en los modelos de precipitación que producen inundaciones y sequías, o la diseminación de enfermedades transmitidas por vectores tales como la malaria.

Las emisiones de gases efecto invernadero han sido muy intensas a partir de la Revolución Industrial, momento a partir del cual la acción del hombre sobre la naturaleza se hizo intensa. Si el desarrollo mundial sigue aumentando al ritmo actual sin que exista un cambio de modelo, antes del año 2050, las concentraciones de dióxido de carbono se habrán duplicado con respecto a las que había antes de la Revolución Industrial.

Por poner algunos ejemplos, el promedio mundial de temperatura entre los años 1850 y 2014 aumentó en aproximadamente 0,8 °C [*NASA, 2015*], pero ya se proyecta un aumento adicional de 1,4°C a 5,8°C en el año 2100 [*Meehl, 2007*]. El espesor del hielo ártico al final del verano/principio del otoño disminuyó en aproximadamente un 40% y el promedio mundial del nivel del mar aumento de 12 a 22 cm durante el último siglo [*Meehl et al, 2005*].

Unido a la citada escasez de materias primas y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la sociedad actual se enfrenta también a un escenario de energía disponible decreciente a medio-corto plazo debido al llamado Pico

del Petróleo o *Peak Oil*. El pico del petróleo es el momento en el cual se alcanza la tasa máxima de extracción de petróleo global y tras el cual la tasa de producción entra en un declive —algunas veces rápidamente— hasta llegar al agotamiento. A menudo se confunde el pico petrolero con el agotamiento del petróleo. En realidad, el pico del petróleo es el punto de máxima producción, mientras que el agotamiento corresponde al período de caídas de las reservas y los suministros.

Este concepto se deriva de la *curva de Hubbert* [Hubbert, 1956] y se ha demostrado que es aplicable tanto a la tasa de producción doméstica de una nación determinada como a la tasa de producción petrolera global. Su modelo, actualmente denominado *Teoría del pico de Hubbert*, y sus variantes han descrito con razonable precisión el pico y el declive de la producción de pozos y yacimientos petrolíferos en diferentes regiones y países. Asimismo, ha probado ser útil para otros ámbitos de producción de recursos limitados.

Según el modelo *Hubbert*, la tasa de producción de un recurso limitado seguirá simétricamente una curva en forma de campana basada en los límites de la explotabilidad y de las presiones del mercado, como se ilustra en la figura 1.1. Varias versiones modificadas de su modelo logístico original son utilizadas, empleando funciones más complejas para incluir otros factores geoeconómicos. Aunque cada versión sea aplicada a un problema específico, las características centrales de la curva de Hubbert permanecen invariables (producción que deja de crecer, se aplana y luego declina).

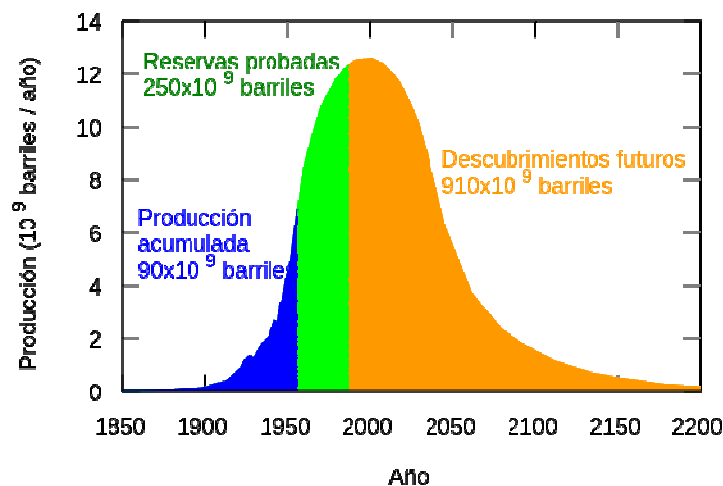


Figura 1.1: Curva de producción sugerida originalmente por M. King Hubbert en 1956. (Imagen: Han-Kwang Nienhuys).

En 2005, el Departamento de Energía de Estados Unidos publicó un informe titulado *Alcanzando el pico de producción mundial de petróleo: impacto, mitigación y gestión del riesgo* [Hirsch, 2005]. Conocido como el Informe *Hirsch*, afirma que: "El pico

de la producción de petróleo coloca a EE.UU. y al mundo ante un problema de gestión del riesgo sin precedentes. Conforme el pico se aproxima, los precios del combustible líquido y la volatilidad de precios se incrementarán de forma dramática y, sin un esfuerzo de mitigación a tiempo, los costes sociales, económicos y políticos no tendrán precedentes. Existen opciones viables de mitigación del problema tanto en el lado del productor como en el del consumidor, pero para que haya un impacto sustancial deben ser iniciadas al menos una década antes que el pico del petróleo”.

Independientemente de la fecha, es asumible que el pico del petróleo va a tener lugar y puede suponer costes dramáticos para las economías nacionales, especialmente si se manifiesta como un cambio abrupto (esto es: si el pico ha sido ya alcanzado o se alcanza en el corto plazo). En referencia a ello, el problema principal son los combustibles líquidos para el transporte: vehículos de motor, aviones, trenes y barcos, que no disponen de alternativas viables a fecha actual. Es un problema evitable con una adecuada de gestión del riesgo, y cuya mitigación requerirá de una cantidad sustancial de tiempo y recursos donde, una vez más, la generación de conocimiento se antoja clave para minimizar el impacto.

En consonancia con todo lo anterior, la evolución de los valores sociales está desarrollando una creciente preocupación por las cuestiones medioambientales, amén de una cierta toma de conciencia, especialmente a nivel institucional, sobre la necesidad de alcanzar un desarrollo sostenible. Ello es sólo posible disponiendo de conocimientos sobre la cuantificación y evolución en el consumo de recursos naturales, de su reducción mediante el aumento de la eficiencia de su transformación en bienes útiles y, finalmente, de las posibilidades de aprovechamiento de los inevitables subproductos que se generan.

Para poder evaluar este problema se han desarrollado metodologías orientadas a cuantificar las alteraciones ocasionadas en el medio ambiente por cualquier producto, proceso o actividad [San-José et al., 2007; Reyes et al., 2014; Cuadrado et al., 2015; Oses et al., 2017]. Dado que todo proceso provoca impactos medioambientales, consume recursos y/o emite sustancias al medio ambiente interesa, por lo tanto, valorar los impactos que afectan tanto en el cambio climático como a la reducción de la capa de ozono, eutrofización, acidificación u otros impactos.

Por ejemplo, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es un marco metodológico para estimar y evaluar los impactos medioambientales atribuibles a un producto o servicio durante todas las etapas de su vida [US Environmental Protection Agency 2010]. Fue desarrollado en los años sesenta y es utilizada para la prevención de la polución desde los setenta. Es la base del *Ecodiseño*, el *Ecoetiquetado* y las *Declaraciones Ambientales de*

*Producto.* No existen procedimientos específicos o guías a seguir, pero sí una serie de aproximaciones que pueden ser útiles, en función de las necesidades a resolver por medio de esta metodología.

A nivel de marco normativo, la metodología para el ACV queda recogida en las normas ISO 14040 (Principios y marco de referencia) e ISO 14044 (Requisitos y directrices).

El principio básico de la herramienta es la identificación y descripción de todas las etapas del ciclo de vida de los productos, desde la extracción de las materias primas, la producción, la distribución y uso del producto final hasta su posible reutilización, reciclaje o deshecho, pasando por las siguientes etapas [ISO, 2006]:

- Adquisición de materias primas: Todas las actividades necesarias para la extracción de las materias primas y las aportaciones de energía del medio ambiente, incluyendo el transporte previo a la producción.
- Proceso y fabricación: Actividades necesarias para convertir las materias primas y energía en el producto deseado.
- Distribución y transporte: Traslado del producto final al cliente.
- Uso, reutilización y mantenimiento: Utilización del producto acabado a lo largo de su vida en servicio.
- Reciclaje: Comienza una vez que el producto ha servido para su función inicial y, consecuentemente, se recicla a través del mismo sistema de producto (ciclo cerrado de reciclaje) o entra en un nuevo sistema de producto (ciclo de reciclaje abierto).
- Gestión de los residuos: Comienza una vez que el producto ha servido a su función y se devuelve al medio ambiente (parcial o totalmente) como residuo.

Según esta última descripción, el ACV es un análisis que, en general, considera que los productos nacen y mueren. Es decir: tienen un solo uso. Popularmente, se conoce este planteamiento como *“cradle to grave”* (de la cuna a la tumba), término establecido tiempo atrás [Braungart y McDonough, 2005]. Desde esta óptica, la metodología ACV se queda corta y emerge el concepto *“cradle to cradle”* basado en la idea de que todas las materias primas de un producto se pueden separar al final de su ciclo de vida y reutilizarse para producir nuevos materiales, pero de la misma calidad que los originales (mediante *upcycling* o biodegradación).

Además, en este paradigma más avanzado, las energías renovables encajan en todas las fases del ciclo del producto, y los materiales no se consumen, sino que se “toman prestados”.

En resumidas cuentas, tal y como se ha expuesto hasta ahora, nuestra sociedad se enfrenta en el corto-medio plazo a varios problemas de diferente origen: agotamiento de recursos naturales y especialmente de petróleo, cambio climático, impacto ambiental de las actividades humanas, gestión ineficiente de los residuos, etc.

Sin embargo, todos ellos con una solución común, cual es, dirigirnos necesariamente hacia un modelo de sociedad que minimice el uso de materias primas, reutilice hasta un nivel extremo todo lo que sea posible, amén de reducir necesariamente nuestro gasto energético muy notablemente en todos los ámbitos. Dicho todo ello, tanto en lo referido a las emisiones de CO<sub>2</sub>, u otros gases invernadero, como por la inferior capacidad de las energías renovables en comparación con el modelo energético actual.

## ***1.2.- Sinergias para una construcción sostenible***

En todo este contexto complejo y que implica un cambio de paradigma, si se quiere contribuir a cambiar el patrón de crecimiento basado en hipótesis de abundancia, hacia una economía circular (inteligente, sostenible e integradora) es necesario buscar sinergias entre el tradicional sector de la construcción con otros negocios muy distintos, aunando y complementando las necesidades de sostenibilidad de ambos.

La construcción, de alto desarrollo en España, es un sector altamente demandante de materias primas pétreas, movilizador de las mayores cantidades de materiales a escala global. Por ejemplo, el hormigón es el tercer elemento consumido por el ser humano después de los alimentos y el agua [Bharath, 2015]. A un nivel más local, según los datos de la Asociación Nacional de Fabricantes de Áridos ANEFA, en 2016 se consumieron en la construcción cerca de 95 Mt de áridos [ANEFA, 2016]. Y, según la asociación hormigón preparado (ANEFHOP), la CAPV, por ejemplo, produjo en 2016, sin incluir prefabricados, unos 2,3 Mt de hormigón, siendo áridos el 75% de su volumen, aproximadamente.

Por otro lado, una industria con arraigo histórico y alta presencia en el País Vasco como es el caso de la fabricación de acero, genera en grandes cantidades un subproducto industrial de su actividad denominado escoria siderúrgica, como sólido sobrenadante en

la superficie del acero líquido [Palacios, 2002]. Estas escorias de acería eléctrica son fundamentalmente de dos tipos:

- La denominada escoria negra (EAFS - *Electric Arc Furnace Slag*) es generada en el horno eléctrico de fusión de la chatarra. Posee aspecto pétreo (negro) con geometría de grava, es pesada (20% más que el árido natural), porosa, dura y de granulometrías diversas (de milímetros a varios decímetros).
- La escoria blanca (LFS – *Ladle Furnace Slag*), es generada en horno cuchara (metalurgia secundaria); de aspecto pulverulento y alta complejidad química/cristalina, es reactiva en agua y matrices cementicias [Herrero, 2016].

De las cantidades que se generan de estos subproductos, dan cuenta algunos indicadores industriales:

- Las escorias generadas por tonelada acero suponen unos 150kg en el caso de escoria negra (EAF) y 60 kg en la blanca (LFS).
- España es el 4º productor europeo de acero (8,5%), pero el 3º según la vía eléctrica (chatarra), conformando el 70% de su producción [Unión de Empresas Siderúrgicas, 2016], que supone producir 0,21 ton de acero por habitante
- El entorno geográfico de la CAPV supone más del 40% de la producción total en España [Comisión Europea, 2013], o lo que es lo mismo, el 1% del total de acero de horno eléctrico mundial [Santamaría, 2017].

Este escenario ha dado lugar a su acumulación en acopios y vertederos lo cual plantea, a corto plazo, serios problemas ambientales, siendo además un sector de segura presencia por muchos decenios [Maghool *et al.*, 2017]. Sin embargo, el que estas escorias sean de naturaleza pétreo, duras, activas en la hidratación del cemento, gruesas, finas, etc. son características a tener muy en cuenta, pues ellas permiten que dejen de ser residuos / escorias / subproductos, para pasar a constituirse en *materias primas*, dentro de lo que se ha dado en llamar la "*economía azul*", según terminología establecida por Gunter Pauli.

De este modo, el objetivo sería incorporar al ciclo productivo general los residuos de la industria siderúrgica en forma de insumos como materias primas de valor añadido a otro sector productivo (edificación y obra civil) altamente consumidor de recursos naturales: explotación de canteras, cemento y emisión de CO<sub>2</sub>, etc.

Estas materias primas siderúrgicas (EAFS-LFS) tendrán verdadero valor añadido en tanto promuevan matrices (hidráulicas ó bituminosas) de altas prestaciones para los

sectores de la edificación y obra civil. Sin embargo, aunque las investigaciones de la UE sobre utilización de escorias cuentan con más de 20 años y 60 proyectos de I+D+i dentro del programa marco sectorial del carbón y el acero (RFCS), son muy pocos los proyectos que abordan el campo de la construcción, poniendo además el foco en la escoria desde el proceso de acería, más que en sus requisitos de cara a la aplicación constructiva.

Y si el planteamiento se orienta hacia el empleo de las EAFS/LFS como materias primas “nobles” que formen parte de productos de construcción de *altas prestaciones*, ya no existen proyectos de investigación al respecto.

Las escorias de acería eléctrica son los subproductos claves a abordar en la presente Tesis Doctoral, fruto de las evidencias de su impacto en el entorno en el cual se desarrolla la presente investigación. Sin embargo, bien es cierto que hay otros subproductos que ya recientemente son objeto de estudio; se listan algunos ejemplos: residuos plásticos de molinos eólicos [García *et al.*, 2014], residuos de construcción y demolición [Vegas *et al.*, 2015], minería del carbón [Frías *et al.*, 2016], sector maderero [Madrid *et al.*, 2017].

Los últimos referidos (del sector de la madera), por su originalidad, se abordan también (enfocados al empleo de serrín en hormigones de bajas resistencias), aunque de una manera más periférica, abriendo camino a futuras investigaciones como es el caso de la tesis Doctoral en curso de Dña. Maggi Madrid, también desarrollada en los entornos del grupo de investigación que acoge la presente tesis doctoral (<http://www.ehu.eus/es/web>).

Fuera del ámbito de la presente Tesis Doctoral, desde la óptima de otras prestaciones como la absorción sonora o de la fabricación de láminas antiimpactos, es necesario mencionar también otros trabajos antes realizados sobre la valorización de residuos (textiles, plásticos o neumáticos fuera de uso) y su uso acústico en construcción [Maderuelo, 2014] [Guraya *et al.*, 2003].



## 1.3.- El problema del ruido

El sonido puede definirse como una alteración física generada por el movimiento vibratorio de un cuerpo que se propaga en forma de ondas mecánicas por un medio elástico que puede ser un fluido (por ejemplo, el aire) o un sólido. El sonido humanamente audible se produce cuando las oscilaciones de la presión del aire son convertidas en ondas mecánicas dentro del oído humano y percibidas entonces por el cerebro. Dos son los parámetros imprescindibles a la hora de definir un sonido: frecuencia e intensidad.

La frecuencia de un sonido se define como el número de vibraciones por segundo de dicho movimiento ondulatorio (una frecuencia baja equivale a un sonido grave y una frecuencia alta, a un sonido agudo). La frecuencia se expresa en hercios (Hz) y el rango de frecuencias audibles por el ser humano está entre aproximadamente entre los 20Hz y los 20kHz.

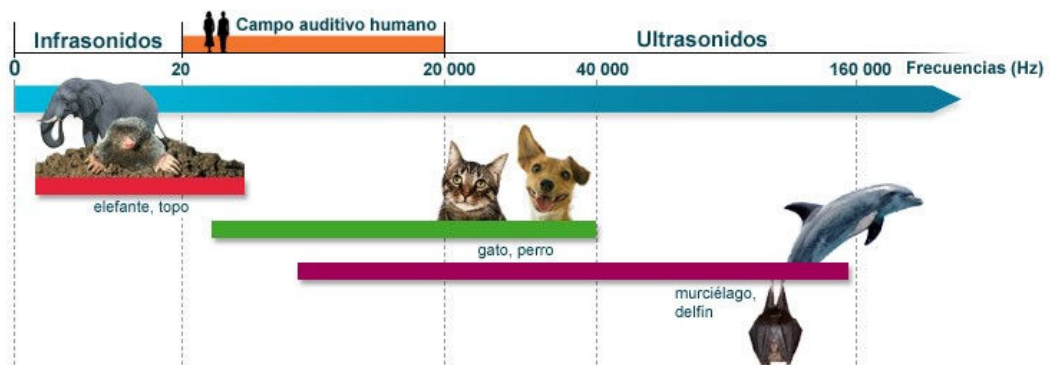


Figura 1. 2. Rango de frecuencias audibles por el ser humano frente a otros animales. Fuente: Asociación Cochlea Autor: Stephan Blatrix)

El segundo parámetro fundamental a la hora de caracterizar un sonido es su intensidad, que depende de la amplitud de la vibración. Como la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala logarítmica y no lineal, la intensidad se expresa en decibelios (dB). En acústica se asigna el valor de 0 dB al umbral de audición del ser humano, que se estima equivale a un sonido con una presión de referencia de 20  $\mu$ Pa.

Señalar que el oído humano no percibe igual las distintas frecuencias así que para aproximar más la medida a la realidad auditiva, se ponderan los decibelios utilizando las

llamadas curvas isofónicas. De este modo se define el decibelio A (dBA): una ponderación del nivel sonoro medido que reduce parte de las bajas y de las muy altas frecuencias.

A menudo, y especialmente con propósitos normativos, el nivel del sonido se expresa mediante un único valor, correspondiente a la suma del nivel en todas las frecuencias audibles.

El ruido implica el mismo fenómeno físico que constituye un sonido, aunque suele definirse de una manera más subjetiva considerándose como un sonido molesto o un sonido no deseado. Es decir, el ruido es una apreciación subjetiva del sonido, considerándose toda energía acústica susceptible de alterar el bienestar fisiológico o psicológico, interfiriendo y perturbando el desarrollo normal de las actividades cotidianas. Por lo tanto, un mismo sonido puede ser considerado como molesto o agradable, dependiendo de la sensibilidad o actividad que esté desarrollando el receptor.

Se llama contaminación acústica al exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente en una determinada zona. Este término hace referencia por lo tanto al *ruido* provocado por las actividades humanas, que produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de los seres vivos, además de afectar a nivel social y económico. Si bien el ruido no se acumula, traslada o mantiene en el tiempo como otras contaminaciones, también puede causar grandes daños en la calidad de vida de las personas. Siempre y cuando no se controle adecuadamente, constituye uno de los mayores motivos de queja en nuestra sociedad. Las principales causas de la contaminación acústica son aquellas relacionadas con las actividades humanas como el transporte, la construcción de edificios u obras públicas, las industrias, actividades de ocio o vecinales, entre otras.

Las viviendas son nuestro lugar de descanso. Los edificios, muchas veces también, son nuestro lugar de trabajo. En total, pasamos dentro de ellos una gran parte de nuestra vida. Por ello, a finales de la década de los ochenta la Directiva Europea relativa a productos de construcción de edificios 89/106/EEC, establece la protección contra el ruido como uno de los seis requisitos esenciales a cumplir por una vivienda. Y lo lleva a cabo, haciéndose eco de la creciente demanda, por parte de los consumidores, de unas mejores condiciones de habitabilidad en sus viviendas; mejoras que garanticen que la inmisión de ruidos en sus casas (tanto provenientes del interior cómo del exterior del edificio) no afecte a la vida cotidiana de sus ocupantes.

Siguiendo lo marcado por la citada Directiva, la *Ley de Ordenación de la Edificación* (BOE núm. 266, 06/11/1999) considera también la protección contra el ruido como un

requisito básico. En todas las sociedades avanzadas se controla reglamentariamente y, en España, se hace desde el año 1981 con la aprobación de la primera NBE CA (Norma Básica de Edificación, Condiciones Acústicas). En la actualidad, con la aprobación del Código Técnico de la Edificación (<http://www.codigotecnico.org/>), se ha dado un gran avance, cuantitativo y cualitativo, en esta materia con una significativa elevación de los niveles de exigencia realizada. Todo ello al objeto de dar respuesta a la demanda social (aunque dichos niveles siguen siendo de los más bajos de la CEE).

El *Documento Básico* del Código Técnico que concreta y cuantifica el requisito esencial de confort acústico es el denominado *DB-HR Protección frente al ruido*. Este documento especifica parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de la citada exigencia básica limitando, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

El DB-HR considera el edificio acabado como un producto. Por lo tanto, se exigen las prestaciones acústicas al edificio en su conjunto y no a cada uno de sus elementos constructivos, como lo hacía hasta ahora la NBE CA-88. Esto implica además que el método de comprobación del cumplimiento sean las medidas *in situ* en el edificio terminado.

Sin embargo, este cambio de paradigma no implica que las prestaciones acústicas de aislamiento de los materiales de construcción no sean importantes. Más al contrario, son los datos de entrada a los modelos de cálculo que permiten conocer el comportamiento acústico del edificio y su valoración es, por lo tanto, imprescindible a la hora de diseñar un edificio.

En este punto, se enlaza con todo lo expuesto anteriormente sobre los hormigones con áridos siderúrgicos u otros subproductos. Una vez demostrada su trabajabilidad y su viabilidad estructural (estados límites últimos), el siguiente paso es caracterizar otros parámetros quizás menos críticos (estados límites de utilización) que los anteriores, pero igualmente necesarios a la hora de alcanzar *altas prestaciones*. Una de las preguntas que busca responder la presente Tesis Doctoral es: ¿cuál es el aislamiento frente a ruido de productos que incorporen escorias de horno de arco eléctrico en sustitución de áridos naturales?, ¿supone una mejora? ¿o, al contrario, empeora las prestaciones?, ¿es compatible su utilización con los estándares actuales de confort acústico en los edificios?

## ***1.4.- Objetivos y alcance de la Tesis***

El objetivo fundamental de la presente Tesis Doctoral es el de aportar conocimiento sobre las prestaciones acústicas de mezclas hidráulicas (hormigones, etc.) que incorporen áridos provenientes de subproductos industriales, campo que a fecha actual no ha sido todavía estudiado. Todo ello, especialmente, centrándose en el caso de las escorias siderúrgicas, pero contemplando otros también (serrín, etc...) que se están evaluando como posible mejora para el aislamiento térmico.

Igualmente, otros materiales de construcción como los yesos serán parcialmente sustituidos por escorias negra de acería y evaluada la contribución de estas al aislamiento acústico del material, lo cual constituye otra novedad tanto por el uso de escorias negras en materiales basados en yeso como por su propia valoración acústica.

Para poder realizar todo ello, hay además un segundo objetivo no menos importante, que persigue establecer un método experimental válido para la realización de ensayos acústicos a escala reducida con la idea de, a futuro, ampliar el conocimiento en todo tipo de materiales base y sustitutivos de los actuales.

## **1.5.- Estructura de la Tesis**

La presente Tesis Doctoral se articula en torno a 6 capítulos, descontando el de bibliografía, tal y como se describen a continuación:

### **1.- Introducción**

El primer capítulo resume el contexto y explica los problemas que justifican la investigación planteada. Se enuncian los objetivos y alcance de la Tesis Doctoral y se define su estructura.

### **2.- Estado del Arte**

En el segundo capítulo se recoge una revisión del estado del conocimiento en el que se sintetizan las investigaciones previas relativas a la aplicación de subproductos industriales para construcción, especialmente en lo relativo a los áridos siderúrgicos procedentes de la primera fusión del acero en horno eléctrico de arco. Igualmente se analizan los métodos de caracterización del aislamiento acústico de materiales, examinando los parámetros físicos que influyen en el mismo, el estado de desarrollo de las teorías y las peculiaridades que suponen unas cámaras de transmisión acústica tanto a escala real como reducida.

### **3.- Escalado experimental y su propuesta metodológica de medida**

En el tercer capítulo, se desarrolla la metodología seguida para el diseño, cualificación y validación de los resultados de las cámaras de ensayo a escala, así como el propio método de ensayo establecido. Se proponen limitaciones a las posibles escalas a implementar, así como aportaciones concretas para cumplir con las exigencias acústicas, que luego permitirán comparar los resultados con los obtenidos en laboratorios a escala real.

### **4.- Aislamiento acústico de hormigones con subproductos industriales**

Este capítulo recoge los resultados de los ensayos realizados en muestras de hormigón con áridos siderúrgicos de distintos tipos (bombeables /

autocompactantes), con diferentes tipos de cemento (I, II, IV), distintos subproductos (escoria negra, serrín) y otros componentes (fibras sintéticas o metálicas). Se comparan los valores entre si y frente a amasadas de hormigón de referencia con áridos naturales, valorándose su viabilidad de utilización en obra real.

## **5.- Aislamiento acústico de yesos con áridos siderúrgicos**

El quinto capítulo aborda el comportamiento acústico de muestras con base yeso o escayola a las que se les han añadido escorias negras. Los resultados se comparan tanto entre sí como con muestras de referencia de yesos naturales o placas de yeso laminadas, evaluando su aportación tanto para elementos de cerramiento de entramado autoportante como de revestimientos directos sobre paredes de fábrica.

## **6.- Conclusiones y futuras líneas de investigación**

En el sexto capítulo, se llevará a cabo un análisis de todos los resultados obtenidos, y se recopilarán las conclusiones generales más relevantes obtenidas a lo largo de la presente investigación. Finalmente, se propondrán las investigaciones futuras para continuar trabajando en aspectos clave que no hayan podido abordarse en el transcurso de la presente Tesis.



# Capítulo **2**

## *Estado del Arte*

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

---



## **2.1. Impacto del sector de la construcción**

El hipersector de la construcción engloba un elevado número de subsectores económicos y se denomina a menudo como “motor de la economía”, ya que desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico de cualquier país.

Por poner un ejemplo ligado a las estructuras de hormigón, sólo con los sectores industriales relacionados con los materiales y productos, incluidos en la Instrucción EHE, la actividad económica puede situarse en torno al 2,4% del PIB, ello sin incluir la propia actividad constructora.

Pero el impacto del sector construcción no se ciñe únicamente al ámbito económico: más del 60% de las materias primas extraídas de la Tierra, son consumidas por dicha actividad, según las conclusiones de <http://www.worldwatch.org/Vital-Signs-22> y la transformación de dichas materias primas en materiales de construcción genera aproximadamente el 7 % de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> [Kangas, 2004; San José et al, 2007].

### **2.1.1.- Perspectivas económicas a medio plazo**

Por ejemplo, a nivel europeo, el último informe de *Euroconstruct* [<https://itec.es/servicios/estudios-mercado/euroconstruct-sumario-ultimo-informe/>] sobre el sector construcción plantea un horizonte tranquilo para la economía europea, recuperándose el nivel de empleo que registrado a mediados del 2008, contribuyendo, los bajos costes de financiación, a la aceleración de la inversión. El crecimiento que se espera es del 1,7% anual (promedio 2017-2019), superior al previsto el semestre anterior.

Estas buenas noticias tienen su reflejo en el sector construcción, que tenía una expectativa, para el 2017, de crecer el 2,9%. Esta previsión puede no parecer excesivamente positiva tras haberlo hecho un 2,5% en 2016 pero se percibe cómo el sector gana solidez. El 2016 fue un año de dificultades para la ingeniería civil y arrastrando a negativo a 5 países (Polonia, Hungría, Chequia, Eslovaquia y Portugal), pero en la previsión 2017 vuelve al crecimiento.

Continuamos con expectativas positivas en la previsión a medio plazo, aunque se espera cierta desaceleración en 2018 y 2019, pues la edificación de obra nueva asuma extender más tiempo los ritmos de avance de 2016-2017, siendo la mejora en ingeniería civil insuficiente para equilibrarlo.

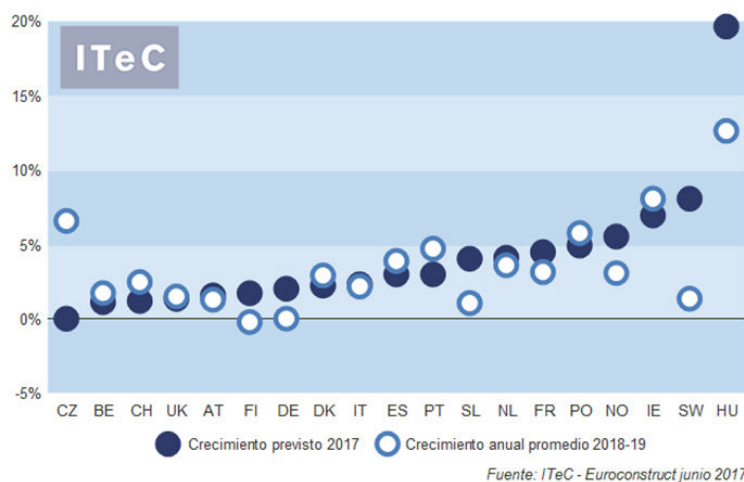


Figura 2.1: Producción del sector construcción por países. Estimación 2017 y proyección de crecimiento anual promedio 2018-2019 a precios constantes.

En edificación residencial el panorama es muy diverso, con países que continúan en mínimos y otros que alcanzan o superan los máximos de las dos últimas décadas. Hay excepciones positivas que han impulsado la producción europea un 8,8% (2016), con un valor esperado del 6,8% en 2017. Por lo tanto, se puede calificar la situación de la vivienda de nueva planta como muy positiva. Descontando la contribución de España e Italia al total europeo (año 2007) se superaron los 1,6 millones de viviendas finalizadas. Esta cifra volverá a alcanzarse en el 2017 pudiendo aumentar hasta los 1,75 millones en 2019. Perdiendo intensidad el crecimiento, en términos de producción, a partir de ese año, a causa de la desaceleración que se espera en Alemania y países nórdicos, principalmente.

En edificación no-residencial la situación no es tan positiva pues el mercado no ha conseguido volver al crecimiento hasta 2016 (2,5%) y las oportunidades a corto y medio plazo son mucho más modestas que en el campo residencial. El crecimiento más intenso se prevé para 2017 (2,8%) pudiendo sufrir, a partir de ese punto, una desaceleración que lo reduciría incluso hasta el 1% en el año 2019. Estas expectativas tan poco ambiciosas tienen mucho que ver con el mercado de las oficinas, en el que se descuenta la falta de empuje del Reino Unido, cuya cuota de mercado es más de un tercio del total europeo de oficinas, a partir del 2018.

De otra parte, la construcción industrial y logística tiende a recobrar fortaleza con la mejora económica. Igualmente se recupera la construcción relativa al sector salud que, aunque tiene pequeña cuota de mercado, muestra esperanzas de que la demanda europea supere su fase más contractiva. Como en el sector residencial, Alemania muestra síntomas de haber alcanzado su techo, como para creer pueda continuar creciendo.

La ingeniería civil fue incapaz de crecer durante el 2016 (-1,8%). El relevo entre programas de fondos estructurales de la UE ha provocado un descenso de producción en los países del Este. Y, por otra parte, España y Portugal han tenido eliminar inversión para contener su déficit. La situación es mejor en 2017 y, aunque los problemas de déficit aún siguen pesando, al menos la financiación comunitaria hacia los países del Este se ha restablecido. Se prevé un crecimiento de la producción del 2% (2017) y del 3,6% (2018 y 2019). Este nuevo episodio de crecimiento estará basado más en la infraestructura de transporte, frente al periodo anterior (2013-2015), enfocado hacia las infraestructuras energéticas.

Por países, resulta esperable un crecimiento más intenso en Polonia y Hungría, con Chequia a una cierta distancia y Eslovaquia mostrando problemas para atraer inversión. Aparte del consabido *Brexit*, el Reino Unido espera ir aumentando su número de infraestructuras en ejecución, lo cual lo dejaría en una posición muy favorable tras el 2018.

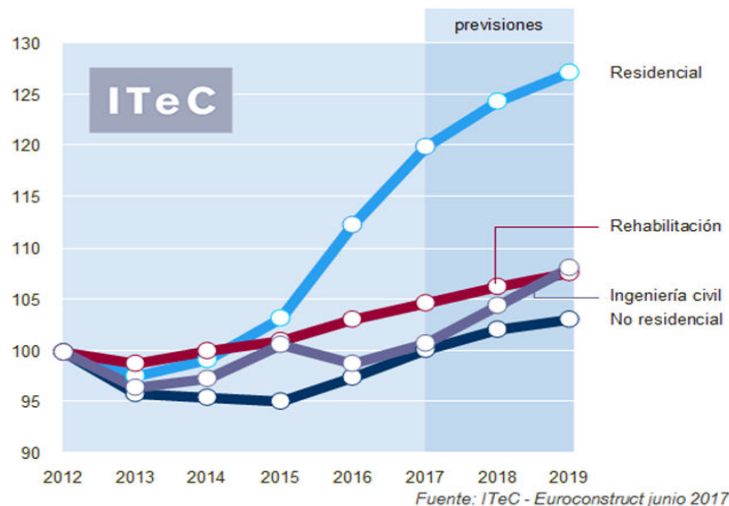


Figura 2.2: Evolución por subsectores europeos. Índices de producción a precios constantes, base 2012=100.

A nivel estatal, en el sector construcción la salida de la crisis está resultando más complicada para el sector público que para el privado. En 2016, el mercado de la edificación creció un 6,5% a causa de la demanda privada, mientras que la ingeniería civil se desplomó un 12%, provocando que la producción total no pasase del 1,8%. La

inversión pública de 2016 se resintió también debido a la operativa de un gobierno en funciones, aunque el auténtico problema de fondo (aún persistente) fue el desequilibrio presupuestario. Si la demanda pública se acaba reincorporando al mercado, parecería razonable augurar unos crecimientos algo más sólidos en 2018 (4,1%) y 2019 (3,6%).

En el contexto de la edificación residencial los promotores siguen prudentes, aunque cada vez se despejan más dudas sobre la situación del stock y la recuperación de la demanda, facilitando los proyectos de nuevas viviendas. Pese a que el número de ellas que se ponen en construcción es todavía pequeño, ha bastado para impulsar la producción en un 14% en 2016 y un 10% en 2017. Se espera que la evolución positiva continúe a medio plazo, aunque a ritmos más moderados del 6% en 2018 y 2019.

La edificación no residencial crece de nuevo, pero con muy poca intensidad (1,2% en 2016). El mercado sigue iniciando muy esporádicamente nuevos proyectos, probablemente porque la propia demanda tampoco se recupera de forma rotunda. La previsión es alrededor del 3,5% anual a lo largo de 2017-2019 y sólo es abiertamente expansiva en oficinas.

El repunte del déficit público ha provocado que la inversión en ingeniería civil continúe en mínimos. Aunque se han anunciado planes cuatrienales de puertos y aeropuertos, que permiten albergar cierto optimismo más a medio plazo, continúan las dudas sobre la estrategia en los sectores críticos para el mercado de la ingeniería civil: energía, ferroviario, carreteras y agua. El grueso del ajuste se prevé concentrarlo en 2016 (-12%) y 2017 (-6%) y, si la previsión de producción crece un 4% (2018) y un 3,5% (2019), no será porque se esperen cambios importantes en la política estatal, sino porque la obra local aflorará, previsiblemente, antes de las municipales (2019).

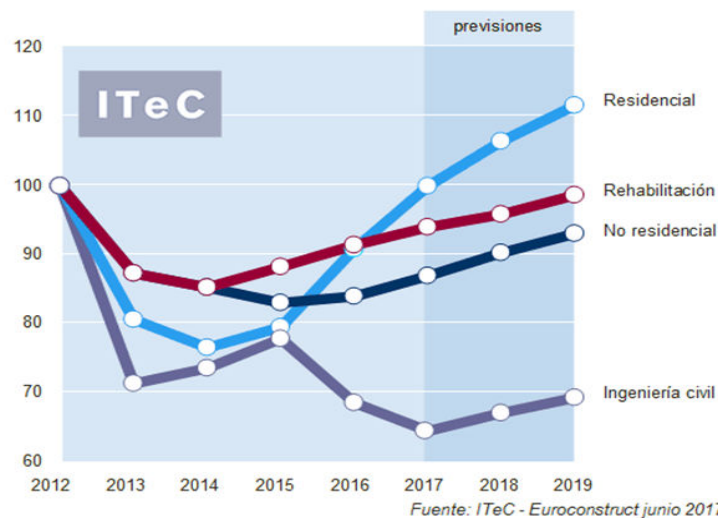


Figura 2.3: Evolución de los distintos subsectores en el mercado español. Índices de producción a precios constantes, base 2012=100

Evidentemente, tampoco es igual la recuperación del sector por comunidades autónomas. Las que han atravesado una crisis más leve y poseen recuperación más intensa son Baleares, Madrid y el País Vasco. Analizando los visados del año 2016, en España se están iniciando 1,5 viviendas nuevas por 1.000 habitantes (por debajo del 50% de la media europea). Las zonas más activas son Madrid (2,6/1000hab.), Navarra (2,2) País Vasco (1,9) y La Rioja (1,8). Estas comunidades concentran el 35% de los nuevos proyectos en una zona que supone el 21% de la población. Por contra, la Comunidad Valenciana, Murcia y Castilla-La Mancha se encuentran en la peor situación de recuperación del sector.

En lo referente al nicho de mercado de la rehabilitación (óptica de las licencias de obra mayor), se observa cómo tras haber salido del bache de 2012-2014, cuesta alcanzar volúmenes superiores a los registrados en 2015. La obra mayor de rehabilitación supone una inversión algo inferior a los 45 €/hab.

### ***2.1.2.- Innovación y sostenibilidad en el sector***

Tras salir de la espiral más crítica del ciclo económico, varios informes [[http://media.firabcn.es/content/S025017/documents/informe\\_economico\\_2017\\_es.pdf](http://media.firabcn.es/content/S025017/documents/informe_economico_2017_es.pdf), entre otros] concluyen que es el momento de que el sector se enfrente a la revolución que tiene pendiente: la innovación en tecnología, sistemas y gestión de procesos. Cuestiones todas ellas que son la mejor protección para alejar el riesgo de futuras recaídas.

Sin embargo, éste es precisamente el sector que menos invierte en innovación, moviéndose en valores prácticamente simbólicos. Los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) constatan que, en 2015, tan sólo el 1,1% del gasto en innovación que realizaron las empresas españolas procedían de la construcción, siendo un sector que aportaba el 10,4% del PIB.

Dentro de los materiales de construcción, el hormigón es el material por excelencia, con un muy alto grado de impacto económico en el mercado de la edificación y la obra civil como ya se avanzó en el punto 1.2. Las líneas de investigación en torno al hormigón se han orientado tradicionalmente hacia la mejora de sus prestaciones, que dependen de las de sus componentes básicos, de la proporción de ellos y de las características físico-químicas de la interfase. Sin embargo, el desarrollo del hormigón

debe también dar respuesta a las exigencias sociales de conservación de recursos naturales y desarrollo sostenible.

El concepto sostenibilidad en hormigones implica alcanzar soluciones técnicas para las diferentes fases del ciclo de vida de una estructura: diseño, ejecución, mantenimiento y demolición. Las posibilidades de mejora del hormigón en cuanto al consumo de recursos naturales presentan grandes posibilidades para la innovación y el desarrollo en todos sus componentes (agua, cemento, aditivos y áridos).

Los impactos medioambientales asociados a la fabricación del hormigón son principalmente:

- a) Extracción de materias primas para la fabricación del *clinker* y áridos. Esto constituye un importante consumo de recursos y espacios naturales (canteras).
- b) Deposición en vertedero de gran cantidad de residuos originados durante la construcción y el derribo de los edificios.
- c) Emisión tanto de partículas pulverulentas como de importantes volúmenes de gases de efecto invernadero, debido a las actividades de manipulación, almacenamiento y procesado de materiales (muchos de ellos implican calcinaciones con la consiguiente generación del CO<sub>2</sub>).

Por lo tanto, estos son los ámbitos principales a abordar para avanzar en la dirección del desarrollo sostenible. En este sentido, se han lanzado una serie de iniciativas en los últimos años, orientadas hacia la edificación residencial y de oficinas, que contemplan la totalidad del ciclo de vida desde la extracción de materias primas hasta la demolición y/o reutilización, siendo un ejemplo muy claro el Anejo 13 titulado “Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad (EHE).

Estos enfoques buscan tanto reducir los consumos de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> en la fabricación del hormigón como reemplazar, al menos parcialmente, recursos naturales incorporando subproductos industriales. Por ejemplo, por cada tonelada de clinker de cemento Portland producido, se libera alrededor de una tonelada de dióxido de carbono y su proceso de fabricación (<http://www.concretonline.com/>) consume alrededor de 4GJ de energía.

Aunque existe un amplio abanico de posibilidades para el aprovechamiento de los recursos existentes en los residuos, la generación de estos es cada vez mayor tanto en los países desarrollados como en las llamadas economías emergentes. El artículo 1.1 de la *Ley española de Residuos* (Ley 10/98, 1998), adopta el principio de jerarquía de 5 niveles:

prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y eliminación (vertedero, incineración sin recuperación energética o con baja recuperación energética). Sobre dicha base, en la industria del hormigón se pueden aprovechar los recursos materiales o energéticos presentes en los residuos mediante:

- Valorización energética de algunos residuos, utilizándolos como combustibles en la fabricación del cemento. Ejemplos de ello serían los neumáticos fuera de uso, harinas animales, residuos de madera y plástico, residuos líquidos peligrosos, etc.
- Valorización material de residuos como materias primas para la fabricación de adiciones y áridos. En este caso, algunos ejemplos serían los áridos reciclados, áridos siderúrgicos u otros materiales granulares de origen artificial.

Centrándonos en la valorización material, el reciclaje y aprovechamiento de los residuos de construcción, o el aprovechamiento de subproductos industriales como materiales alternativos a las materias primas de origen natural, reduce los impactos ambientales asociados tanto a los vertidos como a la extracción. Este uso de materiales alternativos depende en gran medida, tanto de su disponibilidad como de las materias primas de origen natural a nivel local. Y, del mismo modo, también de la existencia de políticas dirigidas a desincentivar el vertido de residuos en favor de opciones de su valorización.

En España se generan varios residuos o subproductos que, por sus características, resultan interesantes para utilizarlos en construcción. Y, todo ello, con un número de plantas de valorización o tratamiento de residuos que ha crecido significativamente durante los últimos años. La sustitución total o parcial de materias primas por subproductos industriales tiene posibilidades de negocio, siempre y cuando se demuestre la viabilidad técnica del producto final, pero también la ambiental, limitando la movilidad de potenciales contaminantes. Siempre con el objetivo de no condicionar la calidad de suelos y aguas y/o de prevenir riesgos a ecosistemas o incluso a salud humana.

Atendiendo a estos criterios, algunos subproductos que han mostrado ya posibilidades en la industria del hormigón son, por ejemplo:

1. Escorias negras de acería de horno eléctrico. [Amaral, 1999; Maslehuddin et al, 2003; Manso et al, 2006; Pellegrino, 2009].
2. Escorias blancas de acería. [Losañez, 2005; Rodríguez, 2008; Herrero et al, 2016].
3. Residuos de construcción y demolición [Vázquez-Ramonich et al, 1997; Vegas et al, 2008].

4. Productos resultantes de la activación térmica de lodos de papelera [Vegas, 2009].
5. Escorias de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) [Vegas et al, 2008].
6. Cenizas volantes procedentes de la depuración de humos de procesos térmicos [Malhotra et al, 2002].

Entre ellos, sin embargo, actualmente tan sólo las cenizas volantes encuentran una salida comercial en la fabricación de cemento. El resto de materiales aún se enfrentan a dudas por parte de los potenciales aplicadores habiendo, en definitiva, aún camino por recorrer en cuanto al enfoque hacia la actividad industrial y el mercado.

En cuanto al yeso, es conocido y utilizado desde la más remota antigüedad, baste decir que ya en el antiguo Egipto era una argamasa principal, previa al desarrollo posterior que tuvo el mortero Romano. Y era conocido, principalmente, en países de clima seco, siendo uno de los materiales de construcción más antiguos. Es de color blanco, textura fina y baja dureza que se obtiene por calcinación del sulfato de calcio hidratado y que tiene la propiedad de ser un aglomerante que endurece rápidamente. Como material de construcción, es un producto elaborado mediante deshidratación a partir de un mineral natural denominado igualmente yeso o aljez y que, una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente. Se le puede añadir otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad.

El yeso se utiliza abundantemente en construcción como material para guarnecidos y enlucidos y como pasta de agarre y de juntas. También se utiliza como prefabricado (paneles de yeso natural o de yeso laminado: <http://www.coemac.com>, entre otros) para tabiques, y escayolados para techos.

Su uso combinado con subproductos industriales está aún en desarrollo incipiente, con algunos estudios sobre la adición de escorias blancas (segunda fusión del “acero eléctrico”) en yesos para revestimiento [Rodríguez 2013].



## **2.2. Escorias siderúrgicas**

### **2.2.1.- El problema de las escorias**

La industria siderúrgica, cuyo objetivo es la producción de acero que posteriormente es empleado para fabricar multitud de productos diferentes, es una de las principales industrias pesadas a nivel global. La producción mundial de acero está aumentando debido a la industrialización de los países emergentes. Durante los últimos 15 años su producción casi se ha duplicado, aunque, más específicamente, en Asia, se ha triplicado [Santamaría, 2017]. Europa es el 2º productor mundial de acero con 177 Mt/año [European Commission, 2013], 10% del mundial, siendo ésta la industria pesada más importante (<https://www.worldsteel.org/>).

La industria del acero en el País Vasco se remonta a épocas pretéritas, pero fue durante el siglo XIX con la invención del horno alto cuando llegó a convertirse en el referente de la fabricación a nivel estatal, con un 60% de la producción de acero español. La crisis industrial de la década de 1980 dio lugar a una gran reducción en la producción y supuso el fin de la hegemonía de la industria siderúrgica vasca, culminando con el icónico cierre en 1996 de Altos Hornos de Vizcaya (<http://www.ftsi.es/>).

El proceso de fabricación de aceros y fundiciones no es único, existiendo diferentes procesos industriales que varían en función del elemento fabricado (hierro dulce, acero al carbono, acero de baja o de alta aleación, fundición férrea para moldeo, etc..) o incluso a veces también existiendo procesos alternativos para la fabricación de un mismo tipo de elemento.

Se denomina escoria siderúrgica al producto del enfriamiento y solidificación del material que sobrenada los caldos líquidos de las aleaciones férreas en la fabricación siderúrgica. El papel que desempeña la escoria es triple e incluye los siguientes aspectos [Palacios *et al*, 2002]:

- Proteger el caldo del contacto con la atmósfera evitando la entrada de gases.
- Aislar térmicamente, disminuyendo la pérdida de calor y un gradiente de temperatura alto en el metal líquido.
- Producir una serie de reacciones químicas de afino o purificación del metal.

Cada proceso de fabricación produce un tipo de escoria que sin ser esencialmente diferente de las demás, posee unas características propias que pueden determinar un uso como subproducto totalmente diferente de otras. Se consideran seis grandes grupos de escorias como las más importantes, aunque no las únicas (<https://unesid.org/>):

- Escoria de horno alto (BF slag)
- Escoria de convertidor al oxígeno (BOF slag)
- Escoria de horno eléctrico de arco (EAF slag)
- Escoria de horno cuchara (LF slag)
- Escoria de convertidor AOD, VOD
- Escoria de cubilote

La fabricación de acero en EAF presenta grandes ventajas, en cuanto a flexibilidad productiva, permitiendo fabricar toda clase de aceros y emplear diversos tipos de cargas (chatarra, hierro de reducción directa, lingote de hierro, etc.). Además, la inversión necesaria es baja comparada con la ruta integral y el proceso es automatizable y de alta eficacia.

Dicho lo anterior, se entiende el hecho de que la fabricación de acero basada en la fusión de chatarra y prerreducidos del hierro en horno eléctrico de arco (“acero eléctrico” o “vía eléctrica”) ha experimentado un notable crecimiento en las últimas décadas, siendo España el 3º productor europeo según esta vía. Ello implica una producción anual de escorias negras de 32 kg por habitante a nivel estatal, de las cuales el 40% aproximadamente se generan en el entorno geográfico de la CAPV [Santamaría, 2017].

Desde el cierre de *Altos Hornos de Vizcaya*, todo el acero producido en la CAPV ha sido en hornos de arco eléctricos, lo que supone 270kg de escorias (EAFS) generadas por persona y año solo a nivel local. Cálculos recientes realizados [Santamaría et al, 2017] estiman en un 1% de la producción mundial es generada en esta región, lo cual da otra idea de la magnitud, esta vez a escala global, del problema.

El proceso del horno eléctrico de arco tiene la siguiente secuencia de operaciones [Palacios et al, 2002]:

- Carga de chatarra
- Fusión
- Oxidación y defosforación
- Calentamiento
- Colada

La fabricación de “acero eléctrico” parte de una carga precalentada que se coloca en la solera del horno. Dicha carga se compone mayoritariamente de chatarra (entre el 50-90%), de prerreducidos de hierro, así como de los materiales formadores de escoria (cal, sílice, magnesia, alúmina), en proporción adecuada para formar la escoria y proteger el revestimiento refractario. La chatarra, junto al carbón de coque, los fundentes y agentes carbonosos (cal y carbón), se transporta en cestas hasta el horno.

El volumen de chatarra necesaria para completar una colada es muy superior al volumen de la cuba del horno por lo que se añaden sucesivas cestas. El proceso de fusión de la chatarra se completa con el soplado del caldo por medio de la lanza de oxígeno, que permite la eliminación del caldo tanto del fósforo, como de otros metales, por oxidación y su posterior conducción hacia la escoria. Además del fósforo, se eliminan también el silicio, el manganeso, el cromo e, inevitablemente, una pequeña cantidad de hierro.

La generación de escoria negra tiene, por lo tanto, lugar tanto en los procesos de fusión como en la defosforación del horno eléctrico de arco. La escoria producida se almacena en acopios a la intemperie, tal y como ilustra la figura 2.4., lo cual va en contra de los conceptos de desarrollo sostenible o de economía circular ya citados.



Figura 2.4: Vertedero de escorias en Zumarraga (Gipuzkoa). Foto: Google maps

Asimismo, y aunque en muchas ocasiones no se mencione de forma explícita, en todas estas ideas subyace también el concepto de sostenibilidad funcional y económica. El objetivo final es que la ventaja medioambiental o social no sea propuesta a costa de diseñar materiales que incorporen subproductos industriales pero que tengan bajas

prestaciones, o sean industrialmente inviables por cuestiones económicas [BlueCons, 2015]. Más al contrario, y suscribiendo las palabras de la Dra. Santamaría, la economía circular es la oportunidad para reinventar la economía siendo más sostenible y competitivo a la vez, con beneficios tanto para las industrias como para los ciudadanos.

### ***2.2.2.- Valorización de escorias para su uso en construcción***

Desde los estudios pioneros de Motz, Geiseler y Koros [Geiseler, 1996; Motz, 2001; Koros, 2003], el uso de escoria de acero en construcción y obra civil ha sido analizado por varias investigaciones. Hoy en día, algunas de estas propuestas se han convertido ya en realidad, utilizándose varios de estos residuos como materias primas en la industria de la construcción [Herrero et al, 2016].

Una gran cantidad de investigación se ha llevado a cabo sobre la escoria de horno de cuchara. Por ejemplo, uso de escoria LFS para la estabilización de suelos arcillosos [Manso, 2013; Ortega-López, 2014], además de como sustitución parcial de la fracción fina en mezclas hidráulicas [Losañez, 2006; Manso, 2009; Rodriguez, 2009; Serjun, 2015; García-Cuadrado, 2017] y bituminosas [Skaf, 2017]. Todas estas actuaciones (mayormente, Tesis Doctorales desarrolladas en universidades españolas) han sido llevadas a cabo desde hace algunos años, con resultados alentadores. Mucha de la investigación también se ha llevado a cabo para desarrollar el uso de este material como una adición activa al cemento Portland, siendo incluido en la norma europea EN-197 [Herrero, 2016; Chi, 2002], lo que daría este material un valor añadido.

En cuanto a la adición de escorias a productos basados en yesos, fuera de los citados trabajos sobre las mezclas de escoria blanca (LFS) en yesos para revestir [Rodríguez, 2013], no ha sido un campo con investigaciones de relevancia hasta el momento.

Los diferentes usos para la construcción y obra civil de las escorias EAFS (negras) también han sido un tema de investigación recurrente en los últimos 20 años. Por ejemplo, para analizar desde su uso como material base para carreteras y ferrocarriles hasta, incluso, valorarlo como medio para el almacenamiento de energía térmica [Ortega-Fernandez, 2015]. Sin embargo, el aspecto primordial de las investigaciones sobre el uso de escoria negra ha sido el de su empleo como árido en mezclas bituminosas [Ameri, 2013; Skaf et al, 2017; Pasetto, 2011] y en mezclas hidráulicas [Manso, 2004; Pellegrino,

2013; Santamaría et al, 2016]. Como resultado, en la actualidad, las propiedades mecánicas y la durabilidad de los hormigones fabricados con esta escoria son relativamente conocidos y han demostrado ser similar, o incluso superiores [Santamaría et al, 2017], a las de los hormigones fabricados con áridos naturales tradicionales.

Las principales desventajas que por lo general se han encontrado, cuando la escoria se reutiliza como árido, son su mayor densidad y peor trabajabilidad. Este último punto, la búsqueda de diseño de mezclas con escorias EAF que iguallen la trabajabilidad de las mezclas convencionales, ha sido el objetivo de las últimas investigaciones llevadas a cabo en este campo [Santamaría, 2017]. Tal como se presentaba en la sección anterior, en el País Vasco todo el acero se produce en hornos de arco eléctrico generando grandes cantidades de escorias negras. Por ello, las muestras ensayadas en la presente Tesis Doctoral se centran en dicho tipo de escorias, tratando de dar otro pequeño paso adelante en la normalización de su uso.

El objetivo global de estos trabajos se resume en la incorporación al ciclo productivo general de los residuos de la industria siderúrgica en forma de insumos, como materias primas de notable valor añadido, dentro de otro sector productivo, altamente consumidor de recursos naturales, como es el de la edificación y obra civil.

Este enfoque impulsará su uso generalizado, lo que llevará a un menor vertido de escorias de acería, convirtiendo, en definitiva, un residuo en un producto de alto valor añadido, según promulgan los enfoques de “economía circular”.

## **2.3.- Acústica en edificación**

### **2.3.1.- Transmisión de ruido en edificios**

El ruido en los edificios, especialmente en las viviendas, es uno de los principales problemas y causas de reclamaciones por parte de sus usuarios. Actualmente el requisito de *“Protección frente el ruido”* que deben cumplir los edificios se regula a través del Documento Básico DB-HR del Código Técnico de la Edificación, como antes quedó indicado. En dicho documento se establece la exigencia de limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios.

La filosofía que subyace en el CTE, siguiendo la tendencia del resto de normativas europeas sobre confort acústico en la edificación, es la de considerar al edificio terminado como un producto. Por lo tanto, las prestaciones acústicas van a exigirse a la vivienda en su conjunto y no a cada uno de sus elementos constructivos (excepto en casos muy puntuales donde la medición in situ no será luego posible). Ello implica la necesidad de realizar en fase de proyecto el cálculo de la transmisión de ruido entre recintos. Por ello, además de las exigencias de aislamiento acústico y de limitación del ruido reverberante, el DB-HR aporta métodos de predicción para dar respuesta a la realidad física del problema, incluyendo la transmisión del sonido por caminos distintos al elemento separador.

El objetivo principal de estos métodos es poder estimar la protección contra el ruido, que un edificio aporta, a partir de las propiedades acústicas de cada uno de los elementos que lo componen, siendo de este modo una herramienta que permite el diseño de edificios más confortables.

Los diferentes modelos de predicción que existen, buscan cuantificar la cantidad de sonido que llega de un recinto a otro, a través de cada uno de los posibles caminos de transmisión (ver figura 2.5). De este modo puede obtenerse el nivel total de ruido transmitido, como la suma de todas las vías de transmisión, e identificar los elementos que, acústicamente, son más débiles. Y, todo lo dicho, a fin de poder actuar sobre ellos, en vez de malgastar recursos tratando de mejorar el aislamiento de elementos, cuya contribución al nivel de ruido recibido es muy pequeña. Este concepto del cálculo de las diversas las transmisiones acústicas (frente a la anterior idea más intuitiva de considerar

sólo el elemento) está todavía permeando en el sector, aún años después de la entrada in vigor del CTE DB-HR.

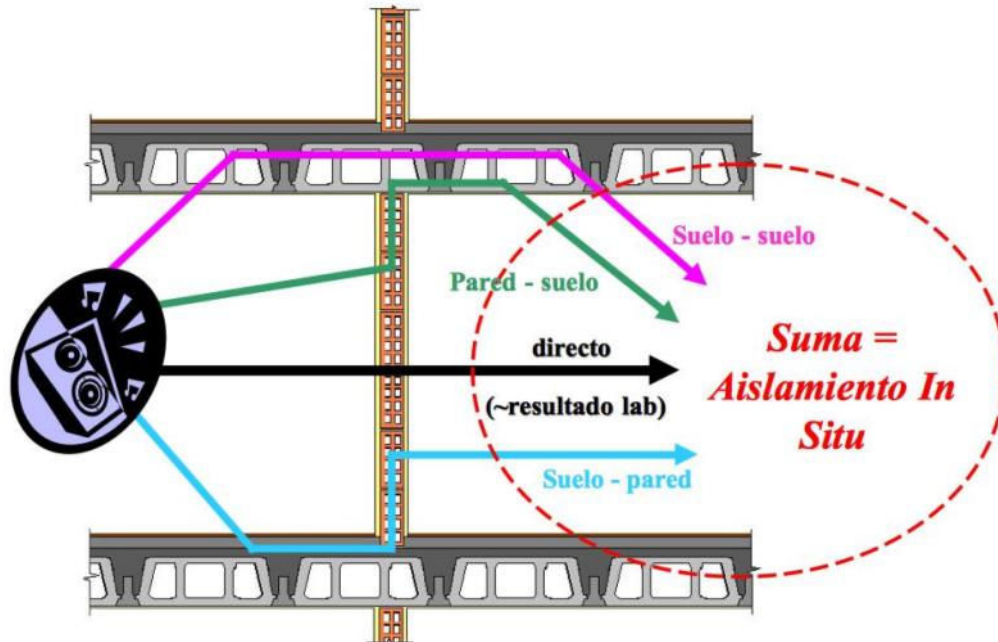


Figura 2.5: Caminos de transmisión del sonido entre recintos adyacentes.

De las diferentes técnicas posibles para abordar este problema, el Análisis Estadístico de Energía (S.E.A. *Statistical Energy Analysis*) es el que se ha impuesto en los grupos de investigación en acústica arquitectónica. Y lo ha hecho al unir en una única teoría los trabajos sobre oscilaciones acopladas y la acústica estadística de salas, formando un marco de trabajo perfectamente integrado en la filosofía ya establecida en otros campos de la acústica, al tratar las vibraciones en las paredes y la presión acústica en las salas de manera estadística [Craik, 1996].

A partir de los modelos S.E.A., más generales y con un ámbito de aplicación más amplio pero de difícil manejo y que usan parámetros poco habituales, mediante una serie de simplificaciones que, entre otras cuestiones, reducen las posibilidades de transmisión a recintos adyacentes (además de usar como datos de entrada los valores de aislamiento medidos en laboratorio), se pasa a los modelos CEN recogidos en la serie de normas EN 12354 [Gerretsen y Nightingale, 1999]. Estos modelos son, a su vez, los recogidos de forma simplificada en el texto del CTE y los de mayor interés por su uso, totalmente generalizado, en el sector. Es decir, para calcular el aislamiento de un edificio se necesita saber el aislamiento en laboratorio de cada uno de sus elementos (además de otros datos relativos a como están unidos entre sí, como se ve en la figura 2.5).

Según la norma [UNE-EN ISO 12354, 2000], el aislamiento entre dos recintos se puede calcular mediante la suma de las contribuciones del aislamiento del elemento separador (transmisión directa) y de los 12 caminos principales de transmisión por elementos de flanco (transmisiones indirectas):

$$R' = -10 \times \log \left[ 10^{\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^4 10^{\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^4 10^{\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^4 10^{\frac{R_{Fd}}{10}} \right] \quad dB \quad (ec.2.1)$$

Donde,

- $R'$  = aislamiento aparente *in situ* entre los dos recintos.
- $R_{Dd}$  = aislamiento del elemento separador.
- $R_{Ff, Df, Fd}$  = aislamiento de cada uno de los caminos indirectos de transmisión del sonido.

En cuanto a métodos de cálculo, la norma presenta dos tipos diferenciados:

- Método simplificado: estima el comportamiento acústico del edificio a través de índices globales de aislamiento en sus soluciones constructivas.
- Método detallado o de ingeniería: los cálculos se realizan por frecuencias de 1/3 de octava y añade otra serie de datos de entrada, como diferencias entre condiciones de contorno laboratorio/obra real, etc.

En ambos casos, el aislamiento de cada camino de transmisión se calcula en función del aislamiento de cada elemento medido en laboratorio, de la atenuación en las juntas de unión entre elementos y de la geometría de los recintos implicados, aunque con diferentes niveles de complejidad (ver figura 2.6):

$$R_{\text{cada camino}} = \underbrace{\text{Aislamiento en laboratorio}} + \underbrace{\text{Atenuación juntas}} + \underbrace{\text{Término de corrección}}$$

Simplificado	Índices globales aislamiento	$K_i$	Geometría
Detallado	Valores en 1/3 de oct corregidos para tener en cuenta las diferentes condiciones de contorno labo / situ	$K_i$ + término de corrección por amortiguamiento materiales (loss factor: $\eta$ )	Geometría

Figura 2.6: Parámetros utilizados en los modelos simplificado y detallado.

El aislamiento de un elemento es, por lo tanto, una de las principales características acústicas de un material o solución constructiva y se caracteriza por el índice de reducción sonora (*sound reduction index, SRI*). En Norteamérica es llamado también “pérdidas por transmisión” (*sound transmission loss, STL*), siendo exactamente el mismo parámetro.



La primera formulación teórica de dicho parámetro fue presentada por Davis y Buckingham en la década de 1920. La primera norma ASTM al respecto, basada en los trabajos de London [London, 1950], data de los 1950s. La base de dicho método ha permanecido invariante a partir de entonces, prevaleciendo en la mayoría de las investigaciones realizadas y dando lugar a normativas como la ISO 140-3, DIN 52210 Parte 312 o ASTM E-90, que son iguales en cuanto al sentido físico, y difieren únicamente en detalles más o menos relevantes sobre la metodología a emplear.

El índice de reducción sonora, cuya magnitud se designa comúnmente como “R” y se expresa en decibelios, se define como diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia sonora  $W_1$  que incide sobre la partición bajo estudio y la potencia sonora  $W_2$  que se transmite a través de la misma. Dicho cociente, denominado coeficiente de transmisión se denota por  $\tau$  (tau):

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.2})$$

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.3})$$

A su vez, para usar el método de cálculo de ingeniería de la EN 12354 dicho valor medido se corrige (en el método de ingeniería) del siguiente modo:

$$R_{situ} = R_{lab} - 10 \times \log \left( \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right) \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.4})$$

con:

- $R_{situ}$  = aislamiento en las condiciones de contorno reales en obra.
- $R_{lab}$  = aislamiento medido en laboratorio.
- $T_{s,situ}$  = tiempo de reverberación estructural (amortiguamiento) en obra.
- $T_{s,lab}$  = tiempo de reverberación estructural en laboratorio.

Es decir, en el modelo detallado, además de utilizar cálculos en frecuencias se realiza una corrección que tiene en cuenta las diferencias entre las condiciones de contorno entre laboratorio y obra real [Schmitz y Fisher, 2001; Esteban *et al*, 2004].

La influencia de las condiciones de contorno del elemento, en el aislamiento medido, es un punto importante que afecta también a la propia metodología de medida en laboratorio. Cuestión ésta que será tratada varias veces a lo largo de la presente Tesis Doctoral.

Volviendo con los términos de la ecuación 2.1, a su vez cada camino indirecto se calcula también a partir de los aislamientos en laboratorio de los elementos correspondientes:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log \frac{S_{separador}}{\sqrt{S_i S_j}} \text{ dB} \quad (ec.2.5)$$

Donde:

- $R_{i,situ}$  ,  $R_{j,situ}$  son los índices de aislamiento in situ de los dos elementos que conforman el camino de transmisión.
- $\Delta R_{i,situ}$  ,  $\Delta R_{j,situ}$  son las mejoras de los índices de aislamiento in situ de los dos elementos que conforman el camino de transmisión conseguidas con capas adicionales (alfombras, trasdosados,...).
- $\overline{D_{v,ij,situ}}$  es el promedio de las Diferencias de Nivel de Velocidad de vibración entre los dos elementos i, j (en las dos direcciones,  $D_{v,ij,situ}$  y  $D_{v,ji,situ}$ ).

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = \frac{D_{v,ij,situ} + D_{v,ji,situ}}{2} \quad \text{dB} \quad (ec.2.6)$$

- $S_i$  = Area del elemento i;  $S_j$  = Area del elemento j ;  $S_s$  = Area del elemento separador.

La diferencia de nivel de velocidad se calcula en cualquier unión en sus dos diferentes direcciones  $i \rightarrow j$  ó  $j \rightarrow i$  mediante la siguiente expresión:

$$D_{v,ij,situ} = K_{ij} - 10 \times \log \frac{I_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} \times a_{j,situ}}} \text{ dB} \quad (ec.2.7)$$

Donde:

- $K_{ij}$  = Índice de Reducción de Vibración en la unión de los elementos i – j.
- $I_{ij}$  = Longitud común en la unión de los elementos i – j.
- $a_{i,situ}$  –  $a_{j,situ}$  = Longitud de absorción equivalente del elemento i (j) in situ.

Por lo tanto, para poder calcular la protección contra el ruido que un edificio ofrece a sus ocupantes, es imprescindible conocer, con la mayor exactitud posible, el aislamiento acústico de cada uno de los cerramientos que lo componen. Sin entrar en el detalle de las limitaciones de dichos modelos o su aplicabilidad a las viviendas del sur de Europa [Cortés y Esteban, 2004], el resultado del cálculo es muy dependiente de los datos

de partida con los que se alimenta el modelo [Esteban, 2005], de forma que un error (tanto de subestimación como de sobreestimación del aislamiento) se refleja de forma directa en el resultado final. Por ello, un valor poco exacto del aislamiento de un material implicará una menor optimización de las soluciones constructivas en el mejor de los casos o, en el peor, que las prestaciones previstas no sean alcanzadas en el edificio construido. Todo ello, con las implicaciones que eso conlleva: las mediciones finales de verificación in situ -obligatorias por ejemplo en la CAPV desde 2017 [Orden 3107 del 15 de junio de 2016]- solo se pueden realizar una vez se ha finalizado la obra, de forma que un incumplimiento normativo supone un problema de difícil y costosa solución.

A su vez, y precisamente por todo ello, tanto desde el punto de vista comercial como de desarrollo de nuevos productos, el aislamiento acústico es un dato de gran interés. Dicho aislamiento acústico puede ser determinado mediante dos formas: estimándolo matemáticamente a partir de otras de sus propiedades físicas y midiéndolo en laboratorio.

### **2.3.2.- Estimación numérica del aislamiento**

Un modo de conocer el aislamiento acústico de un material es mediante el uso de modelos matemáticos recordando que - por definición - son una simplificación de la realidad que busca modelizar el fenómeno físico de la excitación-transmisión-radiación de ruido y vibraciones entre gases y sólidos. Existen múltiples modelos y aproximaciones, aunque no consiguen, a día de hoy, modelizar perfectamente el desarrollo, bien sea a causa de las propias teorías, o bien por la dificultad (sobre todo) de caracterizar algunos de los datos de entrada.

La fórmula más sencilla para estimar el aislamiento acústico a ruido aéreo obvia cualquier parámetro excepto la densidad superficial, donde  $m'$  es la conocida *Ley de masas* que se reflejaba en la norma NBE-CA 88 [NBE-CA 88, 1988] y aún hoy se recoge en el DB-HR.

Existen diversas formulaciones muy similares, ajustadas a veces a partir de regresión de datos experimentales. En frecuencias se suele expresar como:

$$R = 20 \cdot \log (m' \times f) - 43 \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.8})$$

Y para índices globales, el algoritmo de la ley de masa, incluida en el DB HR (Anexo A), es:

$$\begin{array}{ll} m' \leq 150 \text{ kg/m}^2 & R_A = 16,6 \cdot \log m' + 5 \text{ dBA} \\ 150 > m' \text{ kg/m}^2 & R_A = 36,5 \cdot \log m' - 38,5 \text{ dBA} \end{array} \quad (\text{ec.2.9})$$

A partir de este nivel más básico, hay múltiples estudios y fórmulas que han ido buscando mejorar la precisión de las estimaciones en base a analizar más en profundidad el fenómeno físico de la transmisión del sonido.

El modelo de predicción para placas infinitas delgadas más popular fue presentado por Cremer [Cremer, 1942]. Esta teoría incluyó el efecto de la rigidez y el ángulo  $\theta$  de incidencia del sonido. Cremer aplica la ecuación de Paris para calcular el coeficiente de transmisión a incidencia difusa  $\tau_d$  partir de los coeficientes de transmisión dependientes del ángulo individuales y la frecuencia del sonido. En general, el coeficiente de transmisión ( $\tau$ ) es más pequeño a incidencia normal del sonido y se aproxima a la unidad, en incidencia del sonido en la dirección del plano de la placa (aunque en la realidad el ángulo debe ser menor de  $90^\circ$  y en otras teorías se limita a  $80-85^\circ$ ).

La limitación más importante del modelo es no ser directamente aplicable a placas de dimensiones finitas, de forma que la descripción del fenómeno de coincidencia que se presenta no es válida en el caso práctico de paredes reales (debido a que ondas de flexión propagándose libremente no pueden existir en una placa de dimensiones finitas).

El modelo de Cremer se ha aplicado en varios otros modelos que tratan con estructuras más complejas sin que ninguna teoría se haya impuesto sobre el resto. La mayoría de las formulaciones son similares entre si y consisten en refinamientos y/o simplificaciones más o menos acertados de teorías anteriores.

Aún con dicha variedad, como se ve en la tabla 2.1, en general puede afirmarse que las principales magnitudes físicas que controlan la transmisión sonora a través de un elemento simple (de una hoja) son:

- La masa superficial, que es el factor dominante en la transmisión forzada (no-resonante).
- La rigidez a flexión, que determina la frecuencia crítica del panel.
- Las dimensiones de la muestra, que junto a los parámetros anteriores determinan los modos de resonancia más bajos.
- El *loss factor* o factor de pérdidas, que determina la amplitud en la vibración resonante.

Modelo	m'	E	R	$\eta$	$\mu$	h	Largo / alto
Beranek y Work [ ]	X					X	
London [ ]	X	X	X		X	X	
Mulholland et al [ ]	X					X	
Cumming y Mulholland [ ]	X					X	
Price y Crocker [ ]	X	X		X	X	X	X
Donato [ ]	X	X		X	X	X	X
Sharp [ ]	X	X		X	X	X	
Ookura y Saito [ ]	X	X		X	X	X	
Heckl [ ]	X	X		X	X	X	
Gu y Wang [ ]	X	X		X	X	X	
Fahy [ ]	X			X		X	X
Hamda y Tachibana [ ]	X	X				X	
Au y Byrne [ ]	X	X				X	
Davy [ ]	X	X		X	X	X	X

m': masa superficial

E: módulo de Young

R: Resistencia del panel

$\eta$ : Loss factor total

$\mu$ : Coeficiente de Poisson

h: espesor

Tabla 2.1.- Comparación de parámetros necesarios para calcular el aislamiento de un elemento simple en 14 de las teorías más habituales. [Valtteri Hongisto, 2000]

Todas las teorías definen, al menos, dos zonas de la curva de aislamiento en frecuencias, separadas por una frecuencia crítica. La frecuencia crítica es la frecuencia de coincidencia más baja de un panel simple. En esta frecuencia, la longitud de onda del sonido incidente en el aire, y de las ondas libres de flexión que se generan en la placa vibrante, coincide. Este efecto produce un *acoplamiento* que se manifiesta en una importante caída en el aislamiento del elemento a dicha frecuencia.

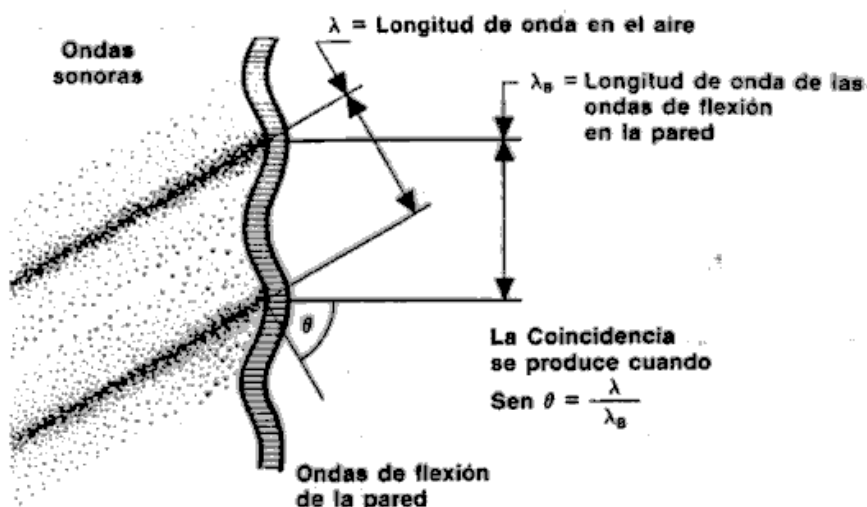


Figura 2.7: Efecto de coincidencia que marca la aparición de la denominada frecuencia crítica Fuente: B&K.

Dicha frecuencia crítica marca la frontera entre los dos mecanismos principales de transmisión del sonido a través de un sólido: vibración resonante y vibración no-resonante. Primeramente, la vibración no-resonante o forzada, determina la transmisión por debajo de la frecuencia crítica. Ésta se denomina la región controlada por la masa, donde la pendiente de la curva de aislamiento es 6 dB/octava. En segundo término, la vibración resonante, en y por encima de la frecuencia crítica, en que la vibración determina el coeficiente de transmisión del sonido y es una región controlada por el amortiguamiento, donde la pendiente de la curva es 9 dB/octava [Cremer, Heckl y Ungar,1973].

Además, en muchas formulaciones teóricas de modelos de predicción se utiliza otro parámetro que se calcula a partir de la frecuencia crítica: la eficiencia de radiación  $\sigma$ . La eficiencia de radiación se define como la relación entre el sonido radiado por un cerramiento, y el que radiaría un émbolo de igual superficie vibrando con la misma velocidad. Su valor determina el flujo de energía que transmite un elemento a un recinto adyacente y es función de la citada frecuencia crítica.

La eficiencia de radiación es prácticamente nula por debajo de la frecuencia crítica, alcanza un máximo a dicha frecuencia y a partir de ella tiende asintóticamente hacia la unidad. Como se ve en el ejemplo de la figura 2.8, se muestra el valor de eficiencia de radiación medido para una pared de ladrillo perforado, con frecuencia crítica igual a 315 Hz y tendencia asintótica posterior.

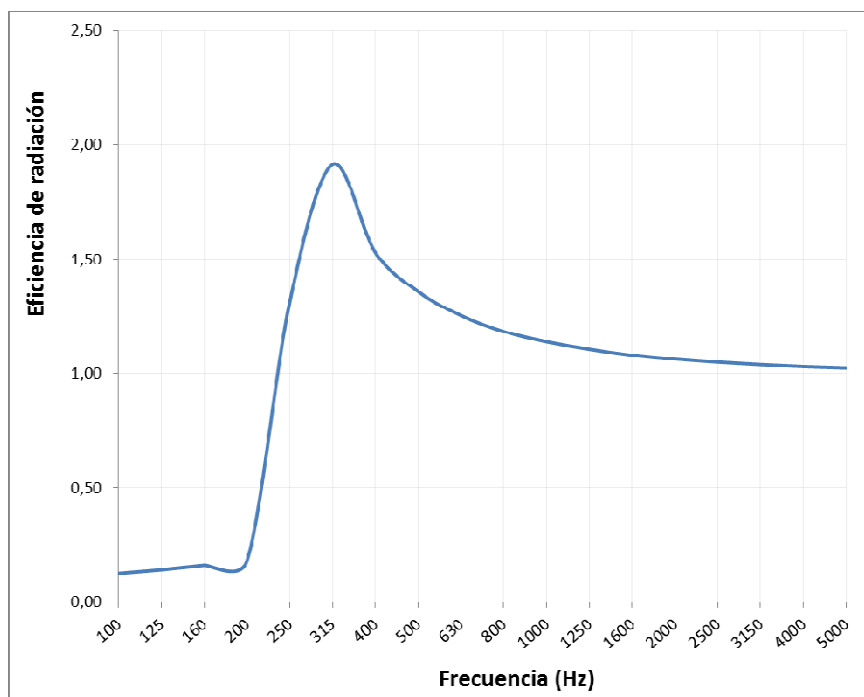


Figura 2.8: eficiencia de radiación medida para una pared de ladrillo.

La vibración resonante se produce también por debajo de la frecuencia crítica, pero la eficiencia de radiación no es significativa ahí (excepto en los modos normales más bajos, donde la radiación puede ser muy fuerte). Entre los modos normales más bajos y la frecuencia crítica, el aire “cortocircuita” la radiación del panel porque la longitud de onda del sonido en el aire es más grande que en la onda de flexión de la placa (ver figura 2.9.).

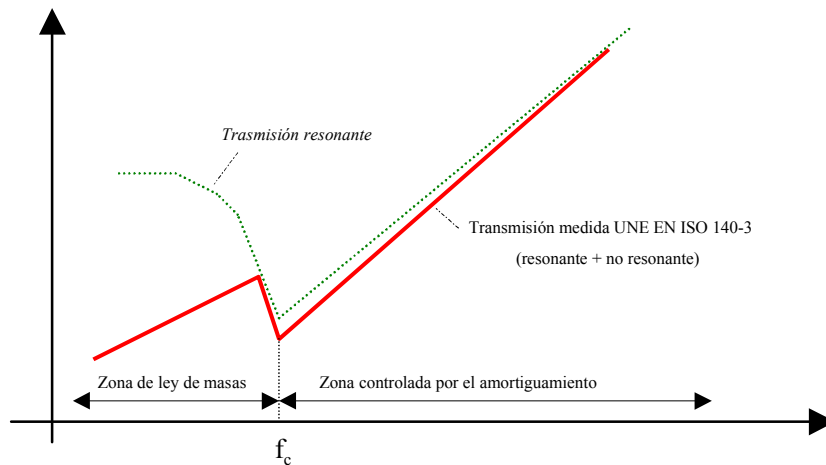


Figura 2.9: Zona controlada por masa y controlada por amortiguamiento, separadas por la frecuencia crítica. Fuente [Esteban- jornadas IETcc]

Por lo tanto, por debajo de esta frecuencia crítica es la masa del paramento el factor físico de mayor relevancia mientras que, por encima de la frecuencia crítica, además de la masa, tiene gran relevancia el amortiguamiento interno del material (o *loss factor*). Es por ello de gran interés el poder situar correctamente dicha frecuencia.

Por último, para paredes monolíticas gruesas, las teorías añaden una tercera zona. Según [Ljunggren,1991], una pared monolítica se considera “acústicamente gruesa” cuando el espesor del panel es mayor que 1/3 a 1/6 de la longitud de onda de flexión. En el caso de paredes gruesas, hay un cambio gradual de ondas de flexión en ondas a cortante a medida que aumenta la frecuencia. Según [Sharp 1973] y [Rindel 1994], las ondas de cortante comienzan a dominar la transmisión del sonido por encima de cierta frecuencia de cruce (resonancias en el espesor).

El amortiguamiento interno o *Loss Factor* ( $\eta$ ) es el parámetro físico que condiciona la transmisión del sonido a través de un cerramiento a frecuencias superiores a la crítica. Se define el *loss factor* como la fracción de energía que un sistema en vibración pierde en cada radián. Esta pérdida de energía puede deberse a tres mecanismos:

- Internamente, en forma de calor (*loss factor* interno o *Internal Loss Factor ILF*)
- A través de cada una de las uniones con los elementos adyacentes (pérdidas por acoplamiento o *Coupling Loss Factor CLF*)
- Radiando en forma de ondas de presión sonora dicha energía al recinto receptor (*Radiation loss factor RLF*)

La suma de todas las pérdidas proporciona el denominado *loss factor total* (*Total Loss Factor TLF*) que se define como:

$$TLF = ILF + \sum CLF + RLF \quad (ec.2.10)$$

El valor del *loss factor* interno es prácticamente constante con la frecuencia y oscila entre 0,01 y 0,02, según cada tipo de material. El valor del *coupling loss factor* depende de la frecuencia y de las condiciones de contorno (tipo de unión) de cada borde, pero puede oscilar entre 0,01 y 0,1 Julios/radián. La energía radiada (RLF) es prácticamente despreciable frente a las dos anteriores y muchas veces se obvia en la ecuación anterior.

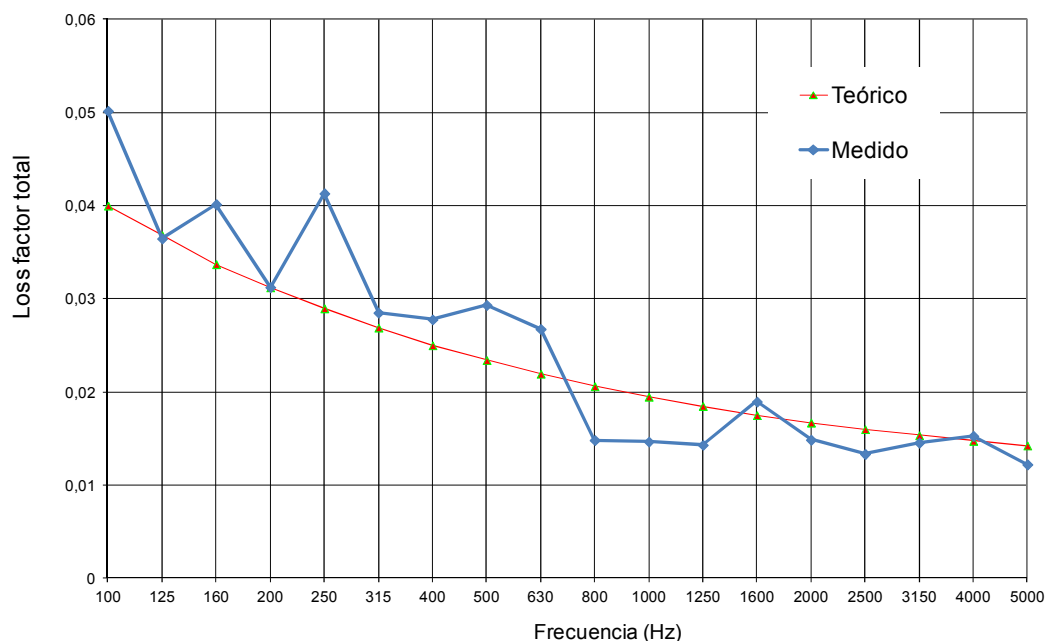


Figura 2.10: *Loss factor total en función de la frecuencia medido y estimado teóricamente. Elaboración propia.*



Expuestos los principales parámetros que afectan al aislamiento acústico, y que son comunes a la gran mayoría de las teorías existentes, una formulación relativamente simple pero que arroja resultados correctos es la aportada por Heckl [Heckl *et al*, 1994]:

$$R = 10 \log \left( \frac{\pi \cdot f \cdot m'}{\rho_0 \cdot C_0} \right)^2 - 3 \quad \text{para } f < f_c \quad (\text{ec.2.11})$$

$$R = 10 \log \left( \frac{\pi \cdot f \cdot m'}{\rho_0 \cdot C_0} \right)^2 - 10 \log \left( \frac{1}{\eta_{tot}} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \right) \quad \text{ara } f > f_c$$

Donde,

- $f$  = frecuencia
- $f_c$  = frecuencia crítica
- $\rho_0$  = densidad del aire en  $\text{kg/m}^3$
- $C_0$  = velocidad del sonido en aire en  $\text{m/s}$
- $m'$  = densidad superficial del elemento en  $\text{Kg/m}^2$
- $\eta_{tot}$  = loss factor total

A dicho modelo habría que añadirle las posibles resonancias en el espesor. Ljunggren sitúa la aparición de dicho fenómeno a frecuencias superiores a:

$$f_{lim} = \frac{C_L}{5 \cdot h} \quad \text{Hz} \quad (\text{ec.2.12})$$

Donde:

- $C_L$  = velocidad de las ondas longitudinales en el sólido, en  $\text{m/s}$
- $h$  = espesor del elemento, en  $\text{m}$

Por encima de dicho límite, las teorías de placas esbeltas no son válidas, y el aislamiento se estanca con la frecuencia a un valor aproximado de:

$$R = 10 \log \left( \frac{\rho \cdot C_L}{4 \cdot \rho_0 \cdot C_0} \right)^2 \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.13})$$

Donde:

- $\rho$  = densidad del material en  $\text{kg/m}^3$

La frecuencia crítica  $f_c$  se puede calcular a partir de la expresión:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{EI}} \quad (\text{ec.2.14})$$

Donde:

- E = módulo de elasticidad
- I = momento de inercia de la sección

Para el caso particular de una sección rectangular (elemento macizo y homogéneo), la ecuación (ec.2.14) adopta la forma:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12m'(1-\mu^2)}{Et^2}} \quad (\text{ec.2.15})$$

Donde:

- $\mu$  = módulo de Poisson
- t = espesor del elemento

En un elemento homogéneo monolítico, la frecuencia crítica está bien definida en una única banda de  $\frac{1}{3}$  de octava, dado que el momento de inercia "I" es igual en todas las direcciones. Sin embargo, en elementos huecos (paredes de bloque/ladrillo, forjados de bovedillas, placas alveolares o corrugadas, etc.), debido a las grandes diferencias en la rigidez ( $E \times I$ ), no se localiza una única frecuencia crítica, sino que se ven afectadas mayores intervalos de frecuencias (Fig. 2.11).

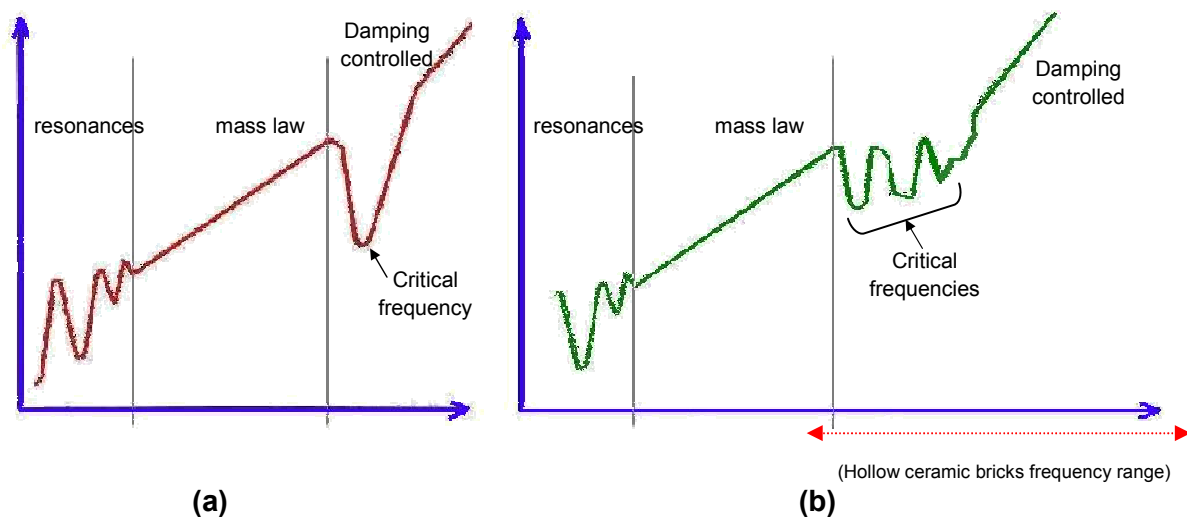


Figura 2.11: Comportamiento de un cerramiento de sección homogénea frente a uno hueco (p.e. una pared de ladrillo). Fuente [Cortés y Esteban, 2003]

La velocidad de las ondas longitudinales en el sólido  $C_L$  está a su vez relacionada con el módulo de Young  $E$  y el coeficiente de Poisson  $\mu$  a través de la siguiente expresión:

$$E = \rho \cdot C_L^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (\text{ec.2.16})$$

De forma que la ecuación 2.14 suele expresarse también de forma habitual en función de  $C_L$ , pudiendo adoptar la ecuación 2.15 una forma tan simple como:

$$f_c = \frac{65742}{C_L \cdot t} \quad (\text{ec.2.17})$$

Donde se ha tomado el valor de la velocidad del sonido en el aire a 20°C, 50% de humedad relativa y a nivel de mar, correspondiente a un valor de 344 m/s.

Como se puede apreciar, el uso de estos modelos - además de su propia precisión- tiene el problema de que, en todo caso, hay que ser capaces de obtener los datos de entrada. Existen tablas de valores típicos, como la que se muestra en la tabla 2.2, que pueden dar una aproximación del orden de magnitud pero que, evidentemente, no son de utilidad a la hora de comparar, por ejemplo, variaciones entre distintos prototipos en el desarrollo de nuevos materiales.

Material	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Quasi-longitudinal phase velocity $c_L$ (m/s)	Internal loss factor $\eta_{int}(-)$
Concrete	2 200	3 800	0,005
Calcium-silicate blocks	1 800	2 500	0,01
Autoclaved aerated concrete blocks	400 - 800	1 900	0,0125
Lightweight aggregate blocks	1 400	2 200	0,01
Dense aggregate blocks	2 000	3 200	0,01
Bricks	1 500 - 2 000	2 700	0,01
Plasterboard (natural gypsum)	860	1 490	0,0141
Plasterboard (flue gas and natural gypsum)	680	1 810	0,0125
Chipboard	760	2 200	0,01

Tabla 2.2: propiedades típicas para materiales de construcción. Fuente: Anexo B –UNE EN ISO 12354-1.

Por lo tanto, aun utilizando estimaciones mediante un modelo matemático del fenómeno físico, es necesario recurrir a ensayos para determinar el valor concreto de los parámetros que afectan al aislamiento y, mientras que algunos pueden ser bastante

directos como la masa o incluso el módulo de Young, otros son más complicados de medir.

Para poder determinar la frecuencia crítica, sería preciso medir la longitud de onda de las ondas libres de flexión en el sólido (*bending waves*). El problema se encuentra en la dificultad de medir dichas ondas, al depender su velocidad de propagación de la frecuencia. Sin embargo, existe un método indirecto para determinar la velocidad de propagación de estas ondas: midiendo la velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

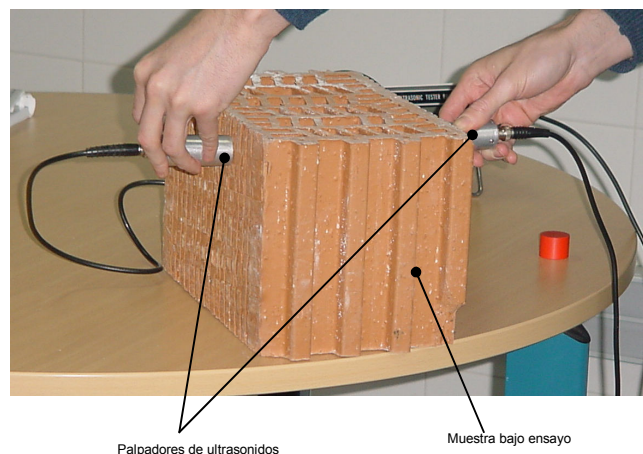
La velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un sólido es constante y, prácticamente, independiente de la frecuencia, de forma que puede medirse el tiempo que tarda una onda de este tipo en propagarse entre dos puntos de medida y, sabiendo la distancia que los separa, calcular la velocidad  $C_L$  del frente de onda. Una vez calculado este valor, la velocidad de propagación de las ondas de flexión  $C_B$  se obtiene de la fórmula:

$$C_B = \sqrt{\frac{C_L \cdot \omega \cdot h}{\sqrt{12}}} \quad \text{m/s} \quad (\text{ec.2.18})$$

Donde:

- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
- $h$  = espesor del cerramiento

Existen diferentes técnicas para realizar la medida descrita. El método más sencillo para medir la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un sólido es empleando un medidor de ultrasonidos, que consiste, básicamente, en dos palpadores de los cuales uno emite pulsos de ultrasonidos que son recogidos por el segundo (ver figura 2.12).



*Fig. 2.12: Colocación de palpadores para medir la velocidad  $C_L$  en un bloque cerámico.*

La superficie de los palpadores ha de estar perfectamente apoyada en las superficies del material a medir. En el caso de materiales no homogéneos (como fábrica hueca) se recomienda hacer medidas en diferentes posiciones, pero no promediar dichos resultados sino obtener todos los posibles valores de  $C_L$ , que luego darán lugar a múltiples valores para la frecuencia crítica (ver figura 2.11).

El método del medidor de ultrasonidos es el más sencillo de utilizar, obteniéndose los resultados en el mismo momento de realizar la medida. Presenta además la ventaja de poder medir tiempos extremadamente cortos (hasta  $10 \mu\text{s}$ ) lo que permite realizar las mediciones sobre muestras de dimensiones reducidas (por ejemplo, directamente sobre un bloque o ladrillo). Por el contrario, en distancias superiores a  $1,5\div 2\text{m}$ , la potencia de los pulsos de ultrasonidos emitidos es insuficiente, lo que dificulta las mediciones sobre paredes reales.

Un segundo método para medir la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un sólido, sin necesidad de disponer de un equipo específicamente diseñado para ello, es mediante el uso de un analizador de espectros de dos canales y dos acelerómetros, excitando mediante un impacto el material a medir.

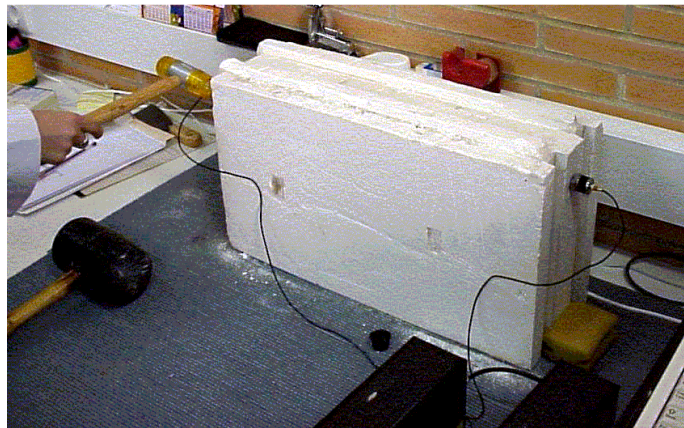


Fig. 2.13: Medida de  $C_L$  mediante el uso de acelerómetros.

El método es igualmente sencillo aunque requiere de un analizador con un tiempo de promediado exponencial de  $1/1024$  segundos, al objeto de poder registrar correctamente los, extremadamente cortos, lapsos de tiempo que tarda la onda en llegar de un acelerómetro a otro. Por ejemplo, en el caso de hormigón ( $C_L \approx 3400$  a  $3800 \text{ m/s}$ ) en una distancia de  $3,6 \text{ m}$  el tiempo a registrar será de una milésima de segundo.

La forma de obtener el *loss factor* es a través de la medida del tiempo de reverberación estructural, que se define como el tiempo que tarda una excitación puntual

ejercida sobre el sistema en caer 60dB. La fórmula que relaciona el tiempo de reverberación estructural con el *loss factor* es:

$$\eta = \frac{2.2}{f \cdot T} \quad \text{J/rad} \quad (\text{ec.2.19})$$

Donde:

- $\eta$  : loss factor.
- $f$  : frecuencia.
- $T$  : tiempo de reverberación estructural.

Una de las técnicas experimentales válidas para medirlo consiste en excitar el elemento mediante un impulso (impacto de martillo) y registrar el tiempo de caída de 60 dB en los niveles de vibración. La dificultad surge al ser los tiempos de caída extremadamente cortos (llegando a ser del orden de 0,03 seg), de forma que la respuesta de los filtros o del detector RMS de un analizador de espectros puede ser mayor que el tiempo de caída. No se puede por lo tanto utilizar equipamiento convencional para la medida del *loss factor*.

Para evitar esta dificultad es preciso disponer de un analizador que permita registrar la señal del acelerómetro en tiempo y procesarla posteriormente (figura 2.14).

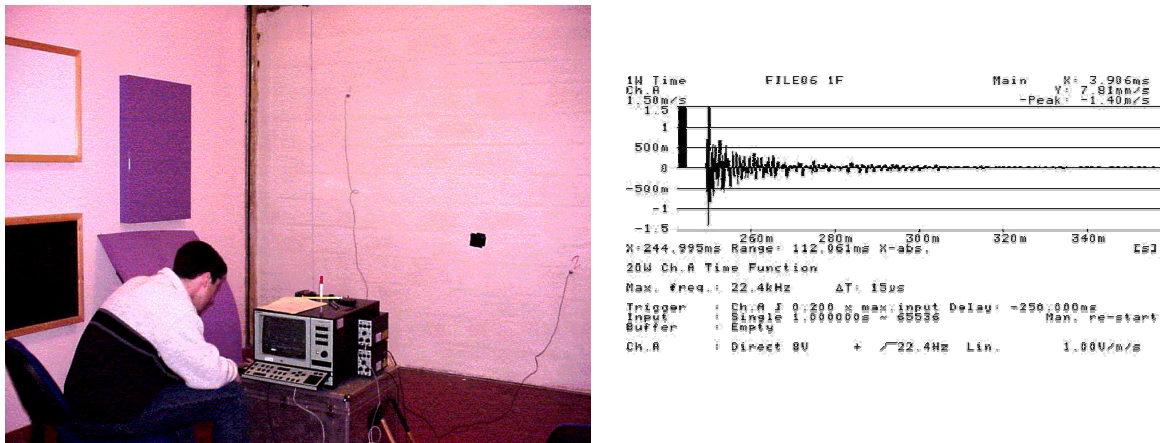


Fig. 2.14: Excitación mediante impacto de martillo para la medida del *loss factor*.

Una vez que se tiene grabada la señal en tiempo se integra, tal y como se haría para obtener el tiempo de reverberación, utilizando una excitación impulsiva pero realizándola desde el final hacia el principio de la señal grabada en tiempo. Esto es debido a que la caída de los filtros es mucho más pronunciada en su parte final que en la inicial.

Una vez que se obtiene la curva de caída integrada y en frecuencias, es necesario calcular el tiempo de caída, seleccionando qué parte de la curva es representativa del parámetro a medir. En condiciones de laboratorio, o con estructuras desconectadas, se encontrarán (especialmente en frecuencias medias-bajas) dos pendientes diferenciadas. Esto es debido a que, si se excita mediante un impacto una pared contenida en una estructura desconectada de su entorno, la energía introducida en el sistema se disipa, en primer lugar, de forma muy rápida (primera pendiente muy pronunciada) al ser estas pérdidas de energía debidas a la disipación interna en forma de calor de la pared (*Internal Loss Factor*), sumadas a las pérdidas que se producen al transmitirse dicha energía a los elementos adyacentes (*Coupling Loss Factor*). Sin embargo (y debido a la desconexión mecánica de dicha estructura) hay un momento en el cual se alcanza un equilibrio dinámico de energías entre el elemento bajo medida y las estructuras colindantes, obteniéndose una caída de pendiente menor al ser la disipación de energía únicamente en forma de calor.

Por consiguiente, en el caso de estructuras mecánicamente desconectadas, si se considera como representativa la primera parte de la caída, se obtendrá el tiempo de reverberación estructural correspondiente al *Total Loss Factor*. Mientras que, si se selecciona la parte de menor pendiente, se estará midiendo el *Internal Loss Factor*.

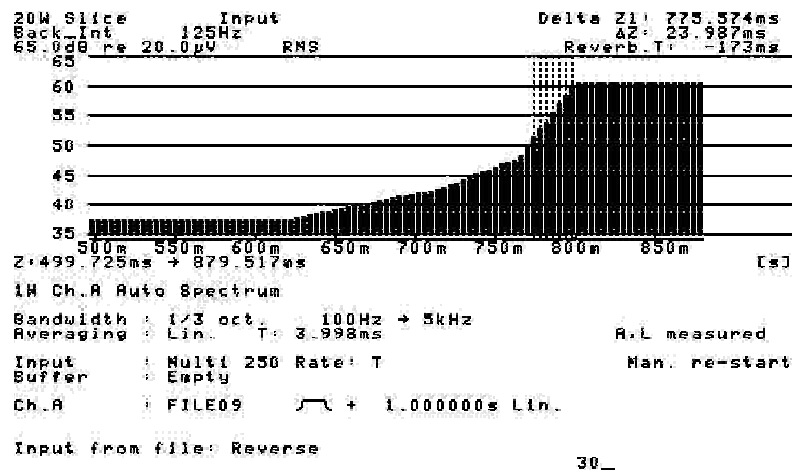


Fig. 2.15: Caída de la vibración estructural, donde se aprecian las dos pendientes en la curva integrada.

En este caso, y a esta frecuencia en particular (125 Hz), se deduce que, aproximadamente, un 20% de la energía sonora que atenúa este elemento separador se disipa internamente en forma de calor, mientras que el 80% restante es transmitido los elementos contiguos.

### 2.3.3.- Medida del aislamiento en laboratorio

La medición de un parámetro en laboratorio es, por definición, mucho más exacta y precisa que cualquier estimación teórica, más a la vista del estado de desarrollo actual de los modelos anteriormente expuestos, así como de las dificultades para medir los parámetros de interés. Por lo tanto, la medida en laboratorio es el método preferido por la fiabilidad de sus resultados para caracterizar acústicamente materiales y sistemas constructivos.

Unas cámaras de transmisión acústica suponen una infraestructura de muy especial construcción. Además de tener que estar aislada del ruido y vibraciones del exterior, deben evitar cualquier transmisión del sonido por una vía diferente al elemento bajo ensayo (que es lo que ocurre in situ, como se ilustra en figura 2.5 del punto 2.3.1.).

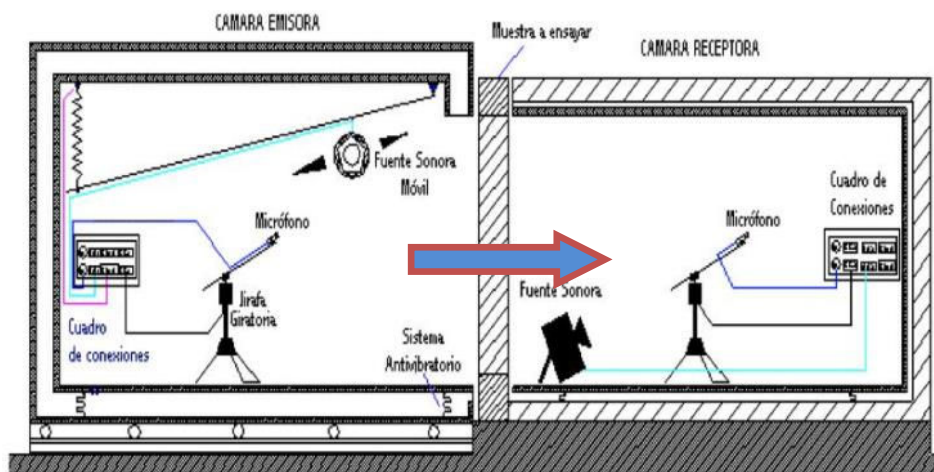


Fig. 2.16: En un laboratorio el sonido sólo se transmite de una cámara a la otra a través del elemento separador. Fuente: LCCE GV

Anteriormente se definía el índice de reducción sonora  $R$  como diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia sonora  $W_1$  que incide sobre una partición y la potencia sonora  $W_2$  que se transmite a través de la misma.

El recinto emisor se supone con un campo acústico perfectamente difuso. Por lo tanto, la potencia sonora incidente puede ser determinada, a partir del promedio de la presión sonora medida en condiciones estacionarias de emisión en el recinto fuente.

$$W_1 = \frac{p_1^2}{4\rho_0 c_0} S \quad (\text{ec.2.20})$$



Donde:

- $p_1$  es el promedio de presión sonora en el recinto emisor
- $S$  superficie de la muestra de ensayo ( $m^2$ )
- $\rho_0$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ )
- $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire ( $m/s$ )

Las condiciones estacionarias citadas se alcanzan cuando la potencia sonora radiada por la muestra de ensayo iguala a la potencia absorbida en el recinto receptor, de forma que la potencia sonora transmitida es:

$$W_2 = \frac{p_2^2}{4\rho_0 c_0} A_2 \quad (ec.2.21)$$

Donde:

- $p_2$  es el promedio de presión sonora en el recinto emisor
- $\rho_0$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ )
- $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire ( $m/s$ )
- $A_2$  es el área de absorción equivalente del recinto receptor ( $m^2$ )

El área de absorción puede obtenerse de forma aproximada a partir de la ecuación de Sabine:

$$A_2 = 0,16 \cdot V_2 / T_2 \quad m^2 \quad (ec.2.22)$$

Donde:

- $V_2$  es el volumen del recinto receptor
- $T_2$  es el tiempo de reverberación en el recinto receptor

La presión sonora  $p$  se determina en la práctica a través de la medida del nivel de presión sonora  $L_p$ .

$$L_p = 10 \cdot \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad dB \quad (ec.2.23)$$

Donde:

- $p$  es la presión sonora considerada
- $p_0$  es la presión sonora de referencia ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa)

El nivel promedio de presión sonora en un recinto se define como diez veces el logaritmo de decimal del cociente entre la media espacio temporal de los cuadrados de las presiones sonoras y el cuadrado de la presión sonora de referencia  $p_0$ . De manera que se toma la medida espacial de todo el recinto, excepto de las zonas donde no se cumpla la condición de difusividad del campo (zonas muy cercanas a la radiación directa de la fuente sonora, o campo próximo de paredes o techos del recinto).



*Fig.2.17: Medida de niveles de presión sonora en las cámaras dl LCCE del GV. La muestra (un muro cortina) permite ver al otro lado la cámara emisora, con la fuente acústica omnidireccional.*

Midiendo la presión sonora en posiciones de micrófono fijas, el nivel promedio  $L$  se expresa como:

$$L = 10 \cdot \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10} \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.24})$$

Donde:

- $L_{pi}$  es el nivel de presión sonora medida en el punto  $i$

Con todo ello, el índice de reducción sonora  $R$  puede ser evaluado, indirectamente, a partir de las medidas de niveles de presión sonora en dos recintos adyacentes (emisor y receptor) según la siguiente expresión:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log S/A \quad \text{dB} \quad (\text{ec.2.25})$$

donde:

- $L_1$  nivel de presión sonora medio en emisor
- $L_2$  nivel de presión sonora medio en receptor
- $S$  área de la muestra
- $A$  área de absorción equivalente del recinto receptor

Esta ecuación presupone que la energía sonora se transmite de un recinto al otro únicamente a través de la muestra de ensayo, así como que no existe radiación de otros cerramientos en el recinto receptor (transmisiones indirectas). Esta es una asunción razonablemente cierta en condiciones de laboratorio (si está bien diseñado) pero no se cumple en absoluto en condiciones reales en un edificio.

El índice de reducción sonora se mide habitualmente en bandas de frecuencia de tercio de octava en un rango entre 100 y 3150 (s/norma ISO) o entre 100 y 5000 Hz (s/normativa CTE DB-HR). No obstante, la proliferación de equipos domésticos de música de gran potencia, home cinemas y similares, ha hecho que se esté considerando ampliar este rango a frecuencias más bajas (desde 50 Hz) en varios países europeos.

Posteriormente, y por razones de practicidad a nivel normativo y comercial, estos 16 o 18 valores obtenidos en tercios de octava se resumen en un *índice de una cifra* como el  $R_w$  de la ISO 717-1 [UNE-EN ISO 717-1:2013] o el  $R(A)$  definido en el CTE DB-HR según el <https://www.codigotecnico.org>.

### **Factores que afectan a la medida**

Como en cualquier tipo de ensayo, el valor medido es una aproximación del valor real. Y aunque el método de los niveles de presión sonora descrito en la ecuación 2.25 es, en principio, bastante simple, obtener unos resultados ciertos implica complejos y estrictos requerimientos para las instalaciones de los laboratorios, así como en la metodología de ensayo, ya que pueden afectar significativamente al resultado. Dichos factores serán, por lo tanto, analizados ahora en detalle a continuación.

[Mulholland y Lyon, 1973] demostraron, de forma experimental y teórica, que el índice de reducción sonora de un panel de placa yeso laminado puede ser negativo debido a la presencia de fuertes modos propios en los recintos a bajas frecuencias (realizando análisis en banda estrecha). La transmisión de sonido en frecuencias bajas, donde la distribución modal no es uniforme, depende fuertemente del acoplamiento entre los modos de las cámaras de transmisión y de la propia muestra de ensayo. A su vez, dicho acoplamiento depende de la geometría de los recintos, ubicación de la muestra y posición de los altavoces.

[Warnock 1982] mostró experimentalmente que, cuando se utilizan varias fuentes sonoras en el recinto emisor, deben ser excitadas con ruidos pseudoaleatorios no correlacionadas. Si existe correlación (por ejemplo, usando la misma señal fuente) la energía sonora no se distribuye correctamente en el recinto emisor, debido a que aparecen patrones de interferencias. Ello implica que es necesario realizar un adecuado muestreo espacial. Este autor investigó también la influencia de la colocación de la muestra en el aislamiento medido para una placa de yeso laminado, tanto en lo referente al tamaño de la muestra de ensayo frente a las dimensiones totales de separación entre recintos, como en lo referente a la posición de la muestra en el marco portamuestras. De sus trabajos se demuestra que, un tamaño de muestra inferior al área común entre

cámaras, puede implicar transmisiones indirectas a través del propio marco, especialmente por debajo de la frecuencia crítica del material. Igualmente, la colocación de la muestra en su marco en el extremo más cercano a la cámara receptora, implica una sobreestimación del aislamiento (efecto nicho).

Posteriormente, Smith [Smith *et al*, 1999] sugirió que el marco donde se ubicaba la muestra era, probablemente, el principal factor que llevaba a valores de reproducibilidad elevados, con los laboratorios con marcos de madera o metal, obteniendo resultados, en promedio de aislamiento acústico, menor que aquellos laboratorios con marcos de hormigón.

[Guy y Sauer, 1984], [Cops y Minten, 1984] y [Hopkins 2007] extendieron asimismo la investigación sobre el efecto nicho, confirmando que posiciones centradas en el marco llevan a medir un aislamiento más bajo, especialmente por debajo de la  $f_c$ .

El efecto del área de la muestra sobre el aislamiento medido ha sido estudiado por [Kihlman y Nilsson, 1972]. La influencia de dicha área se muestra más significativa para la transmisión resonante, por debajo de la frecuencia crítica, donde se localizan los modos principales de bordes y esquinas. Conforme el área aumenta, la transmisión resonante se reduce debido a que disminuye la proporción relativa entre perímetro y superficie. Para la transmisión forzada (no-resonante) el comportamiento opuesto ha sido sugerido por [Sewell, 1970] en el caso de paneles simples.

Por encima de la frecuencia crítica, el índice de reducción sonora no depende del área de la muestra. Sin embargo, los resultados obtenidos por [Michelsen 1983] y [Guy *et al*, 1985] no concuerdan con las teorías previamente expuestas. Por lo tanto, parece que no existe aún una respuesta definitiva a la influencia del área de la muestra y que es algo que, de alguna manera, depende de la estructura del propio elemento. En todo caso, la influencia del área de la muestra detectada es considerablemente menor que la de otros factores (efecto nicho y similares).

[Kruppa y Olesen 1985] mostraron que el índice de reducción sonora depende de las posiciones de altavoz a frecuencias bajas (50-200 Hz). La variación en el índice de reducción sonora podía alcanzar 10 dB entre diferentes posiciones. A partir de ello, [Olesen y Pedersen 1991] estudiaron la influencia de las posiciones de altavoz sobre el aislamiento medido usando análisis modal y experimentación. Llegaron a la conclusión de que la densidad modal no era uniforme en todos los laboratorios debida, sobretudo, al tamaño de las cámaras. La sensibilidad a las posiciones de altavoz depende, por lo tanto, de dichas dimensiones, la absorción de las cámaras, la posición de la muestra (nicho),

dirección de medida y montaje de la muestra. La influencia de ninguno de los factores citados podía además ser tratada separadamente.

El principal resultado del trabajo de Olesen y Pedersen fue un procedimiento para encontrar posiciones de altavoz que, razonablemente, representen el promedio de todas las posiciones posible en el recinto emisor. Habitualmente, dos o tres posiciones de fuentes bien escogidas son suficientes. Dicho procedimiento se recogió posteriormente como anexo en la norma ISO 10140-4 [UNE-EN ISO 10140-4:2011].

[Craik, 1992] investigó teóricamente la influencia de configuraciones habituales de laboratorios de ensayo sobre la medida del aislamiento de una pared de hormigón de 100 mm de espesor, demostrando que el aislamiento depende fuertemente de las condiciones de contorno de la muestra.

Además de las posibles vías de transmisiones indirectas no controladas, el *loss factor* total de la muestra de ensayo depende de las condiciones estructurales de su borde (marco portamuestras).



*Figura 2.18: Muestras para acústica construidas en un marco de hormigón, pendientes ensayo en Lab. Control de Calidad de la Edificación de Gobierno Vasco. Área de Acústica (fuente: Tecnalia)*

La disipación de energía a través de los bordes del marco perimetral (que es el único medio sólido en contacto con la muestra) contribuye de forma relevante al valor de aislamiento medido, dado que es energía que ha recibido la muestra pero que no se radia al recinto receptor.

La figura 2.19, aunque ilustra una situación de obra real, es igualmente aplicable al caso de laboratorio. La energía vibroacústica que llega al elemento divisorio debe conservarse. Una parte de esta energía se disipa internamente en forma de calor, en un valor constante que depende únicamente del amortiguamiento interno del propio material. Por lo tanto, la suma de energía que se emite al recinto receptor, además de la que se transmite a través de los bordes hacia otros elementos, es un valor constante. De ahí que, cuanto mayor sea la energía que se disipe por los bordes (vía el mecanismo correspondiente), menor será la transmitida a la cámara receptora. Y, por lo tanto, el aislamiento medido (relación entre la energía incidente y la transmitida) será mayor. Aclarar en este punto que, al contrario que en la situación real de obra, en el caso particular de un laboratorio sin transmisiones indirectas, la energía que sale por los bordes de la muestra hacia el marco no debería poder llegar a la cámara receptora de ninguna de las maneras, siendo disipada por el resto de la estructura.

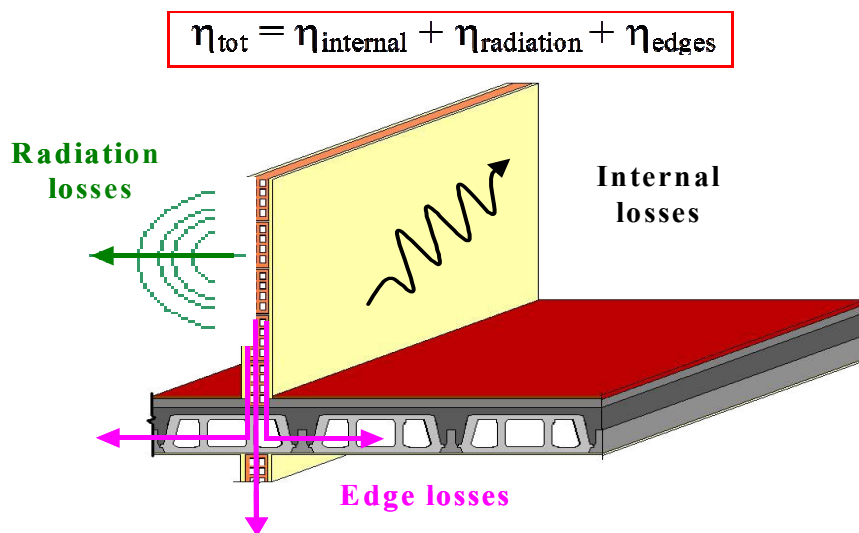


Figura 2.19: Pérdidas por radiación, por bordes e internas.

Craik concluyó que la pregunta correcta, considerando las significativas diferencias que se dan en los resultados de un ensayo interlaboratorios, no es “¿Qué laboratorio da el valor correcto?” sino “¿Qué valor queremos?”. Para evitar estas diferencias, Craik sugirió que el *loss factor* fuese medido sistemáticamente junto al índice de reducción sonora para así permitir la comparación entre resultados de laboratorios con diferentes condiciones de contorno.

Los trabajos de [Meier y Schmitz, 1999] sobre este mismo asunto, ensayando una pared de ladrillo macizo de 100 mm de espesor, con dos configuraciones de contorno diferentes, confirmaron la fuerte influencia que tiene sobre el aislamiento medido. Una unión elástica resultó en valores en promedio 5 dB por debajo de los medidos en el caso

de una unión rígida. Cuando las diferencias en el *loss factor* total fueron tenidas en cuenta, corrigiendo mediante una fórmula el valor de aislamiento obtenido, los valores de aislamiento en ambos casos se mostraron idénticos (por encima de la frecuencia crítica).

La incertidumbre de la medida del aislamiento acústico se determina acorde a la ISO 140-2, y actualmente con la ISO 12999 [UNE-EN ISO 12999-1:2014]. Los valores de reproducibilidad entre laboratorios varían entre 2,5 y 9 dB, dependiendo de la frecuencia. Los valores de repetitividad (un único laboratorio) pueden variar entre 1,5 y 4,5 dB. En ambos casos, la variabilidad es mayor en frecuencias bajas.

Los resultados de un ensayo interlaboratorios con 24 participantes, expuestos por Fausti [Fausti *et al* 1999], muestran resultados de reproducibilidad más altos a los indicados en la ISO 140-2 para frecuencias por encima de 315 Hz. Los aislamientos globales variaron entre 47 y 52 dB para paredes dobles y entre 26 y 29 dB para un panel simple. La exclusión de los laboratorios con marco de madera tampoco mejoró excesivamente el resultado.

Estas grandes diferencias en los interlaboratorios han mostrado que es necesario mejorar la norma ISO 10140-4, tanto estandarizando la posición de las muestras (efecto nicho) como sus condiciones de contorno. Es necesario, por lo tanto, una mayor investigación en este campo.

### **Normas UNE-EN ISO sobre medida del aislamiento acústico**

El procedimiento de medición de aislamiento acústico en laboratorio, está regulado mediante las normas UNE-EN ISO 10140-2, 4 y 5 (antiguas UNE EN ISO 140 1 y 3), proporcionando especificaciones relativas a las instalaciones de laboratorio, los equipos y al procedimiento para la medición del aislamiento acústico de elementos de construcción.

Los requisitos normativos para cámaras de ensayo condicionan las dimensiones mínimas de las mismas y su construcción. Por ejemplo:

- Los volúmenes y correspondientes dimensiones de las dos cámaras no deben ser las mismas.
- La diferencia entre los volúmenes y/o dimensiones lineales debe ser de, al menos, un 10%.
- Los volúmenes de las cámaras de ensayo deben ser de, al menos, 50 m<sup>3</sup>.

- La apertura de ensayo debe estar entre 10 y 20 m<sup>2</sup> con la longitud de la arista más corta no inferior a 2,3 m.
- Las proporciones entre las dimensiones de las cámaras deben elegirse de forma que las frecuencias modales, en las bandas de baja frecuencia, estén separadas tan uniformemente como sea posible. Deben evitarse ondas estacionarias dominantes.

También se deben considerar las distancias contempladas en la norma sobre las posiciones de micrófono y fuentes sonoras:

- Distancia entre posiciones de micrófono: 0,7 m.
- Distancia entre cualquier posición de micrófono y los bordes del recinto: 0,7 m.
- Distancia entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora: 1,0 m.
- Distancia entre cualquier posición de micrófono y la muestra: 1,0 m.
- La distancia entre fuente y muestra y hasta cualquier micrófono no será menor de:

$$d_{\min} = 0,1 (V / \pi T)^{1/2} \quad (\text{ec.2.26})$$

donde:

- V es el volumen del recinto, en metros cúbicos,
  - T es el tiempo de reverberación, en segundos.
- 
- Deberán existir, al menos, dos posiciones de fuente separadas al menos 1,4 m.
  - La distancia entre bordes recinto y centro de la fuente no será menor que 0,7m.
  - Las posiciones de altavoz no serán simétricas respecto a los ejes o planos centrales del recinto emisor.
  - Las diferentes posiciones de altavoz no deben situarse en el mismo plano paralelo a las paredes del recinto. La distancia mínima entre planos será de 0,1 m.

Las cámaras deben diseñarse de forma que en su interior se cree un campo lo más difuso posible. Un campo difuso, es el campo acústico en el que un gran número de ondas reflejadas, provenientes de todas direcciones, se combinan de forma que la densidad media de energía es uniforme en cualquier punto de dicho campo. La distribución de la energía acústica es homogénea e isotrópica en cualquier instante y punto del mismo. Esta circunstancia se puede comprobar generando *ruido rosa* o *blanco* en la cámara y tomando medidas en todas las bandas de frecuencia de interés, según varios puntos distribuidos uniformemente en la cámara. Este proceso se repite para varias posiciones de fuente sonora, comprobando que no existen grandes variaciones del nivel de presión



sonora entre las distintas posiciones de micrófono, tal y como se recomienda en la ISO 140-14 [UNE-EN ISO 140-14:2005/AC:2009].

Mayor será la difusividad obtenida, cuanto más difusamente se refleja el sonido (la reflexión difusa supone que la intensidad incidente se dispersa en todas direcciones) y cuanto menor es la absorción; esto es, cuanto más tiempo están rebotando las ondas en las distintas superficies.

Además, en el diseño debe tenerse en cuenta que las proporciones entre las dimensiones de las cámaras deben ser tales que los modos propios en las bandas de baja frecuencia estén separados tan uniformemente como sea posible.

Estos modos son las frecuencias propias o naturales que caracterizan un recinto, para las que la onda acústica produce un perfil de onda estacionaria donde se pueden encontrar máximos y mínimos de presión sonora. Las ondas estacionarias se forman debido a la interferencia de dos ondas coherentes: la onda incidente (que proviene de la fuente sonora) y la onda reflejada en las superficies límite del recinto (que proviene de la pared, suelo o techo). De este modo, la interferencia de las dos ondas, incidente y reflejada, origina un perfil de onda estacionaria, con máximos y mínimos distribuidos a lo largo del camino recorrido, los cuales están separados entre sí una distancia igual a  $\lambda/2$ , tal y como se aprecia en la figura 2.20, donde se representa el perfil de ondas estacionarias de distinta frecuencia.

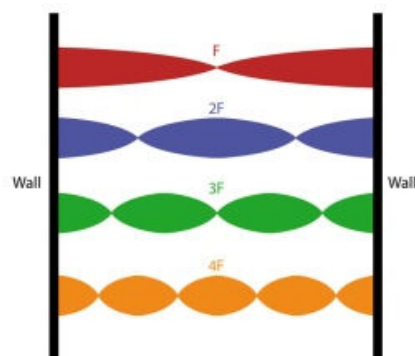


Figura 2.20: Ondas estacionarias.

Teniendo en cuenta la forma en que las ondas estacionarias son generadas, puede distinguirse entre modo axial (el formado como resultado de una onda estacionaria fluctuante entre 2 superficies paralelas), tangencial (entre 4 superficies) u oblicuo (entre 6 superficies), tal y como se ilustra en la figura 2.21. Los modos axiales son los de mayor importancia. Los modos tangenciales tienen aproximadamente la mitad de energía que los axiales (-3 dB). Los modos oblicuos rara vez son relevantes, al ser aproximadamente un cuarto de los modos axiales y la mitad de los modos tangenciales (-6 dB).

Resaltar asimismo que siempre hay presión sonora máxima en las paredes (antinodos), de modo que deben obviarse mediciones muy cerca de los cerramientos del recinto.

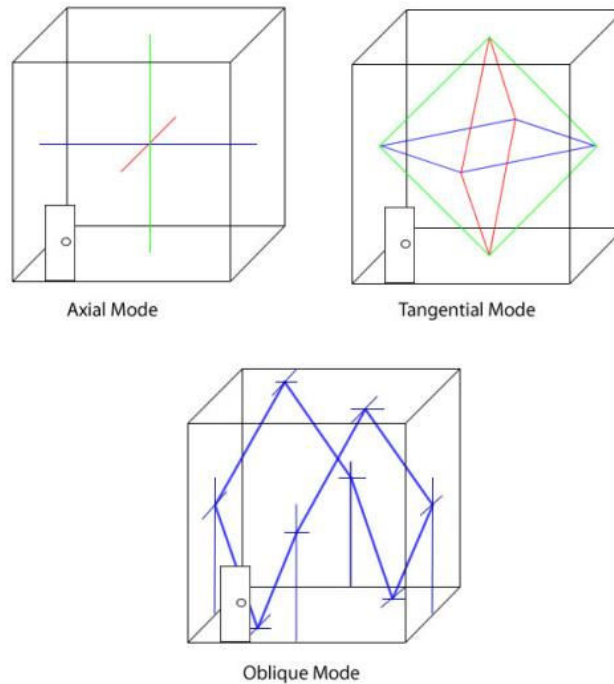


Figura 2.21: Modos axiales, tangenciales y oblicuos (fuente: <http://www.sengpielaudio.com>).

La densidad de modos propios dentro de un espacio aumenta conforme lo hace la frecuencia. Por consiguiente, a partir de una frecuencia (denominada frecuencia límite), la concentración de modos propios es tal, que se obtiene una respuesta en frecuencia de la sala cuyo espectro es prácticamente plano. Para hallar la frecuencia límite, a partir de la cual los modos propios no tienen una influencia en la respuesta en frecuencia de la sala, se emplea la expresión:

$$f_{lim} = 1849 \cdot \sqrt{\frac{T_{med}}{V}} \quad \text{Hz} \quad (\text{ec.2.27})$$

donde:

- $T_{med}$  es el tiempo de reverberación medio, en segundos.
- $V$  es el volumen de la sala, en  $\text{m}^3$ .

De esta expresión se deduce que la incidencia de los modos propios en un determinado recinto es inversamente proporcional a sus dimensiones. Por lo tanto, cuanto mayor sea el volumen de la sala emisora, menor será el efecto negativo de los modos propios en la respuesta en frecuencia de la misma.

El tiempo de reverberación en el interior de las cámaras debe cumplir que:

$$1 < T < 2 \cdot (V / 50)^{2/3}$$

Donde:

- V es el volumen de la cámara en metros cúbicos.
- T es el tiempo de reverberación en segundos.

El aislamiento acústico exterior de las cámaras debe ser el suficiente, de modo que se cumpla que el nivel de ruido de fondo en la cámara receptora sea lo bastante bajo como para permitir la medición del sonido transmitido desde la cámara emisora, teniendo en cuenta el aislamiento acústico de la muestra.

Es recomendable que en la cámara receptora el nivel sonoro transmitido esté, al menos, 15 dB por encima del ruido de fondo en todas las bandas de frecuencia, y siempre por encima de 6 dB. Ese ruido de fondo puede provenir del ruido que sale al exterior desde la cámara emisora y que entra desde el exterior a la cámara receptora. Para ello, las cámaras, tanto la emisora como la receptora, deben tener el suficiente aislamiento acústico respecto al exterior, al objeto de evitar que los niveles sonoros transmitidos al exterior, desde la cámara emisora, no influyan en los que llegan al interior de la cámara receptora a través de la muestra.

El sonido transmitido entre cámaras por vías indirectas debe ser despreciable frente al transmitido a través de las muestras. Para poder asegurar la eliminación de transmisiones por vías indirectas se deben evaluar dos factores:

- La estanqueidad del conjunto cámara emisora – muestra – cámara receptora.
- La eliminación de conexiones rígidas del conjunto cámara emisora – muestra – cámara receptora.

Para comprobar la estanqueidad, un método simple de comprobación consiste en colocar una luz en una de las cámaras y verificar, si hacia el exterior, en las uniones con la muestra o en la otra cámara, puede observarse dicha luz.

Para evaluar si puede haber transmisiones indirectas por la rigidez de las conexiones del conjunto cámara emisora – muestra – cámara receptora, pueden realizarse medidas de niveles de vibración comprobando, por ejemplo hasta qué punto un impacto con martillo de goma en la cámara emisora, o en la muestra, se transmite o no a la cámara receptora. Otra forma indirecta de comprobación es la evaluación del

máximo aislamiento acústico que se puede medir en las cámaras. Para ello, se ensaya una muestra compuesta por un cerramiento de gran masa, el cual se trasdosa por ambas caras. Se añaden trasdosados hasta el momento en que se constate que el aislamiento medido ya no aumenta. En ese momento, el valor del aislamiento obtenido será el valor del  $R'_{\max}$  de las cámaras y puede afirmarse que ya hay existencia de transmisiones indirectas.

### 2.3.4.- Modelos a escala en acústica

Como ha sido puesto de manifiesto, desde el punto de vista de un fabricante o desarrollador de un producto, el ensayo en laboratorio, aunque mucho más preciso que una estimación matemática, es una opción mucho más costosa debido al tamaño de las muestras necesarias, de unas dimensiones mínimas de  $10 \text{ m}^2$ , con lo cual la fabricación de probetas se complica por la gran cantidad de material necesario para las pruebas y los costes de construcción y demolición de las muestras.

En este sentido, el uso de modelos a escala para la medida del aislamiento acústico a ruido aéreo presenta grandes ventajas, en cuanto a practicidad, respecto a la escala real [Toutong, 2006]. Por ejemplo, asumiendo una escala de 1:10, unas cámaras necesitan únicamente una milésima parte del volumen de material y espacio que la escala 1:1. Por lo tanto, la experimentación se abarata y simplifica enormemente.

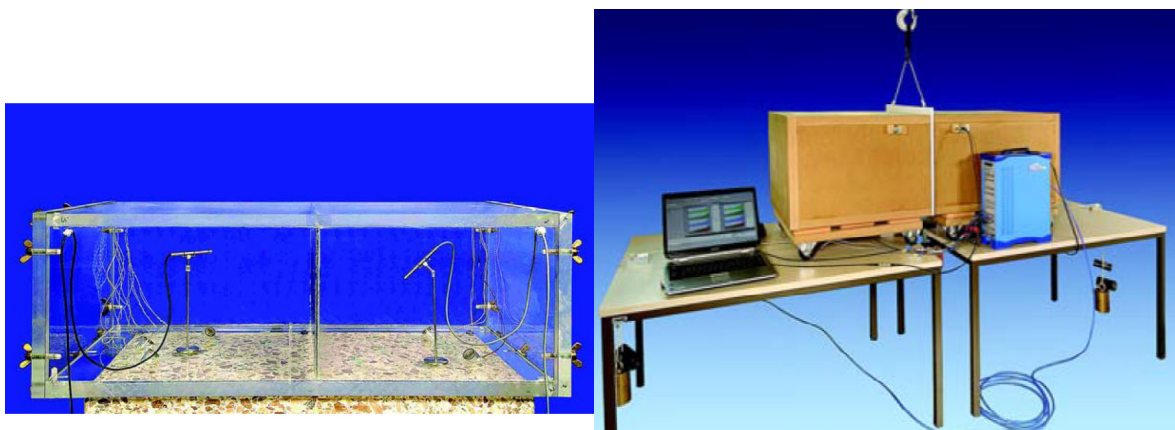


Figura 2.22: Modelo de vidrio acrílico para estudiar los efectos de amortiguación (izquierda) y la influencia de la densidad modal en el aislamiento acústico (derecha). Fuente PTB.

No obstante, la complejidad del diseño de cualquier laboratorio (a escala o no), la dificultad de realizar un correcto escalado de los parámetros que influyen en la transmisión del sonido o las limitaciones a la hora de ensayar soluciones constructivas complejas (cerramientos de entramado autoportante, ladrillos huecos, etc.) ha hecho

que, en la práctica, el uso de modelos a escala haya sido extensivamente utilizado en acústica arquitectónica para modelar recintos singulares (auditorios y salas de conciertos), ver figura 2.23, incluso hasta fechas recientes cuando el desarrollo de los softwares de simulación de recintos ofrecen ya resultados fiables.



Figura 2.23: Modelo a escala de un auditorio. Fuente: Bridget Shield, Trevor Cox 1999/2000. University of Salford.

A la hora de realizar un escalado físico, se debe garantizar que los procesos sean equivalentes en el modelo y en el original (escala real). Kling [Kling 2008] estudió en detalle este aspecto, aunque más orientado hacia el análisis de la influencia de las condiciones de contorno en el aislamiento medido. A este respecto, dos procesos físicos se dice que son similares entre sí cuando las invariantes específicas tienen el mismo valor. La invariante principal en acústica es el número de Helmholtz [Költzsch, 1995], que se define como la proporción de una longitud  $L$  y la longitud de onda  $\lambda$ . Por lo tanto, es una cantidad adimensional:

$$H_e = \frac{L}{\lambda} \quad (\text{ec.2.28})$$

El factor de escala  $n$  se define como la relación entre una longitud  $L_o$  en el original, y su equivalente en  $L_m$  en el modelo (se utilizarán los subíndices “o” y “m” a partir de ahora para referirse a ambos). Una longitud en el modelo es  $n$ -veces más pequeña que en el original:

$$n = \frac{L_o}{L_m} \quad (\text{ec.2.29})$$

Como el número de Helmholtz debe ser el mismo para el modelo y para el original, la longitud de onda (aplicable a cualquier tipo de onda) se escala como:

$$\lambda_m = \frac{1}{n} \cdot \lambda_o \quad (ec.2.30)$$

Tanto en el modelo como en el original, las ondas de presión sonora se propagan por el aire. Como la velocidad del sonido en el aire depende únicamente de la temperatura, es invariante con el escalado. Utilizando la conocida ecuación:

$$c = \lambda \cdot f \quad (ec.2.31)$$

Se deduce que la frecuencia se escala también por el factor  $n$ :

$$f_m = n \cdot f_o \quad (ec.2.32)$$

Sin embargo, en el fenómeno de la transmisión del sonido no sólo el campo acústico en el aire ha de ser considerado: la propagación en sólidos y la transición aire/sólido han de ser igualmente tenidos en cuenta. Se relaciona nuevamente con el número de Helmholtz la longitud de onda en el sólido y la longitud de onda en el aire de la siguiente forma:

$$H_e = \frac{\lambda_{sólido}}{\lambda_{aire}} \quad (ec.2.33)$$

Como la relación entre las longitudes de onda es invariante, el cambio de propagación por un cambio en el medio debe ser el mismo en el modelo que en el original. La ecuación anterior se puede expresar también como relación entre velocidades de propagación en el sólido y en el aire, llegándose a:

$$c_{sólido,m} = c_{sólido,o} \quad (ec.2.34)$$

Igualmente, dado que la frecuencia de coincidencia se define como el punto donde se igualan las longitudes de onda aérea y de flexión en la placa, aplicando la ecuación anterior, la frecuencia de coincidencia se escala igual que el resto de frecuencias:

$$f_{cm} = n \cdot f_{co} \quad (ec.2.35)$$

Se analizarán ahora los términos de la ecuación anterior de la ecuación 2.25, vista en el apartado sobre la estimación teórica del aislamiento (2.3.2), en función de los parámetros que le afectan. La primera parte de la ecuación, correspondiente a frecuencias por debajo de la crítica, permanece igualmente válida en el modelo, al anularse el escalado de la frecuencia, con el de la densidad superficial  $m'$  ( $= \rho \times h$ ), siendo el resto de parámetros (densidades, velocidad del sonido en el aire, etc.) invariantes.

La segunda línea de la ecuación, además de un cociente entre frecuencia y frecuencia crítica (que se anula también), incluye asimismo el término de *loss factor*. Como ya se ha explicado, este término consta de tres partes: *loss factor* interno (invariante), por radiación y por acoplamiento con otras estructuras. El *loss factor* de radiación es [Craik, 1996]:

$$\eta_{rad} = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot \sigma}{\pi \cdot f \cdot m'} \quad (ec.2.36)$$

Al anularse el escalado de la frecuencia con el de la densidad superficial y, siendo el resto de parámetros invariantes, las pérdidas por radiación en el modelo son iguales a las del elemento original.

Las pérdidas por acoplamiento con otras estructuras dependen del tipo de unión entre la muestra y los bordes ( $\tau_{ij}$  en la siguiente ecuación), y para uniones rígidas sólo depende de la relación de las masas de dichos elementos (que es la misma en el modelo y en la escala original). Las pérdidas por el acoplamiento entre una placa  $i$  con otra  $j$ , pueden expresarse mediante:

$$\eta_{acopl} = \frac{c_0 \cdot L_{ij} \cdot \tau_{ij}}{\pi^2 \cdot S_j \sqrt{f \cdot f_c}} \quad (ec.2.37)$$

Donde.:

- $L_{ij}$  es la longitud común, 1
- $S_j$  la superficie de la placa  $j$
- $\tau_{ij}$  el coeficiente de transmisión.

Por lo tanto, el factor de pérdida de acoplamiento es además invariante. Siéndolo también los otros dos factores, se puede concluir que el *loss factor* total es igual en el modelo original y en el escalado.

De todo lo anterior, se deduce que para todo el rango de frecuencias se cumple que:

$$[R(f_m)]_m = [R(f_o)]_o \quad (ec.2.88)$$

Y por lo tanto, se pueden realizar comparaciones directas entre las curvas obtenidas en el modelo y las medidas a escala original si el eje de frecuencias del modelo se reemplaza por el de la frecuencia original, o viceversa.

### **2.3.5.- Ruido de impactos y reciprocidad**

Hasta el momento se ha tratado en la presente Tesis Doctoral el fenómeno de la transmisión aérea del sonido; esto es, el sonido se genera en una fuente (voces, sistemas de sonido, etc...), se transmite por el aire en forma de onda de presión y es esta onda sonora, incidiendo contra los cerramientos sólidos, la que provoca la excitación de los mismos y por tanto la transmisión a otro recinto.

Sin embargo, en acústica de edificios, la transmisión estructural o ruido de impacto es igualmente importante. En dicho caso, la excitación de los cerramientos es directamente originada por percusiones o choques entre sólidos (por ejemplo: una pisada sobre un forjado). Este impacto hace entrar en vibración al cerramiento que, a su vez, provoca ondas sonoras en el aire del local receptor, de forma análoga al caso de ruido aéreo. De hecho, estrictamente, el fenómeno físico es el mismo con la salvedad del tipo de excitación existente en cada caso.

La medida del aislamiento a ruido de impactos está igualmente normalizada [UNE-EN ISO 10140-2 y 3] y consiste, descrito de forma muy somera, en medir el nivel de presión sonora que genera (habitualmente en el recinto inferior) una máquina normalizada de impactos, la cual dispone de 5 martillos que golpean el suelo con una fuerza y frecuencia determinada (ver figura 2.24).



Figura 2.24: Máquina de impactos (sin carcasa para mostrar el sistema de martillos), sobre un suelo de baldosa.



Por lo tanto, al contrario que en el caso del ruido aéreo, cuanto más bajo sea el nivel de “aislamiento” medido, mayor será la protección frente al ruido de impactos. El aislamiento a ruido de impactos se denomina  $L_n$  y es función de la frecuencia. Al igual que en el caso de ruido aéreo, los valores obtenidos en frecuencias se pueden reducir a un índice de una sola cifra,  $L_{n,w}$  en este caso, para simplificar con propósitos normativos o comerciales.

Asimismo, igual que se ha descrito para el caso de ruido aéreo en la sección 2.3.1, en el ruido de impactos también se dan transmisiones indirectas y es necesario realizar sus cálculos para garantizar el confort del edificio. Un modelo de cálculo se recoge en la norma UNE-EN ISO 12354-2 y, al igual que la parte de ruido aéreo, emplea como datos de entrada los aislamientos a ruido de impactos medidos en laboratorio, por lo que dicho valor es también de alto interés.

El realizar ensayos de ruido de impactos en modelos a escala resulta inviable, a causa de la elevada complejidad de construir una máquina de impactos normalizada, que cumpla las especificaciones de la real pero a tamaño reducido. Sin embargo, es posible obtener dicho valor de forma indirecta.

Como se ha referido anteriormente, el fenómeno físico, tanto para ruido aéreo como de impacto, es esencialmente el mismo, excepto por la fuente de excitación. Existe, por lo tanto, una relación entre el índice de reducción acústica y el nivel de presión sonora de impactos normalizados mediante la denominada *ley de reciprocidad*, postulada ya de forma general para acústica por Lord Rayleigh en 1873 [Rayleigh 1873].

Aplicada al caso de ruido aéreo/impacto [Heckl 1963] y [Cremer *et al*, 1988], dicha ley, establece que para elementos homogéneos la suma del índice de reducción acústica  $R$  y el nivel de presión sonora de impacto normalizado  $L_n$  es una constante que depende únicamente de la frecuencia, siendo válida para transmisión resonante (esto es: por encima de la frecuencia crítica). En laboratorio, la relación de reciprocidad en bandas de frecuencia de tercio de octava sigue la expresión:

$$R + L_n = 38 + 30 \cdot \log(f) \quad (ec.2.39.)$$

Un valor global ponderado se puede deducir de la ecuación anterior, quedando:

$$R_w + L_{n,w} = 131 \pm 2 \quad (ec.2.40.)$$

Dicha ecuación se cumple de forma satisfactoria, como puede verse en la figura 2.25, que recoge los resultados de los índices globales de aislamiento a ruido aéreo y de impactos de losas de hormigón, con diferentes espesores, junto a su suma que se mantiene constante.

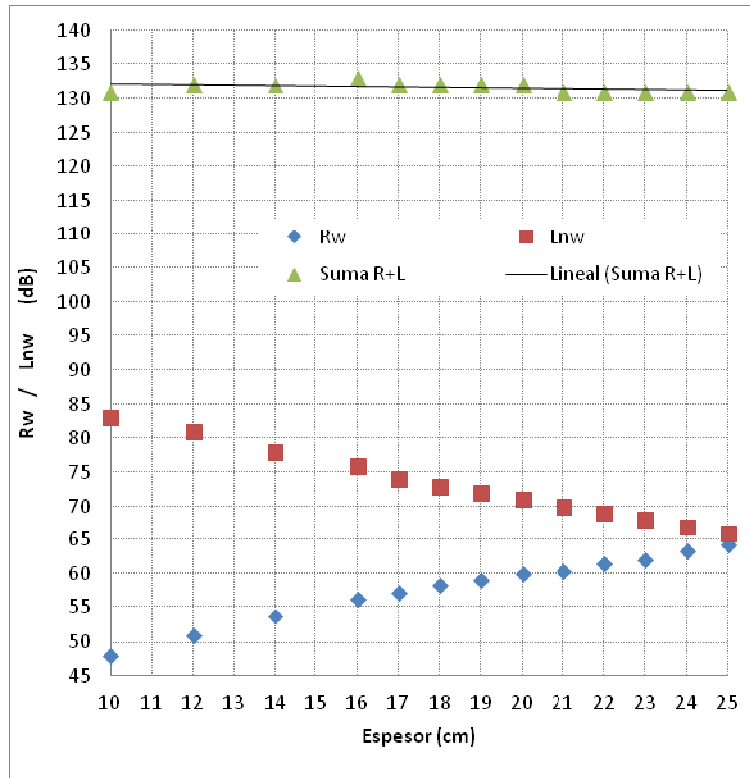


Figura 2.25: Comprobación experimental del cumplimiento de la Ley de Reciprocidad.

Por lo tanto, aun no siendo posible medir el aislamiento a ruido de impactos de manera directa mediante modelos a escala, la ley de reciprocidad nos permite estimar correctamente dicho valor.

## 2.4. Conclusiones

El hipersector de la construcción tiene un volumen de negocio que varía cíclicamente en función de otros factores macroeconómicos. Una vez superada la última gran crisis económica, las perspectivas de crecimiento del sector, tanto en edificación como en obra civil, son moderadas pero positivas a corto-medio plazo.

La construcción tiene un impacto fundamental, no solo en el desarrollo económico de cualquier país, sino también a nivel ambiental, tanto por la explotación de materias primas que requiere, como por las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por su actividad. En este sentido, las innovaciones asociadas al concepto de Economía Circular en el sector. Cuestión ésta que busca maximizar la utilidad de cualquier elemento, incorporando subproductos de otras actividades como materias primas de alto valor añadido. Todo lo cual supone una clara oportunidad de mejora competitiva para las empresas, a la vez que se responde a la demanda social de respeto al medio ambiente y desarrollo sostenible.

Dentro de los citados subproductos, las escorias de acería, y más concretamente las escoras negras provenientes de hornos de arco eléctrico ("negras" resultante de la fusión de la chatarra), son generadas en grandes cantidades por la industria del acero en la CAPV. Estudios previos han mostrado la viabilidad de su incorporación como áridos en mezclas de hormigón. En el momento actual, las investigaciones realizadas han demostrado que por prestaciones mecánicas y de trabajabilidad son ya un sustituto válido para los áridos naturales, lo cual evitaría los impactos asociados a su extracción a la vez que solucionaría los problemas de residuos que actualmente presentan estos subproductos. No obstante, otras prestaciones como su comportamiento frente al ruido están aún pendiente de caracterizar.

Enlazando con ello, la creciente sensibilidad social hacia el problema de la contaminación acústica hace que las normativas al respecto sean cada vez más exigentes. Ello afecta, por supuesto también, a la construcción de edificios, cuyo aislamiento acústico puede calcularse a partir de los datos de aislamiento de los elementos que lo componen. Por lo tanto, este es un parámetro crucial que hay que conocer para cualquier material de construcción que desee introducirse en el mercado.

El aislamiento acústico de un material puede estimarse teóricamente, aunque tanto el desarrollo de las teorías físicas sobre la transmisión del sonido, como la dificultad para caracterizar muchos de los datos de entrada necesarios en los modelos, relegan esta

vía a un segundo plano, frente a estrategias que emplean una medida directa del aislamiento en un laboratorio.

Por su parte, los laboratorios de medida de transmisión acústica son instalaciones complejas que presentan, además, un hándicap a la hora de la investigación para el desarrollo de materiales: las dimensiones de las muestras, de  $10\text{m}^2$  en adelante. Cuestión ésta que dificulta y encarece las pruebas experimentales.

La realización de ensayos a escala solventaría dicho problema aunque, a la fecha, no ha sido apenas utilizada en investigaciones publicadas. Cuestiones éstas producto de las diversas razones relativas a, primeramente, la complejidad que implican unas cámaras acústicas y, en segundo término, a causa de la dificultad para obtener resultados fiables y comparables,.



# Capítulo 3

## *Escalado experimental y su propuesta metodológica de medida*



### 3.1.- Introducción

Como se ha visto en el capítulo anterior, la exactitud de los modelos físicos actuales en el campo de la transmisión acústica está por debajo de la que se obtiene ensayando en laboratorio. Ello es así, tanto por el aún insuficiente desarrollo de los propios modelos, como por la dificultad de medir o estimar con suficiente precisión algunos parámetros de entrada, como el amortiguamiento interno del material.

Del mismo modo, los ensayos de aislamiento acústico en laboratorio resultan muchas veces complicados de llevar a cabo debido al tamaño de las muestras a ensayar, de al menos 10m<sup>2</sup>. Desde el punto de vista de la experimentación para el desarrollo de nuevos materiales ello implica amasadas de volúmenes de 2 m<sup>3</sup> o incluso más, lo cual es un factor limitante a la hora de poder realizar un número amplio de pruebas. Igualmente, supone un elevado coste tanto por la ejecución de dichas muestras (no sólo material, sino también de mano de obra) como por el propio ensayo, para el cual son necesarias instalaciones muy específicas y complejas. Por último, el tamaño de muestra hace inviable su almacenamiento para pruebas posteriores, lo cual encarece aún más el proceso (por los inevitables costes de demolición y retirada de residuos) e impide pruebas posteriores (que serían posibles al tratarse de ensayos no destructivos).

La siguiente imagen, donde se puede ver la construcción de una fábrica de bloques en un marco portamuestras de hormigón armado de dimensiones interiores 2,8 x 3,6 m, da una idea mejor de la magnitud de las muestras habituales para los ensayos acústicos y de los costes y dificultades prácticas que pueden suponer su ejecución.



Figura 3.1: Construcción de cerramientos verticales para su ensayo acústico. (fuente: Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco)

Por todo ello, el uso de ensayos de aislamiento acústico en laboratorio se ciñe en la mayoría de los casos a la certificación de productos y sistemas constructivos, limitándose mucho su uso en investigación y desarrollo de nuevos materiales.

Asimismo, las cámaras de transmisión a escala presentan también limitaciones, especialmente en bajas frecuencias donde las dimensiones reducidas de las muestras entran en conflicto con el tamaño de las ondas de flexión y con el bajo solapamiento modal. En todo caso no han sido suficientemente desarrolladas y suponen un campo prometedor para el desarrollo de materiales.

En este capítulo se presenta el desarrollo y validación de un método de medida experimental del aislamiento acústico a ruido aéreo, utilizando muestras a escala.



## **3.2.- Cámaras de transmisión acústica a escala.**

### **3.2.1- Diseño y construcción**

Tras haber valorado diversas posibilidades alternativas, como prescindir de un recinto emisor como tal [Papanikolaou y Trochides, 1985] o incluso utilizar un tubo de Kundt [Bolton *et al*, 2007], se ha optado por el habitual sistema de dos cámaras de transmisión con campo difuso, separadas por el elemento a ensayar. Ello se justifica en que otros métodos alternativos no han presentado resultados esperanzadores en otros trabajos anteriores [Neves *et al*, 2015] y supondrían introducir complicaciones aún mayores que las que ya de por sí implica el diseño y ejecución de unas cámaras de transmisión acústica.

Asimismo, la medida entre recintos con campo difuso está normalizada tanto en lo referente a las exigencias de instalaciones y equipos [UNE-EN ISO 10140-5, antigua ISO 104-1] como en lo referente a la propia metodología de medida [UNE-EN ISO 10140-2 y 4, antigua ISO 104-3], lo cual posibilita la comparación de los resultados frente a los obtenidos por otros laboratorios. Al depender del ángulo de incidencia, el aislamiento medido en otras condiciones de campo acústico sobre la muestra sería diferente y, por lo tanto, los resultados no válidos más allá de un cotejo cualitativo entre ellos.

Las citadas normas no entran en el diseño propiamente dicho de las cámaras de transmisión acústica pero sí especifican, cuantitativa o cualitativamente, una serie de requisitos que influyen de forma determinante en dicho diseño, como son:

- Dimensiones y volúmenes mínimos.
- Tiempo de reverberación controlado en ambas cámaras.
- Necesidad de que el campo acústico dentro de las cámaras sea difuso.
- Minimización de las transmisiones indirectas entre cámaras.
- Ruido de fondo lo más bajo posible en la cámara receptora.
- Disipación de energía (*loss factor*) para muestras pesadas.

Asimismo, y aunque no sean normativos, existen otras cuestiones igualmente imprescindibles como son la facilidad de montaje y desmontaje de las muestras y la obtención de una repetibilidad satisfactoria en los resultados, que han de ser, obviamente, independientes de dicho montaje.

Para cumplir con la especificación de facilidad de montaje, se opta por construir dos cámaras de transmisión móviles, en la línea de los más recientes laboratorios de ensayos acústicos para construcción existentes en Europa.

Por ejemplo, en la figura 3.2. se aprecian dos cámaras receptoras (al fondo), con la apertura de ensayo sin muestra colocada. La estructura roja, móvil, constituye una de las posibles cámaras emisoras de las instalaciones. La figura 3.3. muestra la colocación con ayuda de una grúa-puente de la probeta a ensayar (en este caso, una ventana sobre un muro de hormigón portante).



Figura 3.2: Laboratoire européen d'acoustique du CSTB (LABE), en Marne-la-Vallée.  
(fuente: CSTB)



Figura 3.3: Laboratoire européen d'acoustique du CSTB (LABE).  
(fuente: CSTB)

Una vez fijado el arquetipo principal del diseño de las cámaras, la primera decisión relevante corresponde a la escala a adoptar. En el Capítulo anterior, se vio cómo la frecuencia se escalaba directamente. Dado que las mediciones de aislamiento se realizan en frecuencias, y más concretamente en 1/3 de octava entre 100 y 3150 Hz en las normas ISO o hasta 5000 Hz en el CTE DB-HR, es interesante adoptar una escala que simplifique dicha tarea en la medida de lo posible. Los valores centrales estandarizados para las bandas de 1/3 de octava son:

100 125 160 200 250 315 400 500 630  
800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 (Hz)

Por lo tanto, las posibilidades de escala han de ser múltiplos de estos valores. Por ejemplo 1:3,15 (es decir: 100:315 Hz), 1:4, 1:5, etc.

Por el lado de las escalas más similares al tamaño real, se presentan las limitaciones prácticas que surgen como consecuencia de las dimensiones de cámaras y muestras: la fabricación, manejo, almacenaje, etc. aumentan de complejidad conforme aumenta el tamaño de la muestra.

Como se ha visto en el Capítulo 2, los requisitos normativos para la medida del aislamiento acústico a ruido aéreo en laboratorio establecen un tamaño recomendado de arista más corta para la muestra de al menos 2,3 m, con una superficie de separación de entre 10 y 20 m<sup>2</sup>.

Si por ejemplo se optase por una escala de 1:5 (100:500Hz), con la citada limitación de dimensiones mínimas, las probetas deberían tener unas medidas de al menos 0,56 x 0,72 m. Pensando en muros de hormigón de, por ejemplo, 150 mm de espesor en escala real, el espesor de las muestras sería de 30 mm y su volumen por lo tanto de 0.012 m<sup>3</sup>. Es decir: el peso de las muestras sería del orden de 30 kg, o incluso superior, para el caso de áridos siderúrgicos. Ello supondría que, por ejemplo, las muestras no pueden ser colocadas por un único operario, sin entrar en otras consideraciones relativas al volumen y dimensiones necesarias para las cámaras de transmisión.

En el lado contrario, una escala excesivamente pequeña se aleja cada vez más de la realidad, con el riesgo de que las muestras dejen de ser representativas por cuestiones tales como la relación entre el tamaño de los áridos y el espesor de la propia muestra, que podrían llegar a ser del mismo orden, por ejemplo. Igualmente, los equipos de medida limitan también las opciones ya que habitualmente llegan a medir hasta la banda

de 20 kHz (límite superior de sensibilidad de oído humano), siendo necesario micrófonos, altavoces y analizadores muy específicos para medir frecuencias superiores a ella.

Ponderando todos estos condicionantes, se ha optado por una escala 1:6,3 (100:630Hz) como punto de equilibrio óptimo entre ensayos de muestras del mayor tamaño posible (más cercano a la escala 1:1) pero a su vez manteniendo unas dimensiones de cámaras operativas y muestras manejables. Aunque las frecuencias de 4 y 5 kHz quedan fuera de las posibilidades de medida (ya que en escala serían más de 25 kHz), sí que se abarca el rango ISO habitual de 100 a 3150 Hz, suficiente para los propósitos de la presente Tesis Doctoral.

En este sentido cabe destacar que dicha escala constituye en la práctica el límite inferior de tamaño de muestra viable, dado que escalas más pequeñas implicarían ya quedar fuera del rango de frecuencias de interés en acústica arquitectónica, a causa de las citadas limitaciones de los equipos.

Utilizando el factor de escala 1:6,3 escogido, se constata que una muestra de superficie 0,44 x 0,64 m equivale unas dimensiones escaladas de 2,77 x 4,03 m (con una superficie de 11,17 m<sup>2</sup>) cumpliéndose, por lo tanto, holgadamente, las dimensiones mínimas establecidas a la vez que el peso de las muestras queda en un valor manejable.

Una vez establecido el tamaño de la muestra, que cubrirá el 100% de la apertura de ensayo para evitar efectos nicho y/o transmisión por flancos, se definen el resto de dimensiones de las cámaras. La norma recomienda que los volúmenes y/o dimensiones lineales de las cámaras emisora y receptora sean, al menos, 10% diferentes y de, por lo menos, 50 m<sup>3</sup>, sin fijar ningún otro límite en cuanto a su volumen o forma.

Para lograr el objetivo de campo difuso es necesario que un gran número de ondas reflejadas, provenientes de todas direcciones, se combinen de forma que, en cualquier punto dado, y en cualquier dirección instantánea de la onda sonora, la densidad media de energía acústica sea igualmente probable.

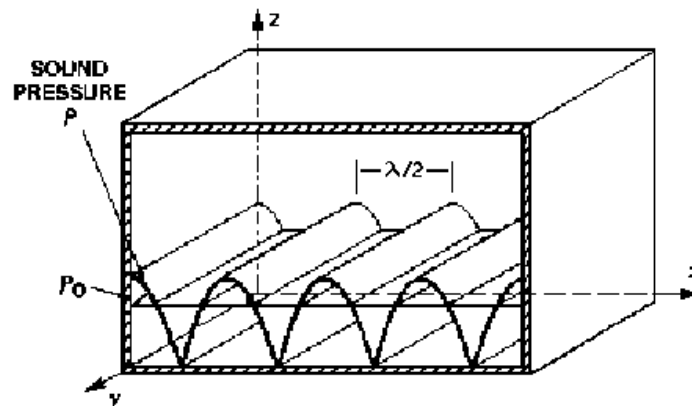


Figura 3.4: Paredes paralelas, que favorecen la aparición de ondas estacionarias y por lo tanto disminuyen la difusividad del campo. (fuente: <http://www.sengpielaudio.com>)

Para ello, se diseñan las cámaras evitando planos paralelos que puedan favorecer la aparición modos de ondas estacionarias con los fenómenos asociados de interferencias constructivas y destructivas y, por lo tanto, con ubicaciones espaciales singulares dentro de las cámaras, tal y como se ilustra en la figura 3.4.

Esta opción, frente a la alternativa generalmente más habitual (aunque no única) de optar por una forma paralelepípedica en los laboratorios a escala real, complica la construcción de las cámaras. No obstante lo cual, mejora la difusividad del campo sonoro sin necesidad de recurrir al uso de elementos reflectantes curvos o irregulares estratégicamente distribuidos (denominados a la sazón, difusores).

Obviamente, por operatividad posterior en la colocación de posiciones de micrófono y fuente sonora, el suelo de las cámaras ha de ser horizontal. El resto de planos que conforman las paredes interiores de las cámaras, sin embargo, no son nunca paralelos dos a dos, conformando ángulos mayores de  $90^\circ$  a fin de aumentar el volumen de las cámaras y facilitar también las separaciones mínimas establecidas por la norma en cuanto a posiciones de micrófonos y fuentes tanto entre sí como respecto a las paredes interiores.

En la misma línea, la densidad modal dentro de un recinto aumenta conforme lo hace la frecuencia. A partir de una frecuencia, denominada frecuencia límite, la concentración de modos propios es tal que se obtiene una respuesta en frecuencia de la sala cuyo espectro es prácticamente plano. La expresión ec.2.27 muestra que un mayor volumen de las salas conlleva una frecuencia límite más baja, lo cual es igualmente de interés.

Sin embargo, un mayor volumen de las cámaras presenta la problemática del espacio ocupado, que es limitante.

Ponderando todo ello, las cámaras finalmente se diseñan con un volumen de:

Volumen emisora:  $0,51 \text{ m}^3$  ( $127 \text{ m}^3$  en escala real)

Volumen receptora:  $0,46 \text{ m}^3$  ( $115 \text{ m}^3$  en escala real)

Cumpliendo, por lo tanto, la diferencia mínima del 10% de volumen entre recintos y que el emisor sea el de mayor tamaño de las dos, así como una frecuencia límite por encima de los 200 Hz.

La construcción de ambas cámaras se ha realizado utilizando placa de yeso laminado. En concreto, se ha optado por una doble placa *acústica* (con aislamiento mejorado frente a las placas estándar) *Placo Phonique*, en 13mm de espesor nominal. La perfilería utilizada en este caso ha sido de listones de madera para facilitar el montaje.

La figura 3.5 muestra las cámaras receptora (izquierda) y emisora (derecha) durante su construcción. Como referencia, se recuerda que el tamaño de la apertura de ensayo es de 640x440 mm.



*Figura 3.5: Cámaras receptora y emisora durante su construcción.*

No obstante, con dicho material únicamente no se alcanza un aislamiento acústico lo suficientemente alto como para minimizar las transmisiones indirectas (esto es: que el sonido no pase de una cámara a otra por cualquier otro camino diferente a la muestra bajo ensayo) o asegurar un ruido de fondo despreciable en la cámara receptora (esto es: que ruidos provenientes del exterior puedan afectar al sonido medido dentro de la

cámara, falseando el resultado del ensayo, ya que se suma al sonido proveniente de la muestra a ensayar).

Para evitar estas situaciones se ha optado por una construcción doble tipo “caja dentro de caja”. Cada una de las cámaras, emisora y receptora, se coloca a su vez dentro de otra estructura exterior construida también con dos placas de yeso laminado del mismo *Placo Phonique* de 13 mm (con perfilera metálica en este caso) y lana de roca. Estas estructuras disponen de ruedas en su parte inferior que permiten el movimiento de las cámaras para la colocación y ajuste de la muestra de ensayo.

En este punto se tuvo que modificar el diseño inicial planteado ya que las ruedas colocadas en primera instancia (de 75 mm de diámetro) pese a que soportaban a priori el peso del conjunto, resultaron insuficientes en la práctica ya que se clavaban ligeramente en el suelo (de material plástico). Esto ocurría en la ubicación inicialmente prevista para las cámaras dificultando su movimiento y eventualmente cediendo, tal y como se observa en la figura 3.6. Todo lo cual obligó a reubicar el laboratorio en otra zona con suelo más rígido (terrazo) aprovechando la circunstancia para colocar ruedas de mayor diámetro (150 mm) que facilitaron notablemente manejo de las cámaras,



Figura 3.6: Ruedas iniciales (falta) frente a las definitivas, ya en su ubicación definitiva.

Para maximizar el aislamiento de este conjunto, la ejecución se realiza además sin que exista contacto mecánico rígido entre el exterior e interior de cada cámara. La distancia mínima entre las cajas interiores y exteriores es de 120 mm, pero alcanza espesores mucho mayores en la mayoría de las zonas. La cámara emisora va directamente apoyada sobre 180 mm de lana de roca de alta densidad Rockwool Rocksol-E 501, a fin de poder soportar el peso propio (la receptora se apoya en unas ruedas de goma, sobre raíles ya que a su vez debe poder ser móvil respecto a su cerramiento exterior por necesidades del sistema de sellado). El resto del espacio entre las cámaras

interiores y exteriores queda totalmente relleno por una combinación de dos tipos diferentes: Rockwool *Alpharock E225* e Isover *Acustilaine70*.

Las dimensiones exteriores de dichas cajas son de 1,4 m de alto x 1,26 m de ancho x 1,55 m de profundidad, tanto para la cámara emisora como para la receptora. Si a ello se le añade el espacio necesario para poder mover una de las cámaras, el conjunto ocupa ya una superficie significativa, pese a tratarse de un laboratorio a escala.



*Figura 3.7: Construcción de la cámara emisora (de izquierda a derecha y de arriba a abajo).*

De este modo, el aislamiento previsto entre el interior y el exterior de cada una de las cámaras es de más de 67 dB, logrando el requisito establecido de bajo nivel de fondo, así como de minimización de la transmisión del sonido por caminos diferentes a la propia muestra de ensayo.

En esta misma línea, es también fundamental que el sellado entre cada una de las cámaras y el marco portamuestras sea perfecto ya que de otro modo ese punto podría convertirse en un puente acústico, especialmente teniendo en cuenta las altas frecuencias en las que se va a medir. La estanqueidad se asegura mediante el uso de tornillos que cierran a presión ambas caras contra el marco portamuestras en 6 puntos de



su perímetro (ver figuras 3.9, 3.12 y 3.13, por ejemplo) y, posteriormente, mediante cinchas que realizan una función análoga con las cajas exteriores (figura 3.14).

Pese a la citada unión mecánica, el sistema evita la conexión rígida entre las dos cámaras mediante el uso de un material semirrígido de espuma aglomerada (Copopren T CA-80) en todo el frente de la cámara emisora. De este modo, el marco portamuestras no se une rígidamente contra la cámara emisora al apretar los tornillos, sino que deforma dicha espuma y se apoya contra ella, quedando aún margen elástico en la misma para evitar la transmisión de ruido y vibraciones.

Como los tornillos han de ser accesibles para montar y desmontar la muestra en cada ensayo, una de las cámaras interiores (la receptora en este caso) se puede mover a su vez dentro de su caja exterior (fija). De ahí la necesidad, antes citada, de colocar dicha cámara sobre unos raíles, con ruedas de goma para minimizar la transmisión de ruido y vibraciones al interior de la cámara.



*Figura 3.8: Cámara receptora (móvil respecto a su caja exterior)*

Por supuesto, la presión ejercida por este sistema sólo es eficaz si la superficie de contacto cámara-marco-cámara es razonablemente plana. Para asegurar dicha planeidad

se colocaron listones de madera en el perímetro de la abertura de ensayo y, sobre ellos, se adhirió una chapa de madera que también realiza las funciones de cierre entre las cámaras interiores y el hueco de cierre de cada una de las cajas exteriores que, por dificultades en el montaje, no tenían las tolerancias que hubieran sido deseadas (ya que es preciso que, por una parte, no exista contacto físico entre la cámara interior y la caja exterior pero, por la otra, el hueco entre ambas ha de ser mínimo para evitar posibles puentes acústicos).

Esto se aprecia mejor comparando las últimas fotos de las figuras 3.7 y 3.8, con huecos entre las cámaras interiores y sus respectivas cajas exteriores por los que eventualmente podría transmitirse sonido, frente a las imágenes de la figura 3.9, donde ya se ha mejorado la planeidad entre las caras y cerrando el hueco (*gap*) existente entre cajas:



Figura 3.9: Borde de madera colocado en ambas cámaras.

En la cámara emisora, dicho *gap* se sella asimismo por la misma espuma aglomerada (Coproren T CA-80) que evita el contacto rígido entre el marco y la cámara, tal y como se muestra en la figura 3.10.



Figura 3.10: Sellado elástico con cámara emisora.

Este material se cubre con cinta al finalizar el montaje ya que no pueden existir superficies absorbentes en los bordes de la muestra.

Finalmente, para lograr una unión elástico-plástica en todo el perímetro, en la figura 3.11 se muestra cómo, tanto las citadas chapas de madera, como el propio marco portamuestras en sus dos caras fueron recubiertos a su vez por bandas de un producto bicapa formado por una membrana autoadhesiva de alta densidad y un polietileno químicamente reticulado termosoldado a la anterior (*Danosa-Fonodan 50*).

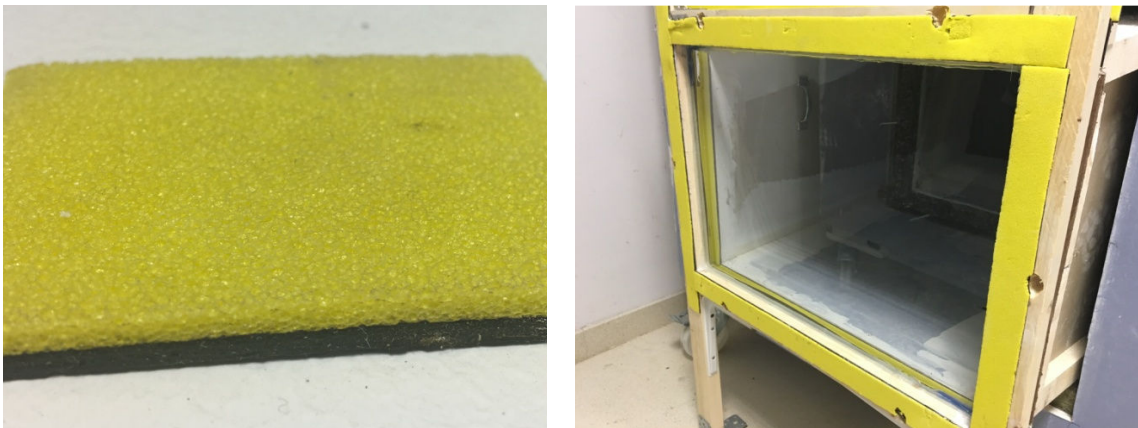


Figura 3.11: Bandas de material bicapa para mejor el sellado: detalle y colocación.

En lo referente a la construcción del marco portamuestras, dado que el aislamiento que se mide en un laboratorio depende, entre otros factores, de la masa de los elementos de flanco, se consideraron diversas alternativas. Una de ellas consistía en realizar el marco con perfiles metálicos, rellena posteriormente con lechada de hormigón o similar para aumentar su masa y, por lo tanto, contribuir al *loss factor total* de la muestra. De este modo, se medirían aislamientos más altos y/o más similares a los que realmente existirán en la situación de obra real [Esteban *et al*, 2004]. Sin embargo, dado que las muestras tendrán siempre una densidad superficial inferior a  $150 \text{ kg/m}^2$ , después de valorar diversos materiales, se optó por la realización en madera con unos refuerzos metálicos, al objeto de simplificar la ejecución y facilitar el movimiento de las muestras.

El tamaño del marco es algo mayor al de la abertura de ensayo (650x450 mm), permitiendo por lo tanto un margen de 5 mm en cada uno de los bordes, lo que contribuye a evitar “*fugas*” de sonido por la unión entre muestra y marco. Dicha unión, en todo caso, se sella convenientemente para realizar los ensayos mediante el uso de siliconas, cintas textiles e incluso lana de roca introducida a presión en los casos en que el hueco existente entre marco y muestra superaba el milímetro de espesor.

El espesor del marco, de 30 mm en este caso, es el mínimo posible para albergar las muestras previstas. El objeto no es otro que el de evitar la posibilidad de efectos nicho, así como minimizar las posibles transmisiones indirectas por el propio marco.

Asimismo, el marco portamuestras consta de unos orificios pasantes de un diámetro suficiente para evitar su contacto con los referidos espárragos, que lo atraviesan sin contacto mecánico, disminuyendo también en lo posible la transmisión de vibraciones (ver figura 3.12).



*Figura 3.12: Construcción del marco portamuestras.*

Por lo tanto, con el diseño establecido, la secuencia de colocación de una muestra entre las cámaras acústicas es:

1. Sacar la cámara receptora interior de su caja, desplazándola sobre sus raíles (ver figura 3.8).
2. Colocar el marco contra ella, con la muestra ya convenientemente sellada respecto al marco (ver figura 3.11).
3. Acercar la cámara emisora, de forma que los espárragos roscados atraviesen marco y borde de la cámara receptora (ver figura 3.13).
4. Apretar estos espárragos con las palomillas para asegurar estanquidad entre cámara emisora, marco y cámara receptora (ver figura 3.13).
5. Mover todo el conjunto para que la cámara receptora quede en su ubicación real
6. Ajustar las cinchas entre las cajas exteriores para reforzar aún más la estanquidad y evitar transmisiones indirectas (figura 3.14).

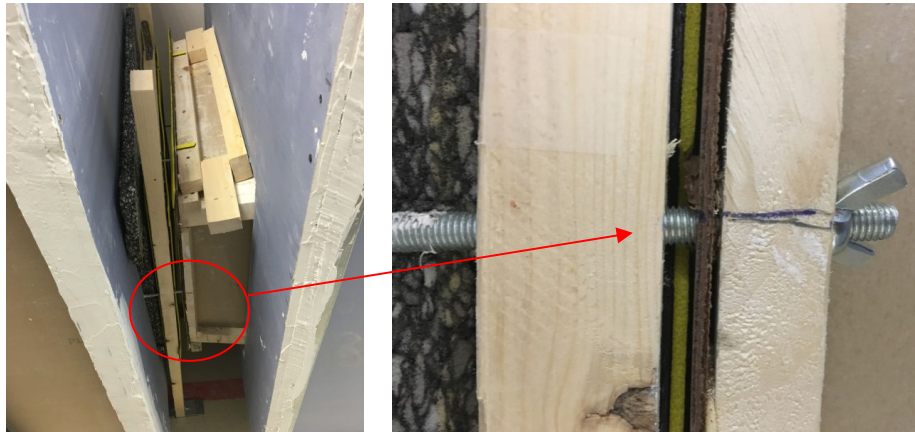


Figura 3.13: Detalle de la unión entre marco y cámaras.



Figura 3.14: Cinchas colocadas en las cámaras asegurando la estanqueidad del conjunto.

Asimismo, es necesario disponer de algún tipo de acceso al interior de las cámaras que permita la colocación de micrófonos y fuente sonora en distintas ubicaciones de su interior a lo largo del ensayo. Para evitar que dichos puntos conformen un debilitamiento excesivo del aislamiento del conjunto, se ha diseñado una doble puerta (cada una colocada en las cajas interior y exterior de la cámara correspondiente) ejecutada también con doble placa *Phonique*.

Las dimensiones de los accesos realizados es de 20 x 30cm. El sellado se asegura utilizando *Copopren* en la parte interior y mediante bandas de *Fonodan* en la tapa exterior, que a su vez se cierra a presión mediante tornillos y palomillas durante el ensayo

(figura 3.15). Dichas zonas se utilizan igualmente para pasar los cables de los altavoces y micrófonos durante las medidas.

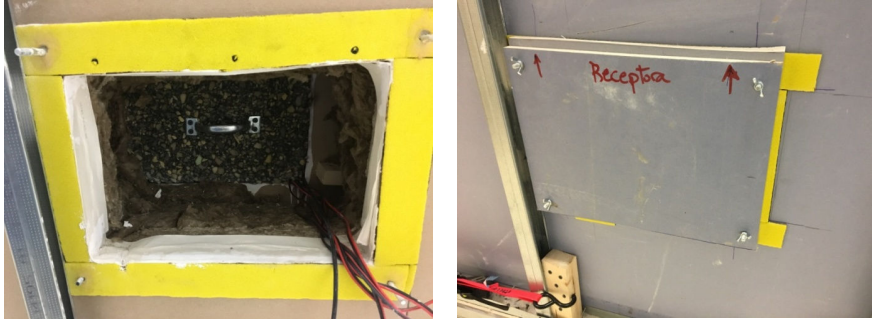


Figura 3.15: Acceso al interior, con doble puerta.

Para finalizar la fase de construcción de las cámaras, su interior se ha pintado marcando además en los suelos de ambas cámaras los límites establecidos en la norma respecto a las distancias mínimas entre los límites de los recintos y las diferentes posiciones de micrófono (figura 3.16), facilitando de este modo el posterior correcto desarrollo de los ensayos.



Figura 3.16: Interior pintado. Las líneas rojas marcan los límites de colocación de posiciones de micro.

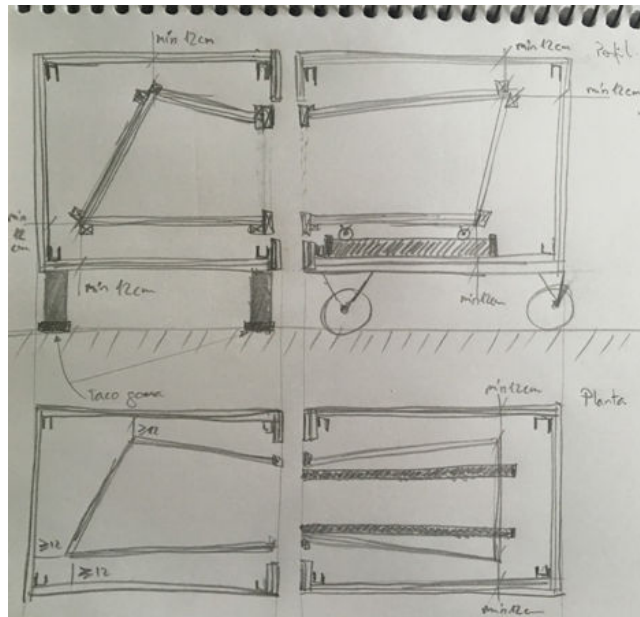


Figura 3.17: Bocetos de diseño iniciales, donde se aprecian las ideas de cámaras móviles, paredes interiores no paralelas, minimización de las transmisiones indirectas mediante un aislamiento reforzado de cada una de las cámaras así como de sellado de la muestra mediante cámara interior móvil.



Figura 3.18: Cámaras emisora (izquierda, con una muestra de placas de yeso laminado) y receptora (con una muestra de hormigón colocada), durante la realización de ensayos.

### 3.2.2- Ajuste y cualificación de las cámaras

Una vez finalizada la construcción de las cámaras es necesario su ajuste y cualificación para poder obtener resultados coherentes con otros laboratorios, y así garantizar que los mismos no se vean afectados por errores de diseño. Para ello se realizaron diversas pruebas que se exponen a continuación.

### 3.2.2.1.- Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación en la cámara receptora se ha medido a partir de las curvas de caída del nivel de presión sonora utilizando el método de la respuesta impulsiva integrada. La medida se realiza con la muestra colocada y todo el conjunto sellado. Se utilizan 2 posiciones de fuente y 3 de micrófono, registrando dos caídas por cada combinación.

Las condiciones termohigrométricas en el interior de las cámaras fueron de 22°C de temperatura y 63% de humedad relativa. Las distancias entre fuente sonora impulsiva (globos, en este caso), micrófonos y límites de la cámara se recogen en la tabla 3.1 y siguen lo especificado en la norma ISO 3382-2 [ISO 3382-2].

<u>Distancia entre:</u>	<u>Requisito ISO 3382 (m)</u>	<u>Requisito escalado (cm)</u>
<b>Posiciones de micrófonos</b>	1,7	27
<b>Micrófono y límites de habitación</b>	0,85	13,5
<b>Micrófono y fuente sonora</b>	1	16

Tabla 3.1: Distancias respetadas en las medidas de tiempo de reverberación.

Los resultados obtenidos pueden constatarse en la siguiente figura 3.19. Como puede observarse, son unos tiempos de reverberación muy bajos. Por ello, las curvas de decrecimiento podrían estar influenciadas por el tiempo de respuesta del filtro y detector del propio sonómetro.

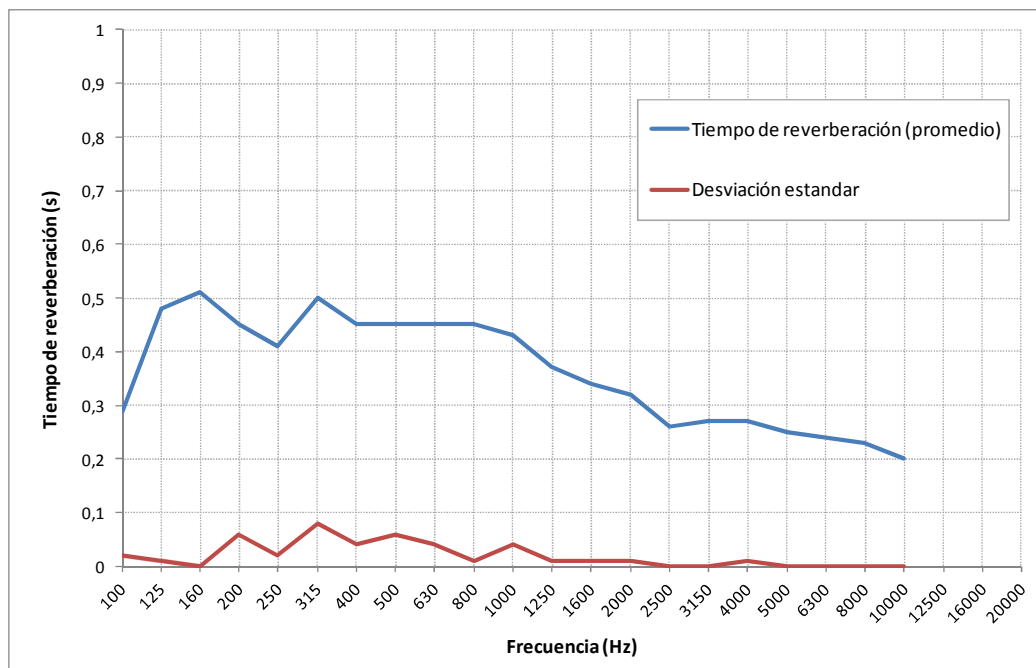


Figura 3.19: Tiempo de reverberación (promedio y desviación estándar), en frecuencias.



Se ha comprobado que se cumplen los límites inferiores para la obtención de resultados fiables, que son:

$$B \times T > 16 \quad (ec.3.1)$$

$$T > T_{det} \quad (ec.3.2)$$

Donde:

- B es el ancho de banda del filtro, en Hz.
- T el tiempo de reverberación medido, en segundos
- $T_{det}$  es el tiempo de respuesta, en segundos, del detector promediador

En cuanto a la valoración de los resultados en sí mismos, hay que señalar que, aunque la repetibilidad entre las diferentes posiciones de micrófono es muy buena (señal de que no hay modos dominantes que estén perturbando las medidas y por lo tanto que el campo es razonablemente difuso), el tiempo de reverberación ideal debería de estar entre 1 y 2s. Sin embargo, con las dimensiones reales de la cámara, ello no es viable dado que a la longitud (y volumen, por lo tanto) sí que se le aplica el factor de escala, pero no así al tiempo.

De hecho, si se hubiera estimado este tiempo de reverberación, aplicando alguna aproximación válida como la fórmula de Sabine [*Sabine,1922*], se tendría que:

$$TR = 0,16 \cdot \frac{V}{A_T} \quad (ec.3.3)$$

Donde:

- TR es el tiempo de reverberación
- V el volumen del recinto
- $A_T$  el área de absorción equivalente

Se comprueba que para un recinto de estas dimensiones ( $0,46 \text{ m}^3$ ) y con todas sus superficies interiores reflectantes (yeso pintado), el tiempo de reverberación esperado varía entre 1 y 0,2 s, en coherencia con el resultado obtenido por la medición. La amplia horquilla de valor de tiempo de reverberación esperado se debe a que las pequeñas dimensiones y superficies hacen que el resultado sea muy sensible a los cambios en el coeficiente de absorción estimado para el material.

Si se hubiera dado el caso contrario, con una reverberación excesiva (por ejemplo, en la cámara a escala real con un volumen de  $115 \text{ m}^3$ , el tiempo de reverberación esperado estaría en el orden de los 3 segundos), se podría solucionar añadiendo material

absorbente en las paredes del recinto. Sin embargo, aumentar dicho tiempo de reverberación no es viable a priori.

Por lo tanto, es necesario comprobar que el índice de reducción sonora no depende del tiempo de reverberación para las muestras ensayadas, corrigiendo el valor medido en función del citado parámetro.

### **3.2.2.2.- Cualificación y posicionamiento de la fuente sonora**

El objetivo de este requisito es conseguir que el campo sonoro en el interior de las cámaras sea tan difuso como sea posible. Las posiciones y la direccionalidad de la fuente deben permitir posiciones de micro fuera del campo directo de la fuente y, de este modo, asegurar que su radiación directa no es dominante en la superficie de la muestra.

Las pruebas iniciales se realizaron con un altavoz unidireccional de 4 pulgadas, con un amplificador y ecualizador integrado en el mismo como se ve en la fotografía de la izquierda en la figura 3.20.



*Figura 3.20: Pruebas iniciales utilizando una fuente unidireccional y tamaño relativo de una fuente comercial respecto a las propias cámaras.*

Sin embargo, las dificultades para lograr las condiciones de campo acústico citadas hicieron desear dicho sistema en beneficio de una fuente omnidireccional. El uso de una fuente comercial de este tipo es inviable debido a su tamaño, que ocupa una parte significativa del volumen de la cámara, como se puede ver en la fotografía de la izquierda de la figura 3.20, impidiendo luego mantener las distancias para el ensayo.

Para solucionar esta contingencia se ha fabricado una fuente específica con la forma de cubo de 150 mm de lado (figura 3.21), como aproximación razonablemente válida a una fuente dodecaédrica tradicional.



Figura 3.21: Construcción de una fuente específica con arreglo al empleo de 6 altavoces de 2,5"

Los transductores de los altavoces (de 2,5 pulgadas) se encuentran montados en una caja cerrada y radiando en fase (figura 3.22).



Figura 3.22: Fuente omnidireccional colgada del techo de la cámara emisora.

Los requisitos de radiación de la fuente sonora dependen de las dimensiones del recinto. Para una radiación omnidireccional uniforme, la distancia desde la fuente hasta la muestra y/o hasta cualquier posición de micro no debe de ser menor que:

$$d_{\min} = 0,1 \cdot (V / \pi \cdot T)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ec.3.4})$$

donde:

- $d_{\min}$  es la distancia, en metros, desde la fuente
- V el volumen del recinto, en metros cúbicos
- T es el tiempo de reverberación, en segundos

Aun así, la norma de medida recomienda encarecidamente duplicar esa distancia. Aplicado al caso bajo estudio, y tomando un  $T = 0,2$  s como caso más desfavorable, se obtiene una distancia mínima de 90 mm, que se duplica siguiendo la recomendación quedando por lo tanto en 180 mm mínimo.

Se ha verificado experimentalmente que, a partir de esa distancia, moviendo en línea recta el micrófono alejándose de la fuente, el nivel de presión sonora registrado no varía con la posición. Dicha prueba se realiza para todas las bandas de  $\frac{1}{3}$  de octava.

La idoneidad de las posiciones de fuente se examina respecto al modo de excitación específico del recinto. Todo ello con objeto de encontrar posiciones que lleven a resultados de la medida de aislamiento acústico, lo más cerca posible a los valores medios de un gran número de posiciones uniformemente distribuidas por el recinto.

Para realizar esta comprobación, se ha generado ruido rosa en la cámara tomando medidas en todas las bandas de frecuencia, según distintos puntos distribuidos uniformemente en la cámara. Este proceso se repetirá para varias posiciones de fuente sonora (ver figura 3.23).

Después de seguir el procedimiento indicado en el anexo C de la norma UNE-EN ISO 140-3, se ha determinado qué dos posiciones de fuente son suficientes para los requisitos de cualificación establecidos. Las posiciones respetan las distancias mínimas establecidas de 0,7 m (en escala: 110 mm) entre bordes del recinto y centro de la fuente sonora y de separación entre sí mayor de 1,4 m (230 mm en escala).

Igualmente, las posiciones de altavoz no son simétricas respecto a los ejes o planos centrales del recinto ni se sitúan en un mismo plano paralelo a las paredes del recinto.

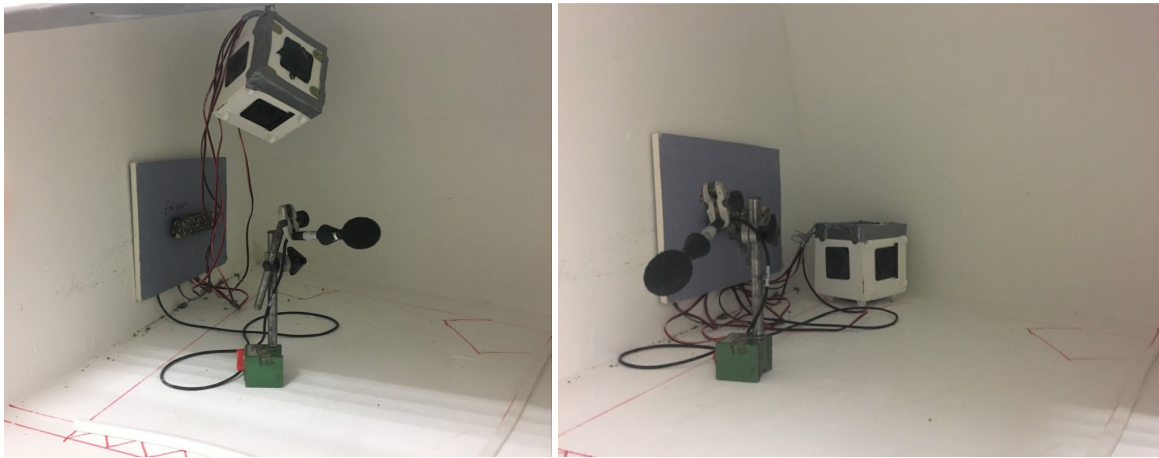


Figura 3.23: Fuente omnidireccional, según diversas posiciones.

En las figuras 3.24 y 3.25 se muestran los resultados de desviación estándar del nivel de presión sonora  $L_p$  obtenidos en las cámaras emisora y receptora respectivamente, para las posiciones de fuente indicadas en la figura 3.23, según resultados en frecuencias.

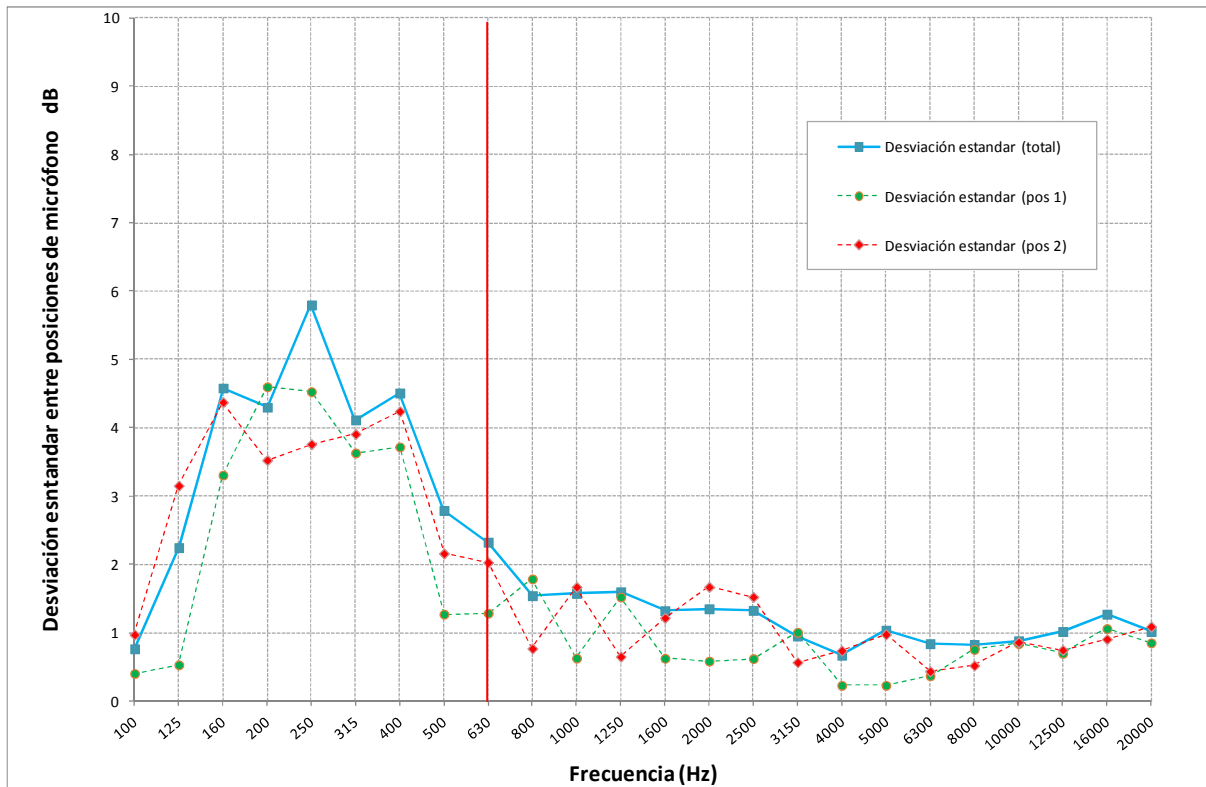


Figura 3.24: Desviación estándar entre los niveles sonoros registrados en la cámara emisora.

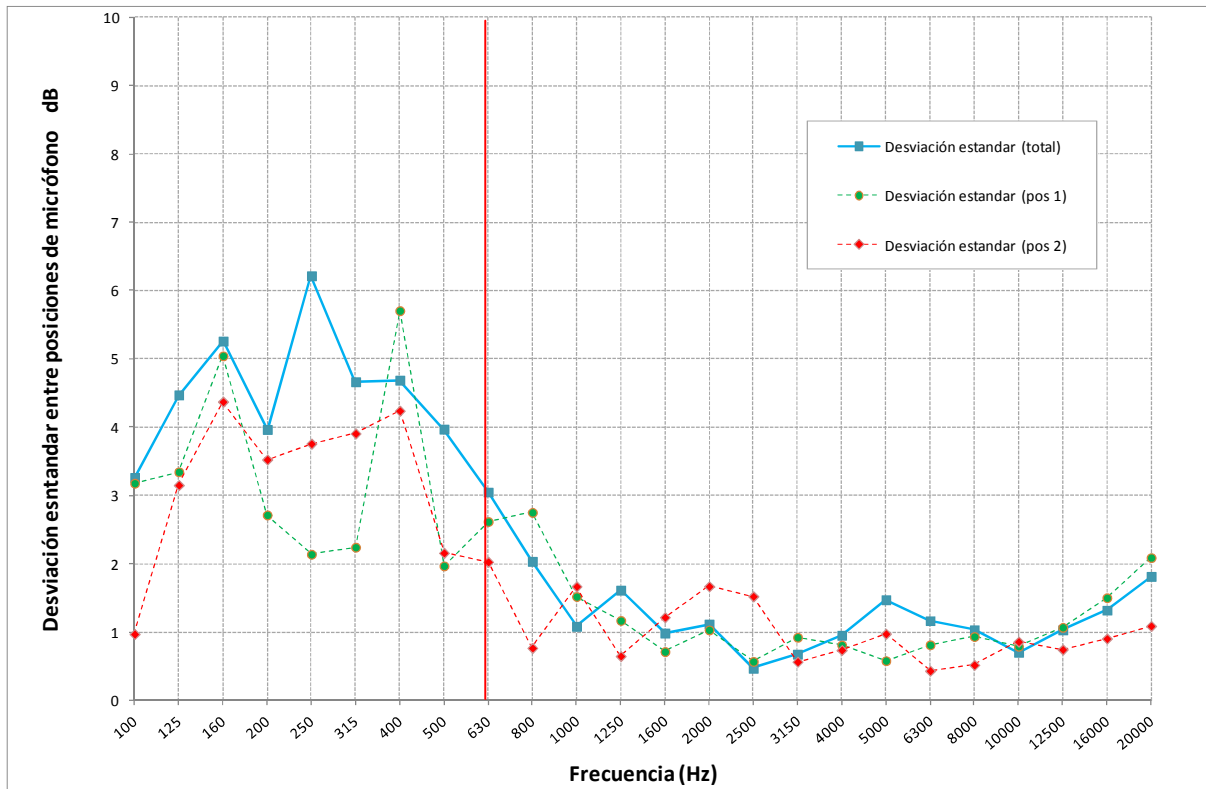


Figura 3.25: Desviación estándar entre los niveles sonoros registrados en la cámara receptora.

Como puede observarse, los resultados en bajas frecuencias presentan una alta variabilidad como era de esperar ya que el solapamiento modal es menor a dichas frecuencias, especialmente en recintos tan pequeños como los de este caso. No obstante, hay que recordar que, a efectos del ensayo a escala, la frecuencia de 630 Hz corresponde a los 100 Hz escalados, de forma que únicamente hay que valorar las frecuencias por encima de los 630 Hz (indicados con una línea roja).

Los resultados se comparan en la figura 3.26 con la desviación teórica propuesta en la norma UNE-EN ISO 140-14:2005, en función del volumen (escalado) de las salas. Dichos valores son orientativos y se recomienda no sobrepasarlos en un factor superior a 1,5.

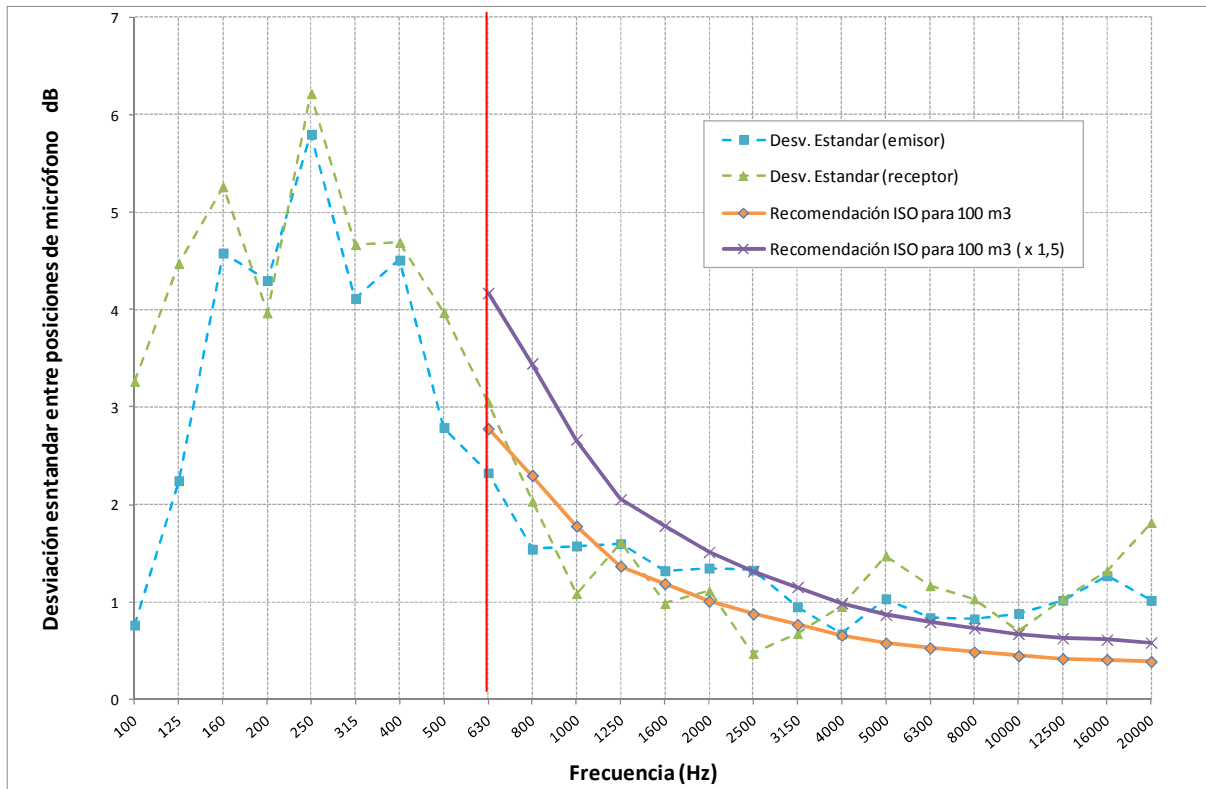


Figura 3.26: Desviación estándar de los niveles sonoros en ambas cámaras frente al criterio de la norma UNE-EN ISO 140-14.

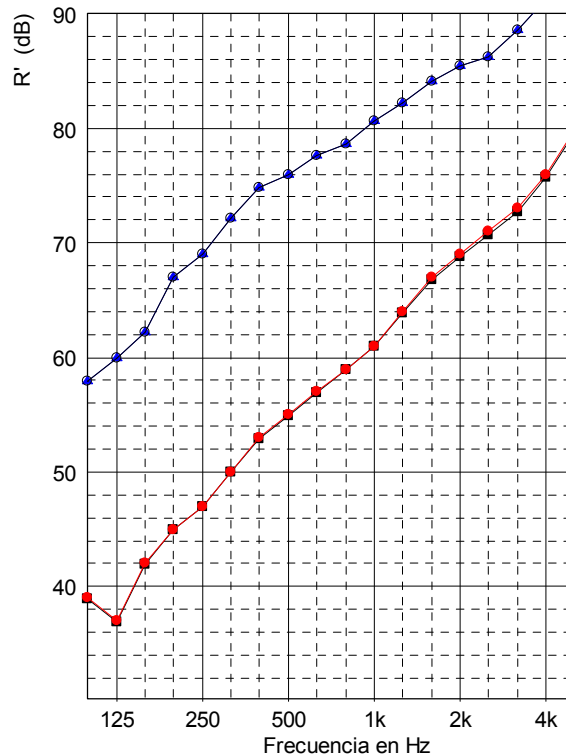
Los valores obtenidos se dan por válidos, ya que son inferiores o no se alejan demasiado de la recomendación de la norma. En todo caso, posiblemente dichos valores podrían mejorarse mediante la colocación de difusores curvos y, especialmente, con unas cámaras de mayor volumen (que también mejoraría el tiempo de reverberación).

### 3.2.2.3.- Cuantificación de las transmisiones indirectas

La posible existencia de transmisiones indirectas por vía estructural se ha evaluado de forma teórica, mediante simulación por ordenador de la transmisión de vibraciones entre ambas cámaras, calculada a partir de los datos de su composición y de las uniones entre elementos. Para ello se ha utilizado el modelo recogido en la norma UNE-EN 12354-1 que es a su vez una simplificación de los modelos SEA de Análisis Estadístico de Energía [Lyon, 1995; Craik 1996].

Los resultados de la modelización, suponiendo un elemento separador consistente en un muro de hormigón armado de 170 mm de espesor (esto es: similar a los elementos

que se ensayarán el resto de capítulos de la presente Tesis Doctoral), muestran que las transmisiones indirectas limitan las medidas en aislamientos a partir de 73 dB de índice de aislamiento acústico (figura 3.27).



*Figura 3.27: Modelización de las transmisiones indirectas: aislamiento del elemento separador (en rojo) frente a las contribuciones de los elementos de flanco (en azul).*

Por lo tanto, no existen influencia de las transmisiones indirectas en las medidas que se van a realizar (con aislamiento esperados entre 50 y 55 dB, aproximadamente). No obstante, el uso de las cámaras en muestras de mayor aislamiento requerirá de un estudio experimental más específico mediante medidas de vibración en las diferentes superficies de las cámaras (en lugar de estimaciones por cálculo), al objeto de determinar exactamente la influencia de dichas transmisiones. En su caso, la mejora de las uniones entre elementos para incrementar la capacidad de  $R'_{\max}$  (máximo aislamiento posible medible) de las cámaras.

Igualmente, se ha contemplado la posibilidad de que problemas de sellado en las puertas de acceso, o en la unión entre marco y cámaras, puedan afectar al resultado de las medidas. Para evaluar dicha circunstancia se han realizado medidas de aislamiento entre cada una de las cámaras y el exterior. Posteriormente, se han realizado medidas de niveles de presión sonora (en frecuencias de 1/3 de octava), tanto en el interior de la



cámara receptora, como en el exterior de las mismas, con la fuente sonora generando ruido rosa en la cámara emisora.

La comparación entre el nivel de presión sonora, medida en el interior de la cámara receptora (en rojo en la siguiente gráfica), y el estimado a partir de la resta entre el nivel registrado en el exterior de las cámaras y el aislamiento bruto de las mismas (en azul), muestran cómo tampoco existe influencia de las transmisiones por vía aérea, al estar ambos niveles distanciados en más de 15 dB para todas las frecuencias.

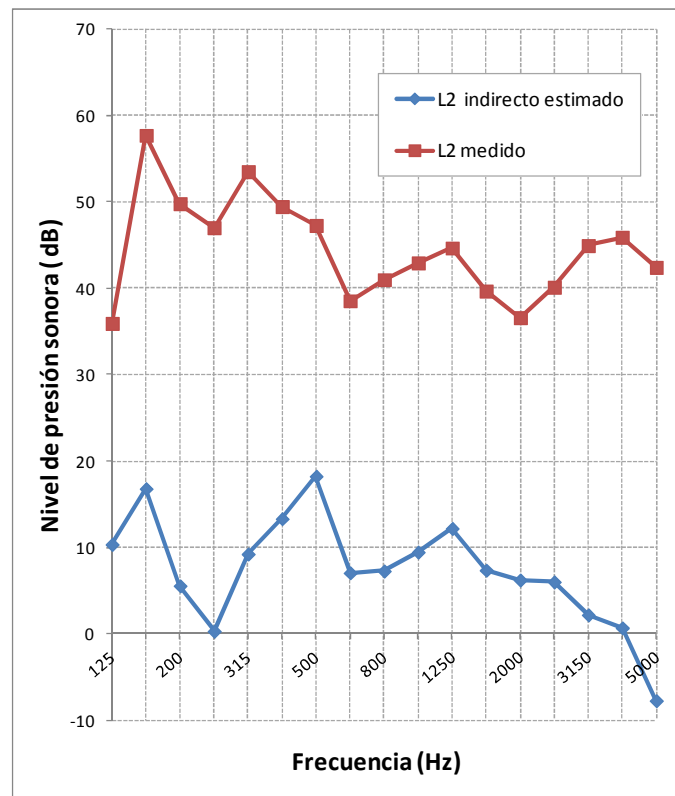


Figura 3.28: niveles esperados por vía aérea (en azul) frente a los niveles medidos (en rojo).

### 3.2.2.4.- Ruido de fondo en la cámara receptora

Relacionado con el punto anterior, aunque considerando en este caso la eventualidad de que algún ruido procedente del exterior de las cámaras (y ajeno, por lo tanto, al generado durante el ensayo) pueda interferir en los niveles registrados en la cámara receptora, se ha evaluado el nivel de ruido existente en esta última. Cuestión que se ha abordado sin la existencia de fuentes sonoras, más allá del propio ruido ambiente en el laboratorio de Gikesa donde se ubican las cámaras de ensayo.

Los resultados obtenidos son:

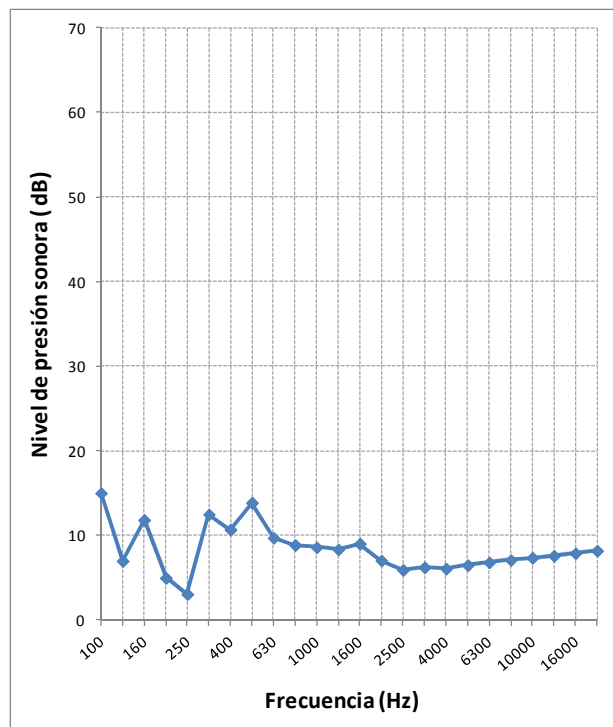


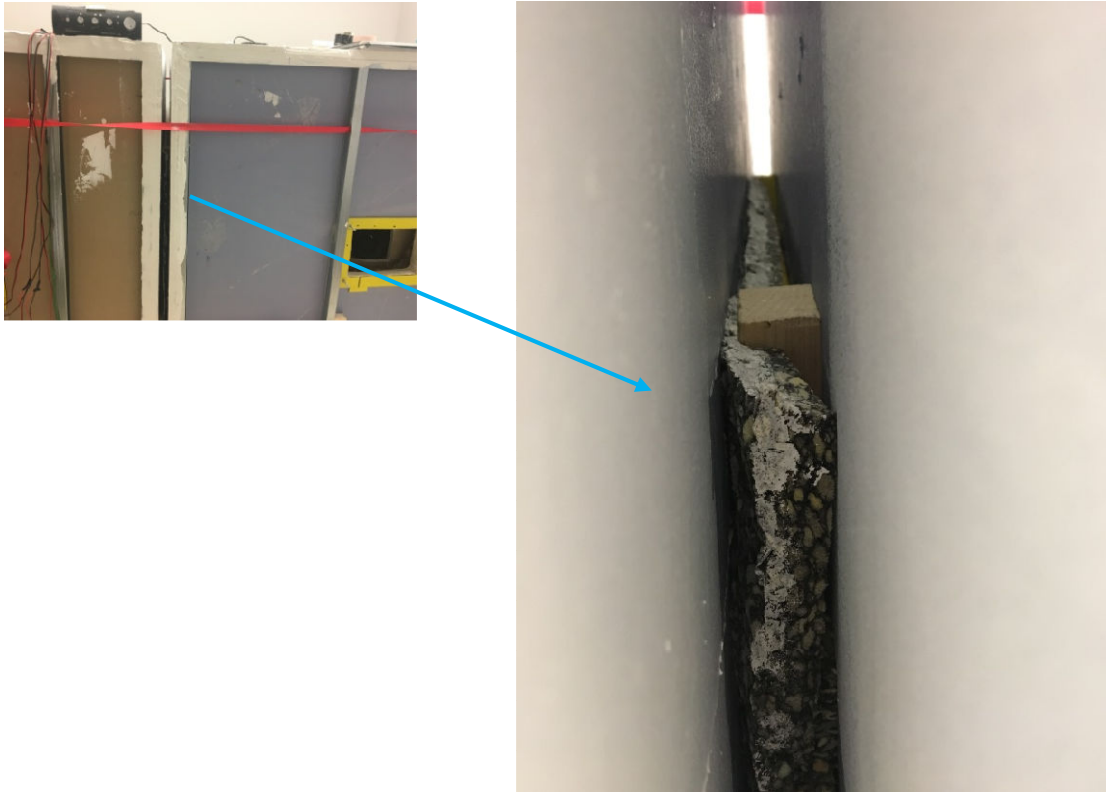
Figura 3.29: niveles de ruido de fondo medidos en el interior de la cámara receptora

Estos niveles son muy bajos, como se aprecia en la figura 3.29, estando por debajo de los 15 dB en todas las frecuencias y siendo, además, del orden de los 20 dBA en su suma global. De hecho, los valores recogidos están cerca del límite de medida de los propios equipos debido al ruido eléctrico inherente a los mismos.

No obstante, el procedimiento de medida adoptado (que se describirá en detalle en el siguiente punto) incluye la medición sistemática de este parámetro para evaluar su influencia en cada una de las medidas.

### 3.2.2.5.- Disipación de energía (*loss factor*)

Dado que las muestras tendrán siempre una densidad superficial inferior a  $150 \text{ kg/m}^2$ , el *loss factor* aportado por un marco de madera se considera suficiente y se ve además reforzado, en todo caso, por su contacto con la cámara receptora, tal y como se aprecia en la figura 3.30.



*Figura 3.30: Contacto mecánico entre marco portamuestras y cámara (caja exterior).*

En todo caso, este parámetro, al requerir de equipos de los que no se dispone para poder ser medido (ver figura 2.14), queda pendiente de evaluar cuantitativamente. Por ello, hay que recordar que, aunque los aislamientos medidos serán perfectamente comparables entre sí, los resultados en valores absolutos serán inferiores a los de otros laboratorios con marcos de hormigón.

Remarcar que dicha circunstancia es común a cualquier laboratorio de acústica, como ya se vio en el capítulo anterior.

## **3.3.- Metodología de ensayo**

### **3.3.1.- Procedimiento de medida**

El procedimiento de ensayo de aislamiento a ruido aéreo se basa en las normas de medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción UNE-EN ISO 10140-2 (medición del aislamiento acústico al ruido aéreo) y 10140-4 (procedimientos y requisitos de medición).

El índice de reducción sonora se estima a partir de la ya citada ecuación 2.25:

$$R = L1 - L2 + 10 \log (S/A)$$

La verificación se realiza mediante el calibrado, previa y posteriormente, a las medidas. El criterio de aceptación es de  $\pm 0,3$  dB respecto al valor de la última calibración del calibrador. Se verifica que la diferencia entre la calibración previa y la posterior al ensayo no supera, asimismo, los 0,3 dB entre ambos valores.

La medición se realiza en las bandas de frecuencia de 1/3 de octava entre 100 Hz y 20.000 Hz, aunque el rango de interés para estas medidas está entre los 630 y los 20.000 Hz (que equivale al rango ISO de 100 a 3150Hz una vez se aplica el factor de escala).

La fuente acústica se excita mediante una señal de ruido de banda ancha (ruido rosa) en dos ubicaciones diferentes dentro de la cámara emisora. El sonido generado es estable y con un espectro continuo en el rango de frecuencias considerado, sin que existan diferencias de más de 6 dB entre bandas de 1/3 de octava adyacentes.

Las medidas de presión sonora, en bandas de tercio de octava, se repiten en 5 posiciones en cada recinto por cada posición de fuente. Se realizan, por lo tanto, un total de 10 medidas tanto en emisor como en receptor. El tiempo de promediado para cada posición de micrófono se ha fijado en 15 s, superando así los tiempos mínimos establecidos en la norma.

Las posiciones del micrófono se separan más de 120 mm entre sí, más de 80 mm de los bordes del recinto y más de 160 mm de la fuente sonora (ello equivale a más de 0,7 m entre posiciones de micro, más de 0,5 m de las paredes y más de 1 m de la fuente sonora).

Una vez efectuadas las distintas medidas del nivel de presión sonora en cada uno de los dos recintos, es posible calcular el nivel medio de presión sonora en cada recinto. Dado que se utilizan posiciones fijas de micrófono para muestrear el campo sonoro, los niveles de presión sonora medidos en cada posición se promedian de forma energética. De este modo el nivel medio vendrá dado por:

$$L_x = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad dB \quad (ec.3.5)$$

Donde, para cada una de las frecuencias de interés,

- $L_x$  [dB] es el nivel medio de presión sonora en un recinto, ya sea emisor ( $X = 1$ ) o receptor ( $X = 2$ ).
- $L_j$  [dB] es el nivel de presión sonora medido en  $n$  posiciones diferentes dentro del recinto.

A continuación se procede a la medición del ruido de fondo en la cámara receptora, con la fuente de emisión apagada, en 2 posiciones de micrófono diferentes.

Por último, el tiempo de reverberación en la sala receptora se ha calculado a partir de las curvas de caída de nivel de presión sonora, para dos posiciones de fuente y en tres puntos con dos lecturas cada uno, utilizando el método de la respuesta impulsiva integrada.

Para las medidas de tiempo de reverberación, las separaciones mínimas entre posiciones de micrófono y fuentes son las ya indicadas en el apartado 3.2.2.1, de acuerdo a las recomendaciones de la norma ISO 3382-2:2008.

El método descrito proporciona el valor del aislamiento acústico al ruido aéreo en función de la frecuencia. Dichos valores pueden transformarse, mediante un programa de análisis sonoro para acústica de edificios, en un número único que caracteriza sus cualidades acústicas, obteniéndose el índice  $R_w$  al aplicar la norma UNE-EN ISO 717-1.

### 3.3.2.- Equipos de medida

Los aparatos utilizados en la medición cumplen con las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011. El sistema de instrumentación (incluidos micros y cables) cumple con los requisitos de instrumento clase 1 de acuerdo a la norma [IEC 61672: 2014], así como los filtros respecto a la [IEC 61260: 2014]. Igualmente, el calibrador acústico es clase 1 según la [IEC 60942 2003]. Los equipos tienen su aprobación de modelo correspondiente y se calibran con periodicidad anual en un laboratorio metrológico bajo acreditación ENAC.

Los equipos utilizados han sido:

EQUIPO	MARCA	MODELO	Nº SERIE
<b>SONÓMETRO CLASE 1 ANALIZADOR MODULAR DE PRECISIÓN</b>	BRÜEL & KJAER	2260	02576729
<b>MICRÓFONO</b>	BRÜEL & KJAER	4189	2719591
<b>CALIBRADOR</b>	BRÜEL & KJAER	4231	02583663
<b>FUENTE SONORA</b>	Onmidireccional, en base a 6 altavoces JBL de 2,5"	Fabricación propia	NA
<b>AMPLIFICADOR</b>	Creative	Inspire 5.1	
<b>GENERADOR DE RUIDO</b>	Apple iPOD con archivo de ruido rosa	Apple	
<b>TERMOHIGROANEMÓMETRO</b>	TESTO	410-2	38506426

Tabla 3.2: Equipos utilizados

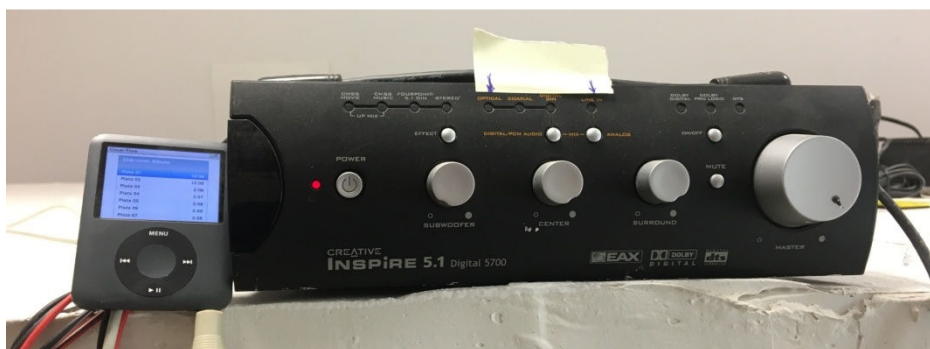


Figura 3.31: Generador de ruido (mp3) y amplificador.



Figura 3.32: sonómetro 2260 (con cable pasa puertas) y micrófono 4189.

Asimismo, se han utilizado los siguientes softwares para la adquisición y posterior tratamiento de datos:

- Módulo de acústica edificación BZ 7204 para sonómetros tipo 2260.
- Software para PC Qualifier Type 7830, v2.19.
- Software para PC 7815 Noise Explorer, v4.17.7.

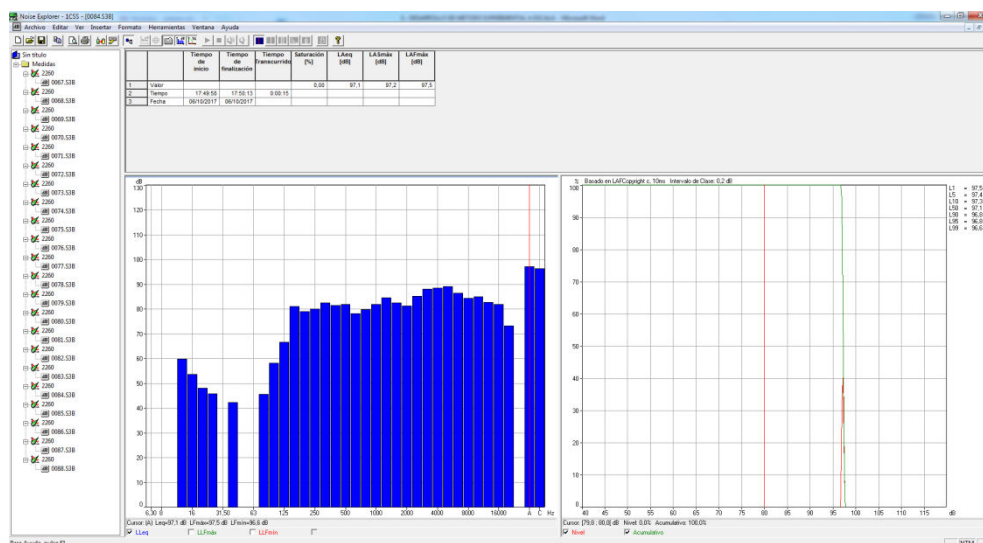


Figura 3.33: Software "Noise Explorer" mostrando uno de los espectros de ruido rosa medidos.

### 3.3.3.- Incertidumbre de las medidas

A la hora de expresar el resultado de cualquier medición de una magnitud física, es necesario dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado que permita comparar correctamente las mediciones entre sí o con otros valores de referencia. La incertidumbre de la medida es el parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores, y que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando (magnitud objeto de medición).

Para la medida del aislamiento a ruido aéreo en la acústica de edificios, con los conocimientos actuales, no es posible determinar las incertidumbres siguiendo los principios de la Guía [ISO/IEC 98-3], como sería preferible. Por ello, la norma [UNE-EN ISO 12999-1] incorpora los conceptos de *reproducibilidad* y *repetibilidad*, a partir de mediciones interlaboratorios para determinar dichas incertidumbres, siguiendo el método tradicionalmente usado en acústica en edificación.

Según esto, para una medida en laboratorio el mensurando viene definido por las normas pertinentes y la incertidumbre típica es igual a la desviación típica de reproducibilidad. Estos valores se recogen en la tabla 3.3

Frecuencia	Caso A	Caso A
Hz	$\sigma_{R95}$ dB	$\sigma_R$ dB
50	11,7	6,8
63	6,7	4,6
80	5,9	3,8
100	5,0	3,0
125	5,0	2,7
160	3,8	2,4
200	3,3	2,1
250	3,3	1,8
315	3,3	1,8
400	3,3	1,8
500	3,3	1,8
630	3,3	1,8
800	3,3	1,8
1 000	3,3	1,8
1 250	3,4	1,8
1 600	3,4	1,8
2 000	3,4	1,8
2 500	3,5	1,9
3 150	3,6	2,0
4 000	4,0	2,4
5 000	4,7	2,8

Tabla 3.3: Incertidumbres típicas asociadas al aislamiento a ruido aéreo, para el caso de laboratorio.  
 (fuente: norma UNE-EN ISO 12999-1)



La incertidumbre expandida se calcula para un nivel de confianza (ensayo unilateral) del 95%, siendo el factor de cobertura  $k$  igual a 1,65 (según lo recogido en la citada norma).

Dicha norma también establece en su punto 6 “Incertidumbres asociadas a los valores únicos” un método para valorar el límite superior de dichas incertidumbres, asumiendo un coeficiente de correlación de 1 entre los valores de banda de 1/3 de octava. Para el caso de medidas en laboratorio (caso A según la norma), la incertidumbre típica asociada al índice  $R_w$  es de 1,2 (tabla 3.4).

Descriptor	Caso A $\sigma_{R95}$ dB	Caso A $\sigma_R$ dB
$R_w, R'_w, D_{nw}, D_{nT,w}$	2,0	1,2

Tabla 3.4: Incertidumbres típicas para los valores únicos de la UNE-EN ISO 717-1, para el caso de laboratorio.  
(fuente: norma UNE-EN ISO 12999-1)

Para un nivel de confianza en un ensayo unilateral del 95%, y asumiendo una distribución Gaussiana de los valores del mesurando, el factor de cobertura  $k$  es igual a 1,65 (tabla 3.5).

Factor de cobertura $k$	Nivel de confianza para un ensayo bilateral %	Nivel de confianza para un ensayo unilateral %
1,00	68	84
1,28	80	90
1,65	90	95
1,96	95	97,5
2,58	99	99,5
3,29	99,9	99,95

Tabla 3.5: Factores de cobertura para diferentes niveles de confianza.  
(fuente: norma UNE-EN ISO 12999-1)

Por lo tanto, la incertidumbre expandida asociada al resultado de valor único  $R_w$  de los ensayos que se mostrarán en los capítulos posteriores es:

$$U = 1,65 \times 1,1 = 1,98 \text{ dB}$$

### 3.4.- Aplicación de escala al resultado de las medidas

En el punto 2.3.4. del capítulo anterior, se recoge el estudio sobre el escalado en acústica de edificación desarrollado por *Kling*, concluyendo que las curvas de aislamiento acústico obtenidas a escala reducida, y a escala real, deberían ser directamente comparables reemplazando el eje de frecuencias original por el escalado (ec.2.38).

Si además se ha seguido el criterio expuesto en el punto 3.2.1, siendo la escala escogida un cociente entre frecuencias centrales normalizadas de 1/3 de octava, dicho reemplazo de frecuencias es directo, tal y como se ilustra en la siguiente figura.

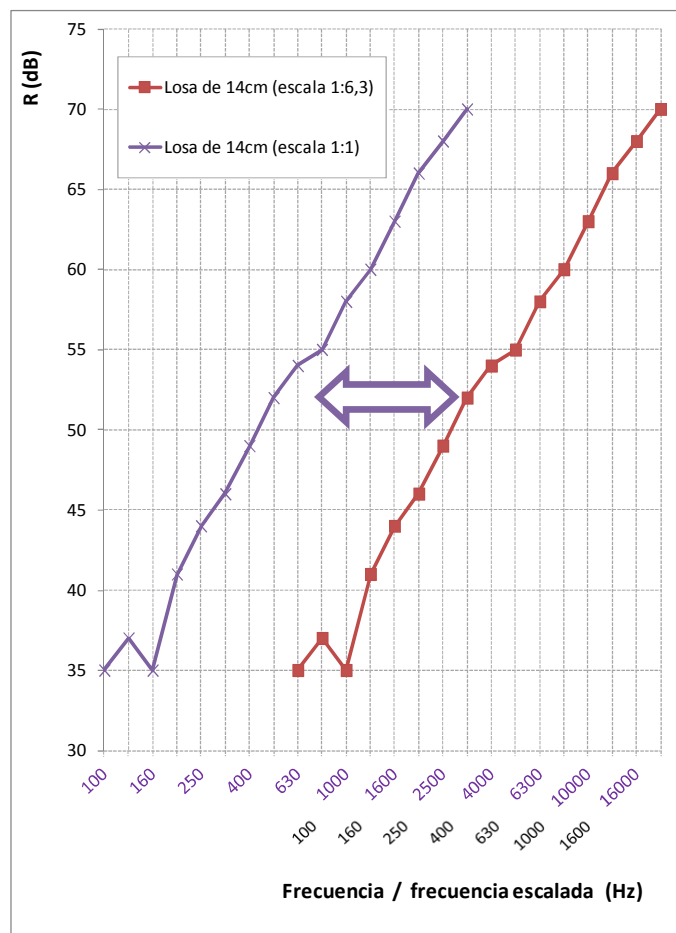


Figura 3.34: Escalado de una curva de aislamiento, desplazando directamente la curva a las frecuencias a escala (en este caso, 100 Hz reales equivales a 630 Hz).

En cuanto al tiempo de reverberación  $T$  de una sala, éste viene dado por la ecuación de *Sabine*, (ec.3.3). La constante 0,161 incluye la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente,  $V$  es el volumen de la sala y  $A$  el área de absorción equivalente.

*Kling* aplica la fórmula de *Eyring* para el cálculo del área de absorción. Sin embargo, para volúmenes no excesivamente grandes el coeficiente de pérdida por la propagación del sonido a través del aire “*m*” puede despreciarse. Por lo tanto, el área de absorción equivalente es la suma de cada superficie multiplicada por su coeficiente de absorción alfa:  $A = \sum S \times \alpha$ .

Suponiendo que “ $\alpha$ ” es invariante a las relaciones de escalamiento, entonces el área equivalente de absorción de sonido se escala como un área superficial. El volumen disminuye con la relación de  $1/n^3$  en el modelo. Por lo tanto “*T*” disminuye a razón de  $1/n$ .

$$T_m = \frac{1}{n} T_o \quad (\text{ec.3.6})$$

Ello es coherente con los bajos tiempos de reverberación medidos en la cámara a escala, que se recogen en la figura 3.19.

Sin embargo, el sumando de la ecuación 2.25, con la que se calcula el aislamiento a partir de los datos de presión sonora que tiene en cuenta la superficie de la muestra, toma el mismo valor, utilizando los valores de superficies a escala real y el tiempo de reverberación medido en esas condiciones, que escalando las superficies por el factor “*n*” y utilizando el tiempo de reverberación directamente medido en las cámaras a escala.

Por lo tanto, así como para el estudio de la acústica del interior de una sala el tiempo de reverberación medido sí debe de aplicar el factor de escala correspondiente para traducirlo a la situación real, en el caso de la transmisión entre recintos es necesario utilizar el dato bruto medido a escala.

### **3.5.- Corrección de los valores obtenidos**

Los datos de difusividad de las cámaras recogidos en la figura 3.25 muestran como, por debajo o incluso en el entorno de los 630 Hz (100Hz a escala), la difusividad era más alta de lo deseable. Ello es así debido al propio tamaño de las cámaras. Por lo tanto, las mediciones realizadas por debajo de dicha frecuencia no son fiables, al poder estar influidas por los modos propios de las cámaras.

En aquellos casos en los que el espesor de la muestra es escalable, como son las muestras de hormigón que se analizan en el capítulo 4, y cuya validación de resultados se desarrolla en el punto 3.6.3, no hay tal problema. Y esto es así porque, tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, directamente la frecuencia de 630 Hz pasa a ser 100 Hz (primer 1/3 de octava en las medidas habituales), considerando que los datos son aplicables a un elemento de 6,3 veces el espesor de la muestra bajo ensayo (por ejemplo: el aislamiento de una muestra de 27 mm equivale al que tendría una losa de 170 mm en la realidad).

Sin embargo, en otros tipos de muestras como los yesos del capítulo 5, dicho escalado no tiene la misma aplicabilidad. Esto es así ya que un dato de aislamiento obtenido para unos espesores de elemento que no van a existir en la realidad tiene, exclusivamente, utilidad para la comparación cualitativa entre diversos materiales o dosificaciones, pero adolece del dato práctico del aislamiento real (cuantitativo) del elemento en cuestión.

Para solventar dicha eventualidad se propone realizar en estos casos un enfoque mixto entre estimación teórica y datos experimentales. Tal y como se ha visto en el punto 2.3.2, por debajo de la frecuencia crítica del elemento el aislamiento puede estimarse únicamente a partir de la masa superficial, que es precisamente el más sencillo de los parámetros a medir. Por lo tanto, siempre que en el ensayo en las cámaras a escala se identifique la frecuencia crítica del elemento, los valores por debajo de ella pueden corregirse de forma teórica aplicando la ecuación 2.8 o la 2.11. Con lo cual se obtiene una curva de aislamiento suficientemente ajustada a la verdadera, sin tener que realizar un escalado de la frecuencia (ni del espesor), y por lo tanto obteniendo el dato cuantitativo real.

Para saber si un pico en el aislamiento obtenido en el ensayo corresponde, o no, a la frecuencia crítica, el orden de magnitud del valor de esta puede obtenerse de forma aproximada calculándolo, por ejemplo, con los datos de la tabla 2.2 o similares. Los

aislamientos medidos en la zona de coincidencia y frecuencias superiores son, por lo tanto, válidos (siempre que estén por encima de los 630 Hz, obviamente) sin necesidad de haber medido la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, o el amortiguamiento (*loss factor total*) de la muestra.

La propuesta metodológica se ilustra con el ejemplo de la figura 3.35, correspondiente al ensayo de una placa de yeso de 15 mm de espesor. Aplicando la ecuación 2.17, y tomando como dato aproximado el obtenido en la tabla 2.2 de  $C_L = 1490$  m/s, la frecuencia crítica se estima en 2941 Hz, coherente con lo que refleja el resultado del ensayo. Por lo tanto, sabemos que, por debajo de la zona de caída en el aislamiento provocada por el efecto de coincidencia, la masa es el parámetro principal, de modo que el aislamiento se puede estimar a partir de la ley de masas, siendo el valor que se da por bueno por debajo de los 630 Hz (línea verde) que marcan el límite de difusividad aceptable de las cámaras a escala.

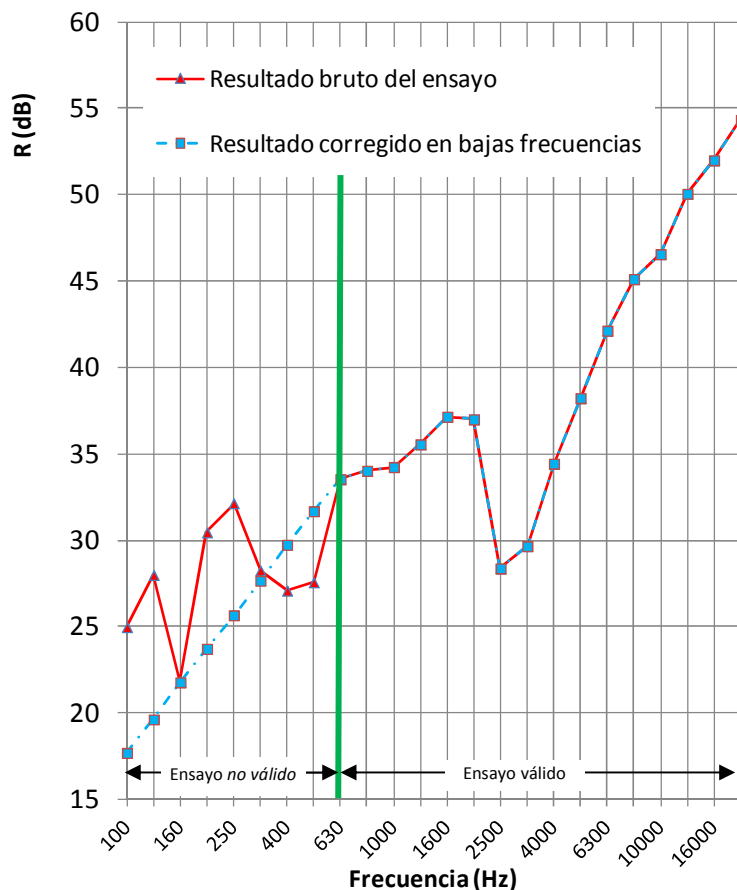


Figura 3.35: Ensayo corregido de forma teórica por debajo de la zona de validez de medida de las cámaras.

Puede observarse como en el “ensayo en bruto”, por debajo de los 630 Hz aparecen picos en el aislamiento, posiblemente debidos a los modos propios de las cámaras. Se corrige por lo tanto dicha zona con la línea recta obtenida de la ley de masas.

## 3.6.- Validación de resultados

Una vez están diseñadas, construidas y ajustadas las cámaras, se ha establecido el procedimiento de medida y determinado los equipos a utilizar. La fase final del trabajo consiste en la validación de los resultados de aislamiento que se obtienen en las cámaras a escala.

Para ello se han realizado pruebas sobre diversos materiales, testando la idoneidad de las mediciones realizadas en cada caso.

### 3.6.1.- Validación en vidrios

Para las pruebas iniciales se eligió un material homogéneo y de fácil manejo como es el vidrio, en este caso en espesores nominales de 4 y 8 mm. Debido al factor de escala, los valores medidos serían ciertos para unos vidrios macizos de espesores 25,2 y 50,4 mm, respectivamente, lo cual no es representativo de un elemento constructivo “real”. Por lo tanto, en este primer caso no se aplica realmente el factor de escala y los resultados se presentan a escala real, sabiendo que las dimensiones de muestra y cámaras no son en este caso las estrictamente adecuadas y realizándose, en definitiva, la corrección teórica que se ha propuesto en el apartado 3.4.



Figura 3.36: Muestra de vidrio de 8mm durante su ensayo.

Se han medido las dimensiones y peso de ambas muestras, obteniendo los siguientes valores:

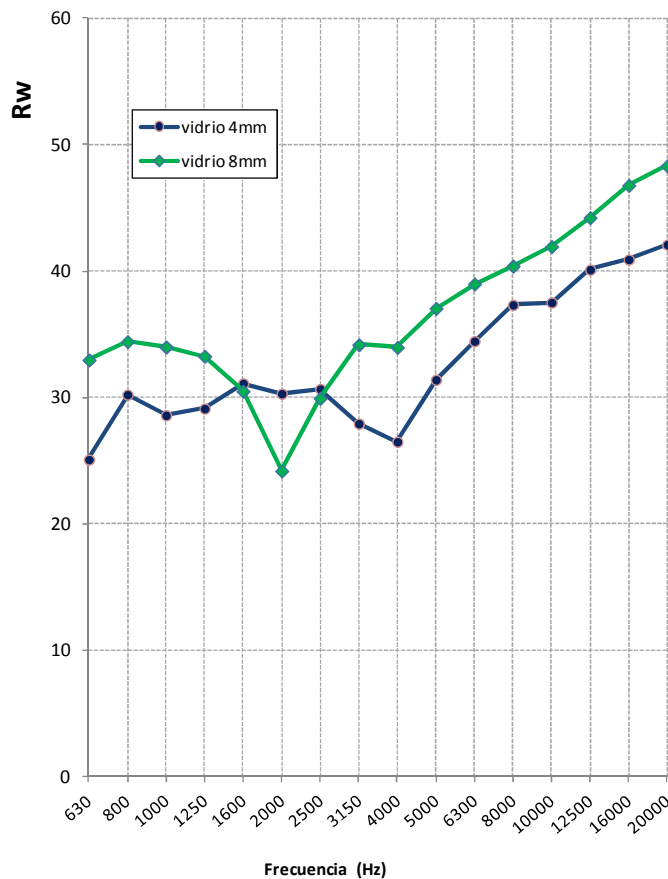
Muestra	Espesor (mm)	Peso (kg)	Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )
<b>A</b>	3,85	2,830	9,7
<b>B</b>	7,8	5,597	19,1

Tabla 3.6: Espesores y masas de las muestras de vidrio.

Otras propiedades acústicamente relevantes no han podido medirse directamente, de forma que se toman valores habituales encontrados en la bibliografía para este material:

- Velocidad de propagación de las ondas longitudinales  $C_L \approx 5000$  a  $5400$  m/s
- Módulo de Poisson  $\mu$ : entre 0,18 y 0,3
- Módulo de Young  $\approx 72.000$  MPa

Se muestran en la figura 3.37 los aislamientos obtenidos a partir de la frecuencia de 630Hz (frecuencia que marca el inicio del campo acústico razonablemente difuso y, por lo tanto, valor a partir del cual los resultados son confiables).



	vidrio 4mm	vidrio 8mm
100	25,8	25,0
125	23,2	23,5
160	12,5	13,0
200	23,0	28,2
250	29,1	26,8
315	22,2	21,6
400	21,8	27,0
500	22,2	27,5
630	25,1	33,0
800	30,2	34,4
1000	28,6	34,0
1250	29,1	33,3
1600	31,1	30,5
2000	30,3	24,2
2500	30,7	30,0
3150	27,9	34,2
4000	26,5	34,0
5000	31,4	37,1
6300	34,5	39,0
8000	37,3	40,4
10000	37,5	41,9
12500	40,1	44,2
16000	40,9	46,8
20000	42,1	48,3

Figura 3.37: Resultados en frecuencias para los vidrios de 4 y 8mm.

Como puede observarse, los resultados son coherentes entre sí y con los valores esperados: las gráficas muestran claramente una frecuencia crítica marcada en un tercio de octava concreto, que coincide con el valor de frecuencia esperado aplicando la fórmula 2.14 con los datos antes mencionados. Asimismo, al doblar el espesor, la frecuencia crítica se reduce a la mitad como era también esperable.

La pendiente de las dos curvas, por encima de la frecuencia crítica, es de aproximadamente 6 dB/oct en ambos casos, tal y como se muestra en la figura 3.38, aunque sería esperable que fuera del orden de los 9 dB/oct:

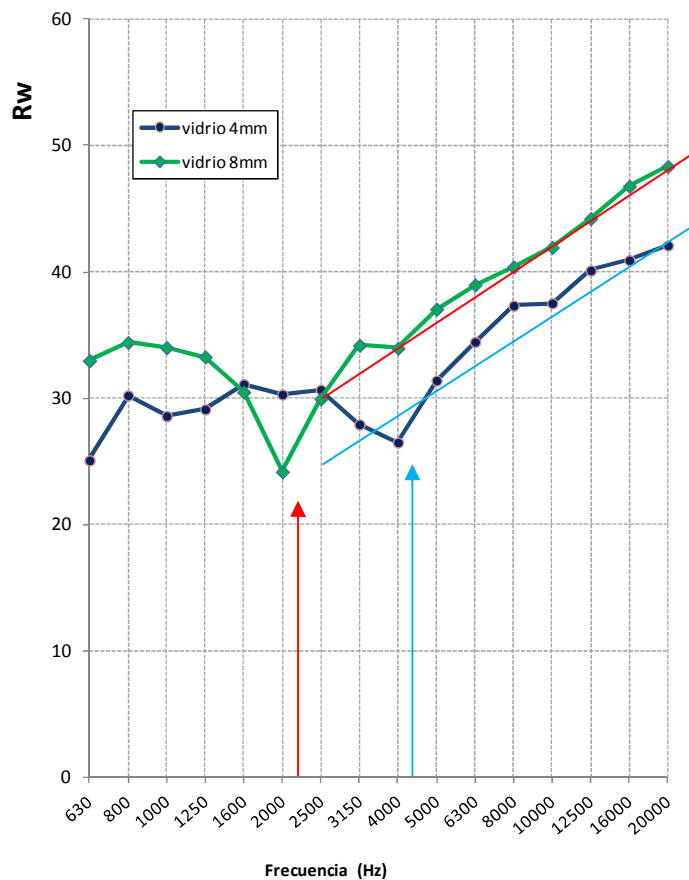


Figura 3.38: Al doblar el espesor, la frecuencia crítica se reduce a la mitad. La pendiente a partir de dicho punto es igual en ambos casos.

En cuanto a los valores absolutos medidos, no se alejan de los existentes en la bibliografía para dichos materiales. Hay que remarcar en todo caso que, evidentemente, existen también discrepancias entre diferentes fuentes al respecto del aislamiento acústico de cualquier elemento, debidas a la propia naturaleza ya explicada de las instalaciones y metodología de medida del aislamiento acústico. No existe por lo tanto un valor de referencia absoluto contra el que poder compararse. Por ejemplo, en el caso de los ensayos interlaboratorios, los valores de referencia se fijan mediante un valor de



consenso obtenido estadísticamente a partir de los resultados de los propios participantes.

La figura 3.39 muestra los resultados del ensayo del vidrio de 4 mm frente a referencias promedio y de menor y mayor aislamiento encontradas para dicho elemento. Como se puede observar, la coherencia de los resultados es mala por debajo de los 630 Hz, debido a la ya citada falta de difusividad por el tamaño de las cámaras y de la muestra. Sin embargo, por encima de este valor los resultados de las mediciones están en la horquilla de valores esperada.

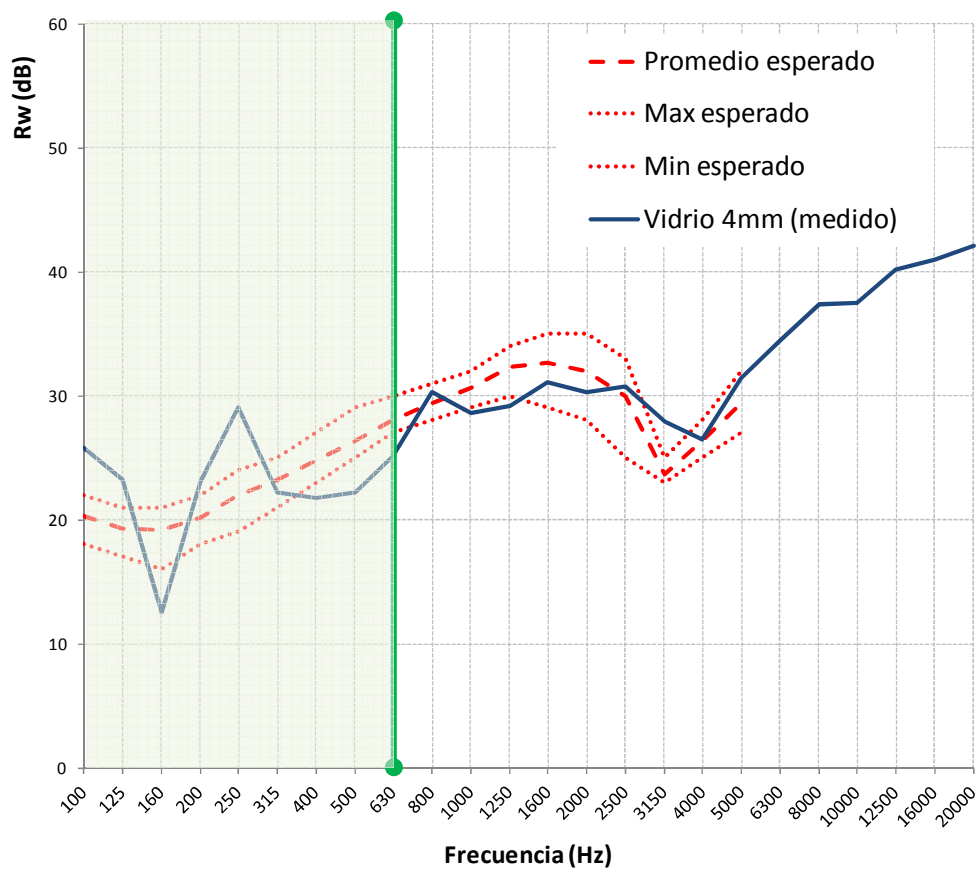


Figura 3.39: Valores en frecuencias obtenidos frente a datos bibliográficos.

Si por debajo de los 630 Hz se aplica la corrección teórica propuesta, los resultados combinado estimación y medida a escala se ajustan mucho mejor a los datos esperables, tal y como se ve en la figura 3.40.

La frecuencia crítica en este caso está en el siguiente tercio de octava. Ello es debido, probablemente, a diferencias entre las propiedades mecánicas o las dimensiones reales de los distintos vidrios ensayados en uno y otro caso, que pueden mover el valor entre una banda y la adyacente.

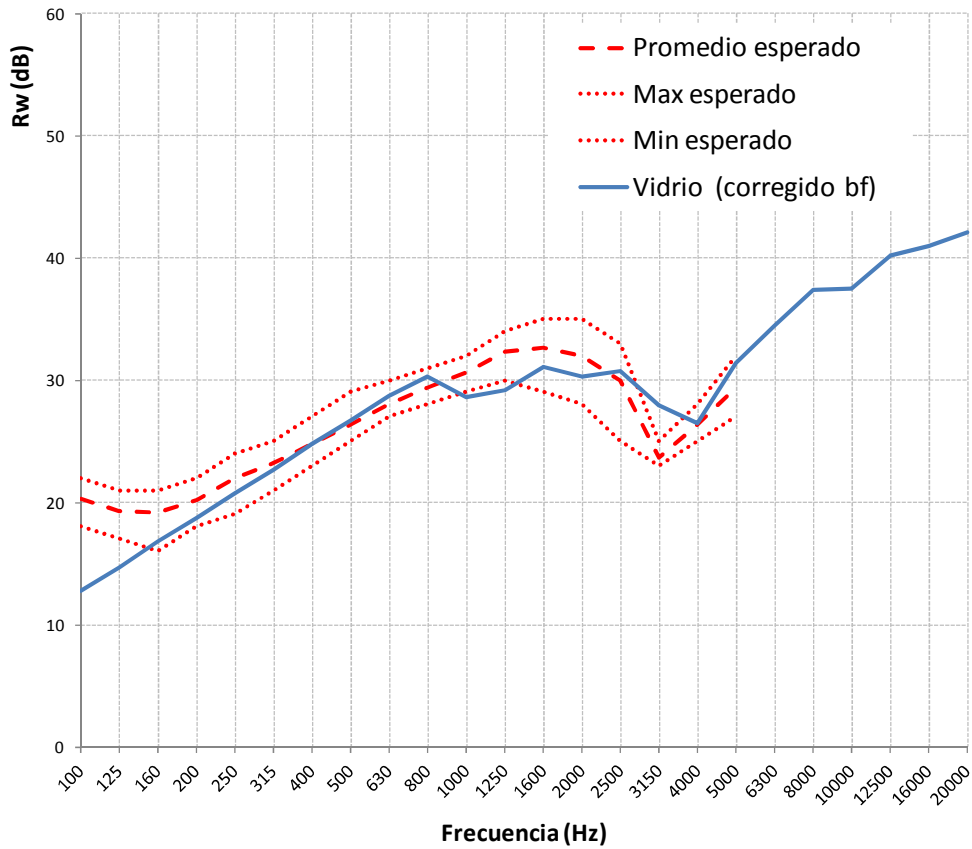


Figura 3.40: Valores corregidos por debajo de la zona de medición de las cámaras.

En la figura 3.41 se muestran unos valores de aislamiento en frecuencias entre 100 y 5 kHz, donde sí se aprecia una frecuencia crítica que se ubica en la misma banda que en los resultados obtenidos en las cámaras a escala (figura 3.38). Los valores de aislamiento en frecuencias son también del mismo orden a los medidos en la cámara a escala.

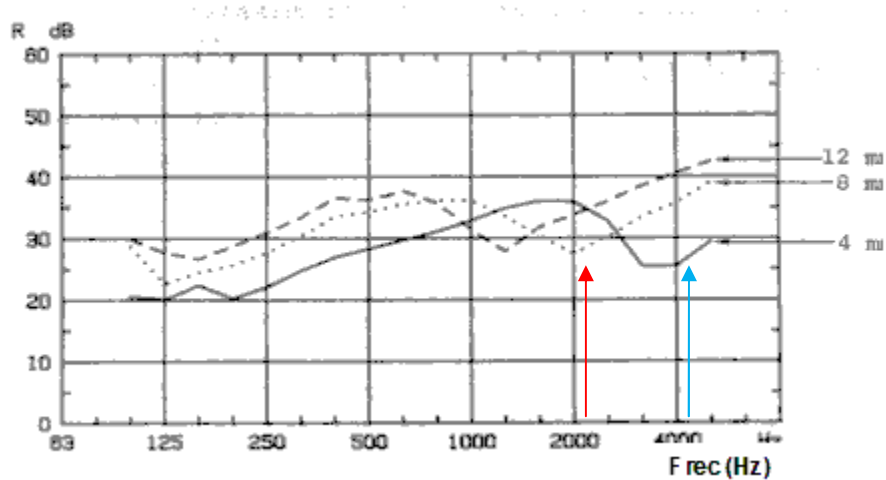


Figura 3.41: Datos disponibles sobre aislamiento en muestras similares.

### **3.6.2.- Validación en yesos**

El punto anterior buscaba principalmente comparar, de forma cualitativa, los resultados de dos materiales iguales con diferentes espesores, con resultados que se valoran como correctos, también incluso a nivel cuantitativo en el rango válido para estas cámaras.

En este punto, lo que se quiere es comparar dos materiales similares y del mismo espesor, de forma que queda validado si el método es capaz de detectar diferencias, relativamente pequeñas, en el aislamiento acústico, lo cual es de gran interés a la hora de abordar el resto de capítulos de la presente Tesis Doctoral.

Para ello se ha comparado el aislamiento de dos placas de yeso laminado (en adelante, PYL), empleadas habitualmente para la construcción de tabiquerías en seco y del mismo espesor nominal de 13 mm: una básica (*Knauf Standard A*) y otra de prestaciones acústicas supuestamente mejoradas (*Placo Phonique 13*, que fue la usada para la ejecución del propio laboratorio).

Las placas estándar, consistentes en un alma de yeso natural recubierto en sus dos caras por una lámina de celulosa especial, se utilizan en cualquier unidad de obra en interior, como aplacado de cierre de los sistemas de construcción en seco sin requerimientos especiales. En el caso de la placa *Phonique* el fabricante afirma (<https://www.placo.es/es/products/placa-acustica/placophonique>) que, mediante la modificación durante el proceso de rehidratación de las propiedades del yeso de su alma (menor módulo de elasticidad y mayor densidad), se incrementa el aislamiento acústico de los sistemas constructivos en los que se emplee hasta en 3 dB, en comparación con los resultados que obtienen los mismos sistemas con placas de yeso laminado estándar.

En ambos casos, el espesor medido es idéntico e igual a 12,6 mm. La densidad superficial de la placa estándar es igual a 8,9 kg/m<sup>2</sup>, frente a los 12,3 kg/m<sup>2</sup> medidos para la placa *Phonique* (un 38% superior). En los dos casos la masa medida ha sido algo superior a la declarada por el fabricante, que será un dato obtenido probablemente en unas condiciones específicas de humedad.

Los resultados obtenidos en el rango de frecuencias se presentan en la figura 3.42, ambos materiales tienen una frecuencia crítica en el mismo 1/3 de octava (banda de 3150 Hz), lo cual es lógico tratándose de materiales similares de igual espesor. Por lo demás, las curvas de aislamiento son prácticamente paralelas con una diferencia, a favor de la placa

*Phonique*, que es del orden de los 3-4 dB por debajo de la frecuencia crítica, prácticamente nula en el entorno de dicha frecuencia y algo menor a los 3 dB por encima de ella.

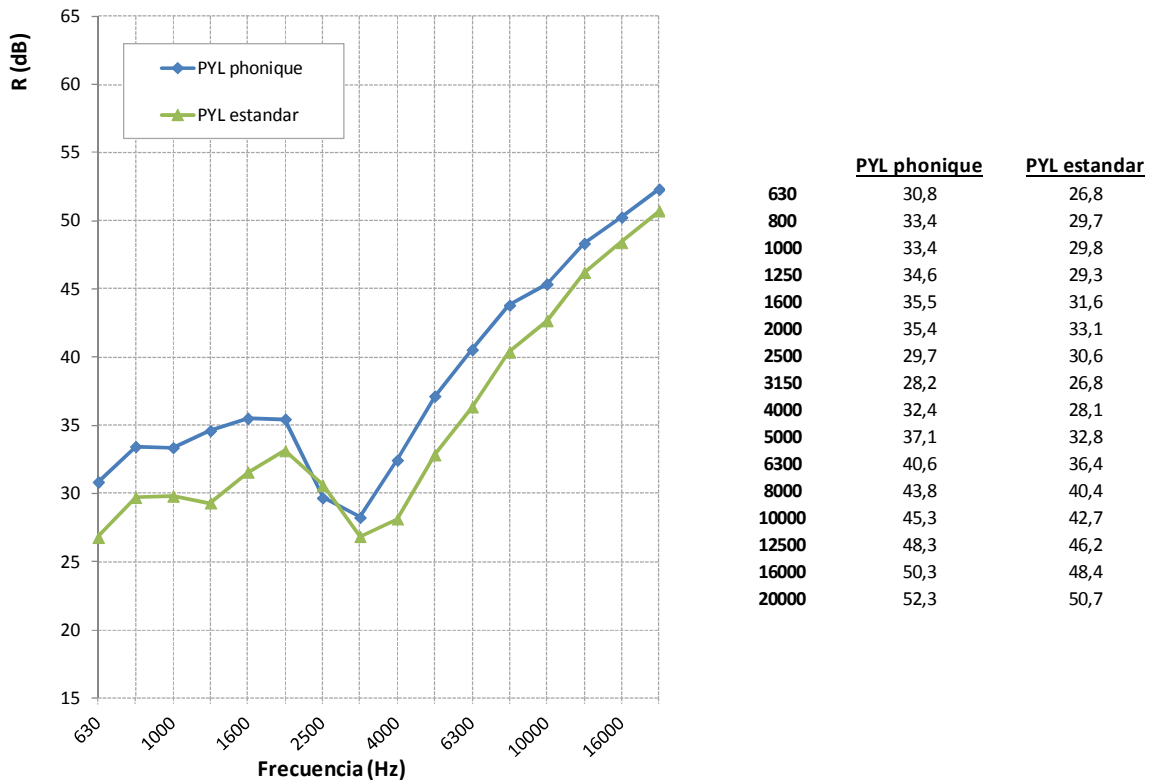


Figura 3.42: Aislamiento a ruido aéreo de una placa estándar frente a otra de prestaciones acústicas mejoradas, ambas con el mismo espesor.

En el índice global ponderado  $R_w$  la diferencia entre ambas placas es de 2,7 dB, valor prácticamente igual al declarado por el fabricante Placo como mejora aproximada de su producto frente al estándar.

Por lo tanto, se ha comprobado que los resultados obtenidos en las cámaras a escala permiten la comparación entre materiales similares en igual espesor, pero con diferentes prestaciones en su aislamiento debidas a su composición interna.

### 3.6.3.- Validación en hormigones

El último paso es, finalmente, realizar una validación definitiva con elementos escalables. Es decir, utilizar muestras para ensayar que estén también a la misma escala que las propias cámaras de transmisión para, de ese modo, aplicar el factor de escala a todo el proceso y obtener el aislamiento en el rango de interés en acústica en edificación, entre los 100 y los 3150 Hz.

La figura 3.43 muestra por ejemplo varias de estas muestras almacenadas tras su ensayo. El cuaderno, de tamaño A4 con anillas, se ha colocado a modo de referencia de las dimensiones de las placas. De esta forma, muestras de hormigón de espesores del orden de los 25 mm (como las que se evaluarán en el siguiente capítulo) equivalen a soluciones constructivas usuales como son muros de carga de hormigón de 150 o 160 mm en escala real. Volviendo a la figura 3.1 en comparación con la figura 3.43, se aprecia mejor la clara ventaja que supone el uso de muestras a escala para el desarrollo de nuevos materiales.



Figura 3.43: Muestras de hormigón almacenadas tras su ensayo.

Los valores de referencia para tener una comparativa, presentados en la figura 3.44, se toman de la base de datos del software de cálculo acústico *Acoubat*, desarrollado por el CSTB, que dispone de datos en frecuencias del aislamiento a ruido aéreo de elementos de hormigón macizo en diversos espesores. Al igual que en los casos anteriores hay que tener en cuenta, a la hora de comparar los resultados frente a los medidos en

laboratorios diferentes, la influencia de las condiciones de contorno en cada instalación, que además se acentúa conforme aumenta la masa de los elementos a medir.

La figura 3.45, por ejemplo, compara los aislamientos medidos para una losa de 15cm en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco, frente a los valores obtenidos para una losa de 16cm en el CSTB. Ambas instalaciones cumplen los requisitos de la norma y están acreditados por el organismo correspondiente. Sin embargo, las diferencias son a veces notables.

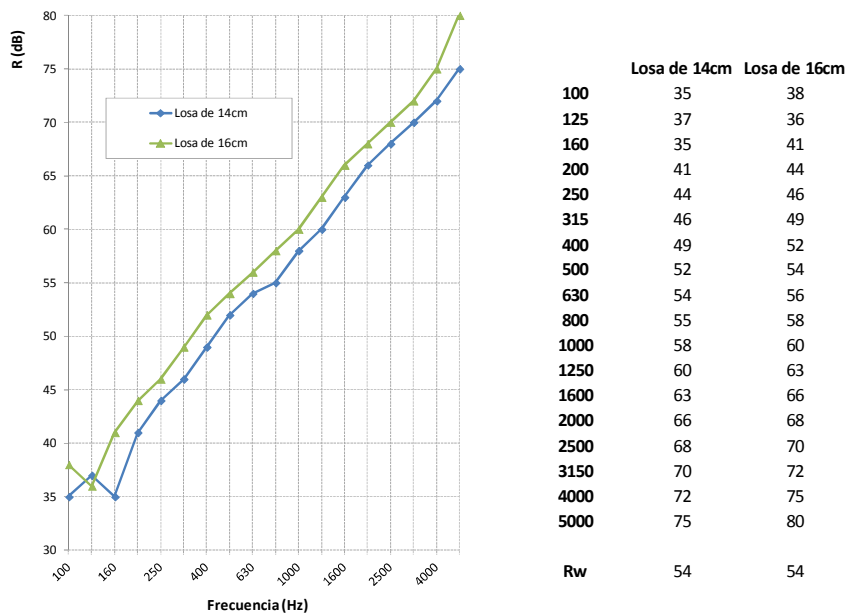


Figura 3.44: Valores de referencia (R, en dB) para las muestras de hormigón (datos a escala real).

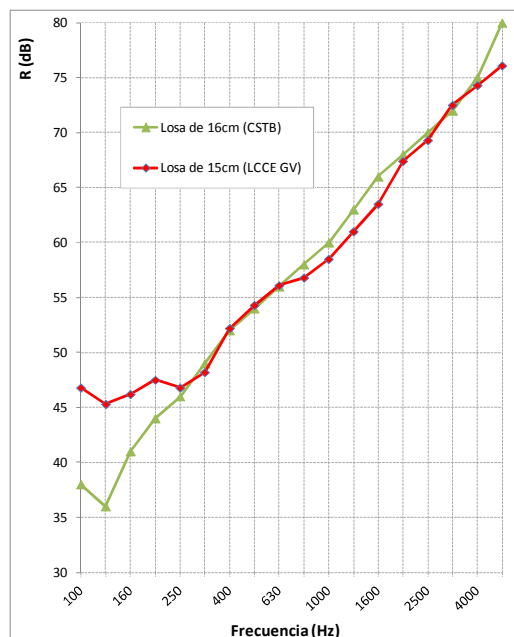


Figura 3.45: Valores de de aislamiento para dos muestras similares de losas de hormigón, en dos laboratorios acreditados diferentes.

Centrándonos ya en los ensayos de validación, indicar que se han realizado en el laboratorio muestras de distintos tipos de hormigones, tanto bombeables como autocompactantes. Una descripción más exhaustiva de dichas amasadas puede encontrarse en el capítulo 4 de la presente Tesis Doctoral. A los efectos de la validación buscada en esta parte del documento, es suficiente indicar que se trata de dosificaciones habituales, con áridos naturales y una densidad final de entre 2200 y 2300 kg/m<sup>3</sup>. En ambos casos se realizaron dos muestras para cada tipo de hormigón.

La figura 3.46 muestra por ejemplo el resultado obtenido para el caso del hormigón autocompactante. Los resultados se muestran ya escalados, de forma que corresponden a un muro de unos 170 mm de espesor. Los ensayos se realizaron con una diferencia temporal de 2 meses entre ellos. Como puede observarse, ambas curvas de aislamiento son prácticamente iguales. La diferencia en la frecuencia más alta puede ser achacable a un problema de ruido de fondo no detectado durante la medida y/o a un sellado perimetral entre muestra y marco imperfecto (tema que se aborda en mayor profundidad en el siguiente punto).

Fuera de esta desviación puntual, los resultados obtenidos muestran una repetibilidad muy satisfactoria en los ensayos realizados, lo cual es un dato importante.

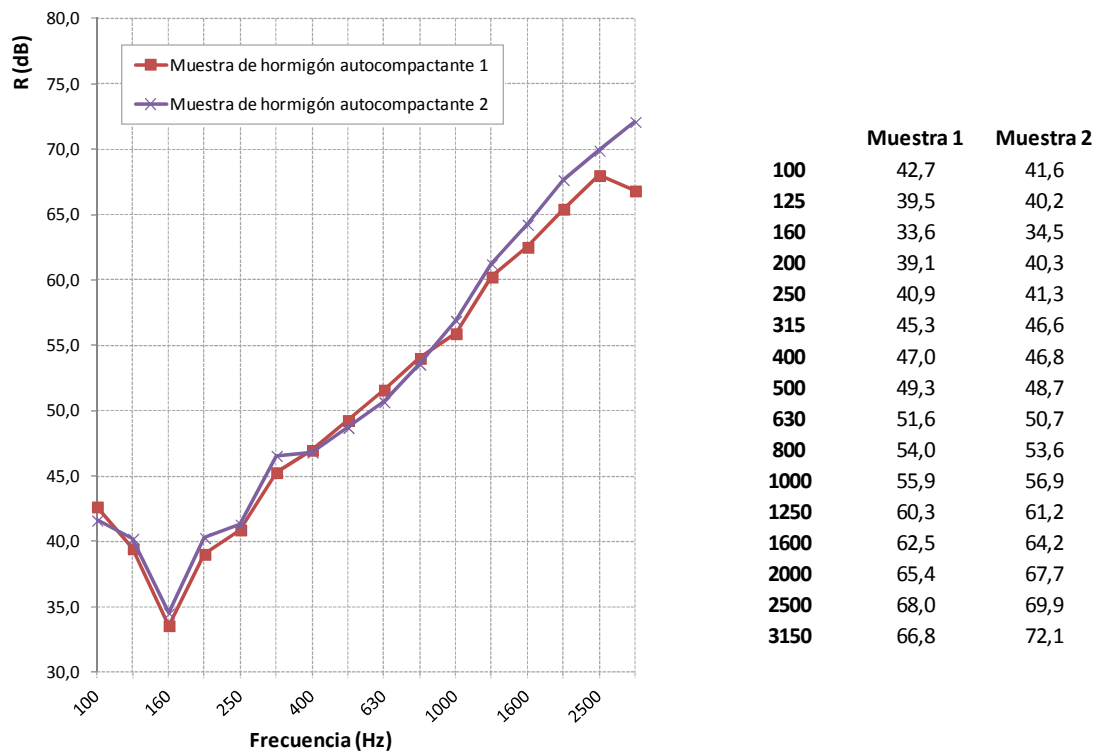


Figura 3.46: Valores de de aislamiento para dos muestras diferentes de la misma amasada de hormigón autocompactante.

En lo referente a los valores cuantitativos obtenidos, la figura 3.47 muestra la comparación entre un hormigón bombeable y otro autocompactante, ensayados a escala, frente al resultado a tamaño real obtenido para una losa de 160 mm. Aún desconociendo la composición del material ensayado a escala 1:1, se puede observar cómo la frecuencia crítica coincide con la detectada para el hormigón bombeable. La del hormigón tipo autocompactante es algo mayor, lo cual puede explicarse en función de sus propiedades mecánicas, lo que será objeto de un mayor análisis en el capítulo 4. Asimismo, las pendientes de las curvas de aislamiento son muy similares para los tres casos.

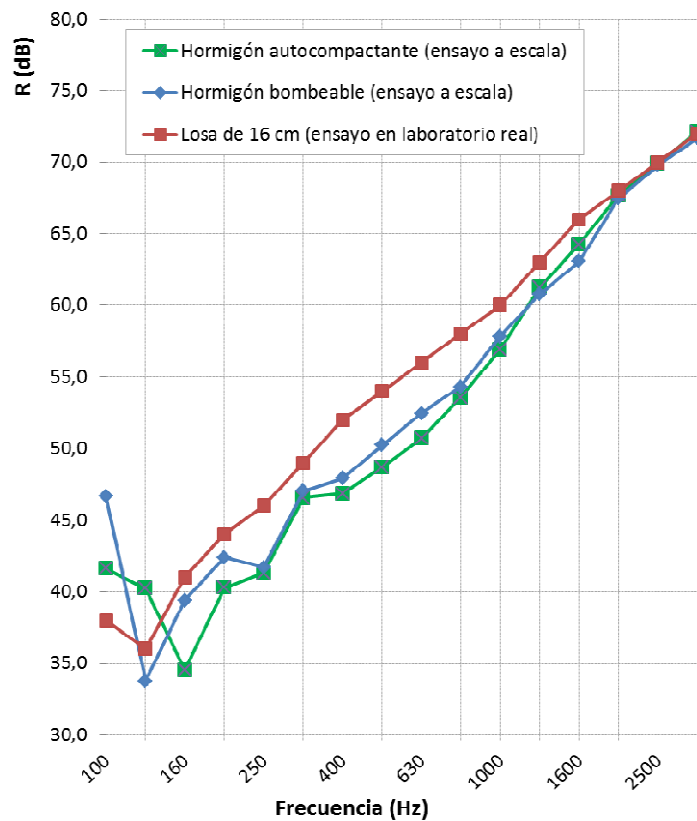


Figura 3.47: Valores de de aislamiento para las muestras de hormigón bombeable y autocompactante, frente al valor de referencia.

Los valores obtenidos para las muestras a escala están por debajo de la del laboratorio a escala real, lo cual es coherente con lo expuesto en el punto 2.3.3 y en el 3.2.2.5, relativos a la influencia del *coupling loss factor* y de la construcción en madera del marco portamuestras sobre el aislamiento medido en estas cámaras.

A la vista de estos resultados, se da por concluido satisfactoriamente el proceso de validación de las cámaras y metodología de ensayo acústico a escala, ya que ha quedado demostrado que se obtienen valores coherentes tanto cualitativa como



cuantitativamente, con una alta repetibilidad y especialmente válidos para la comparación entre materiales para su desarrollo y mejora acústica.

### **3.6.4.- Pruebas fallidas**

Aunque el escalado experimental ha demostrado óptimas cualidades para su uso en investigación y desarrollo de materiales, es necesario incidir sobre dos aspectos que han tenido una importancia relevante en el resultado obtenido en los ensayos: el correcto sellado perimetral de las muestras respecto al marco y la importancia de su integridad estructural.

En lo referente al sellado, sería esperable que el espacio entre marco y muestra fuese mínimo ya que ambos tienen nominalmente las mismas dimensiones (siendo el marco ligeramente mayor para permitir la colocación de la muestra). En estos casos, un pequeño cordón de silicona para asegurar la estanquidad en ambos lados de la muestra es suficiente. Esta situación se da siempre en las muestras de vidrio o de PYL, que se cortan a la medida exacta correspondiente. Y también en muchas de las muestras de hormigón, para las que se han realizado unos encofrados específicos.

Sin embargo, en la realidad se ha constatado cómo las tolerancias de fabricación de dichos encofrados afectan a esta situación ideal, tanto con probetas que dejan demasiado espacio entre ellas y el marco portamuestras, como en el caso contrario, donde ha sido necesario aplicar un lijado para rebajar ligeramente ese marco. En la primera situación, aunque el espacio entre muestra y marco no sea apenas superior a 3 mm, el sellado con silicona no es suficiente para evitar un puente acústico a las frecuencias más altas del rango de medida. Se hace necesario, por lo tanto, un sellado más cuidadoso, con el relleno de lana de roca en el citado hueco (introducida a presión con ayuda de una espátula, después de haber sido costada a la medida necesaria), así como el posterior recubrimiento de los citados cordones de silicona con cinta plástica textil (figura 3.48).



*Figura 3.48: Tolerancia entre una muestra y el marco y sellado correcto de la misma.*

La influencia de dicho sellado es muy significativa, tal y como se puede observar en la figura 3.49, que muestra los resultados de un ensayo sobre la misma muestra con un sellado normal (únicamente con cordones de silicona, pero que se considera suficiente) y otro con silicona, cinta y lana de roca.

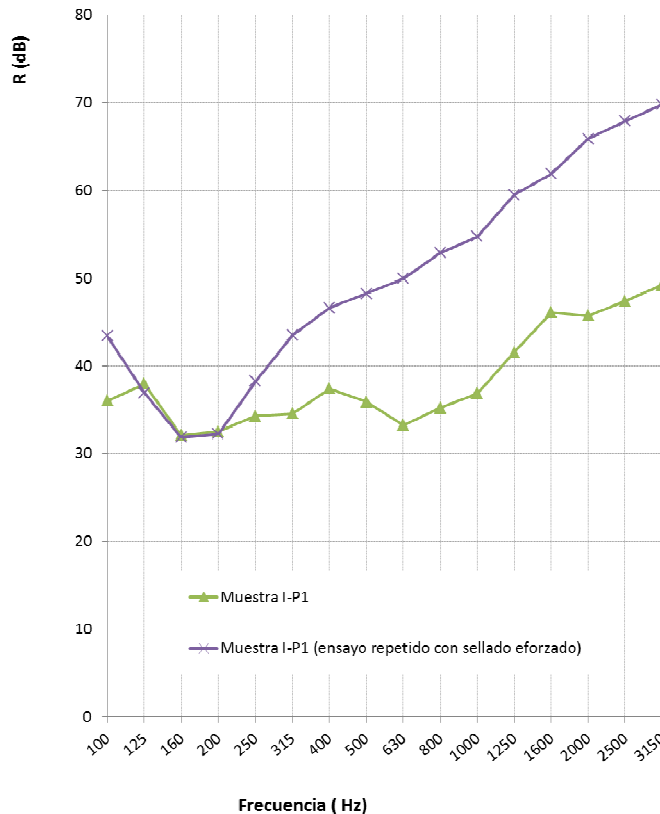


Figura 3.49: Influencia de un sellado deficiente en el resultado del ensayo.

Para poder garantizar la fiabilidad de los resultados medidos, se tomó la decisión de ejecutar un sellado reforzado en todos los ensayos que se realizasen y, adicionalmente, repetir por precaución aquellos que se habían realizado anteriormente (lo cual era una posibilidad gracias a las características de las cámaras a escala, aun cuando hubieran pasado varios meses desde los ensayos iniciales).

El segundo aspecto a destacar en este punto, relativo a la integridad estructural de las muestras, está también relacionado en cierto modo con las tolerancias de fabricación de las muestras de hormigón. Una muestra (de hormigón bombeable, con áridos naturales) tenía un tamaño prácticamente idéntico aunque muy ligeramente superior a las dimensiones interiores del marco. Buscando evitar su rebaje, se forzó su encaje dentro del mismo con el resultado de una fisura en la muestra en cuestión. La grieta afectaba sólo a una de las esquinas, aunque era visible desde ambos lados de la muestra. Buscando evitar fugas acústicas a través de dicha fisura se selló cuidadosamente la misma mediante

pasta de escayola (ver figura 3.50). La grieta quedaba en cualquier caso cerrada por la propia presión del marco portamuestras.



Figura 3.50: Muestra fisurada durante su manipulación y reparación realizada.

Por supuesto, el perímetro de la misma se ejecutó con un sellado reforzado. Sin embargo, al ensayar dicha muestra, el resultado fue el que se muestra en la figura 3.51, junto al de otra muestra idéntica a la fisurada (“rota”):

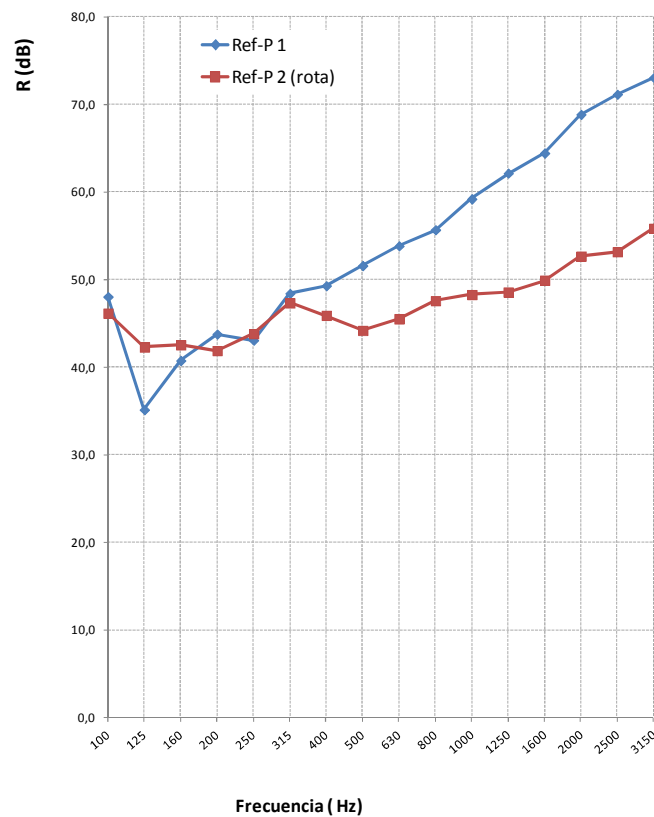


Figura 3.51: Influencia de la presencia de fisuras en la muestra sobre el valor de aislamiento medido.

Dada la buena repetibilidad entre muestras, que se ha mostrado anteriormente en la figura 3.45 y que se ha repetido también en todas y cada una de las muestras duplicadas que se han ensayado, es evidente que la fisura en la muestra afecta de forma significativa (y negativa) al aislamiento medido.

Las razones de esta caída en el aislamiento deben ser objeto de un análisis más profundo, que queda fuera del alcance de la presente investigación. No obstante es interesante señalar el interrogante que abre ya que es una situación muy singular que no se ve en laboratorio en circunstancias habituales (pues las muestras no se ven sometidas a cargas que las puedan fisurar, ni había motivo hasta la fecha para ensayar un elemento fisurado) y no está por lo tanto estudiado su efecto. Sin embargo, no es difícil imaginar una situación de obra real donde asentamientos, sobrecargas o defectos estructurales provoquen fisuras en tabiques, medianeras o paños de fachada, afectando quizás, en función de lo visto en este ensayo, a su aislamiento acústico pese a no tener mayor relevancia desde el punto de vista de la integridad del elemento.

## **3.7.- Conclusiones**

Las cámaras de transmisión acústica a escala diseñadas y ejecutadas funcionan de manera óptima, obteniéndose resultados válidos tanto cuantitativa como cualitativamente. Se ha demostrado que funciona, pese al muy escaso desarrollo que han tenido tradicionalmente. Quizás ello se debe a que siempre se ha pensado más en productos de construcción –ladrillos/bloques, trasdosados con perfilierías, etc.- que en el desarrollo de nuevos materiales.

Si se quiere hacer un escalado sencillo, las escalas válidas a la hora de hacer unas cámaras para medir aislamientos deben de ser cocientes de las bandas centrales de 1/3 de octava usadas en edificación.

1:6,3 es la escala más pequeña viable. Roza ya el límite de pasarse de los 20 kHz, donde ni los micros ni los altavoces “normales” tienen respuesta (ya que por encima de dicha frecuencia está el límite superior del oído humano). De esta escala hacia abajo habría que pasar a 1:5. Pero, a su vez, ello implica que las muestras construidas también a escala no son manejables, pues alcanzarán masas de entre 30 y 35 kg cada una. Dicho de otro modo, en realidad 1:6,3 es “*La Escala*”.

Al contrario que en el caso del estudio mediante modelos a escala de la acústica del interior de una sala, donde al tiempo de reverberación medido se le debe aplicar el factor de escala correspondiente, para traducirlo a la situación real, para los ensayos de transmisión entre recintos es necesario utilizar el dato bruto medido.

Uno de los problemas principales de las cámaras a escala, que es la falta de difusividad a frecuencias bajas debido a su tamaño, puede solventarse en muchas ocasiones de interés mediante el enfoque mixto propuesto combinando estimación por ley de masas en bajas frecuencias y medida a escala en frecuencias medias y altas.

Los valores absolutos están en el orden de magnitud esperado, siendo menores a los medidos en muchos laboratorios, porque se ha priorizado la facilidad de ejecución y movilidad posterior sobre la obtención de un valor de aislamiento más alto. Es por lo tanto un inconveniente identificado y que de hecho es inherente a la propia norma de medida. Mediante una medida de *loss factor*, pueden corregirse los valores de

aislamiento medidos sin mayor dificultad, análogamente a como se realiza para corregir las diferencias de condiciones de contorno entre laboratorio y obra real.

Pero en cualquier de los casos, más allá del valor exacto cualitativo (o más bien, del valor de consenso) los aislamientos medidos son valores comparables entre sí, lo cual hace de las cámaras a escala el método perfecto para comparar diferentes variantes durante el desarrollo de nuevos materiales.

El montaje de las muestras (indirectamente relacionado también con una fabricación dimensionalmente precisa de estas) se ha mostrado como un factor de enorme importancia en el resultado medido. Ha de hacerse con especial esmero y prefiriendo siempre sobresellar que quedarse corto.

Asimismo, se ha abierto una nueva línea de investigación al comprobar cómo la fractura de una parte de una placa afecta de forma muy relevante al aislamiento total del conjunto, situación que eventualmente podría reproducirse en un edificio real al fisurarse tabiques o medianeras (ámbitos de la rehabilitación acústica).

En lo que respecta a las partes del diseño o construcción de las cámaras que son susceptibles de mejora (a tenor de las verificaciones a posterior llevadas a cabo por el doctorando):

- Mejorar el *loss factor* del marco vía el empleo, por ejemplo de un material más pesad, una ejecución fija por atornillándolo al solado, cambiando el sellado de silicona por otro más rígido, etc. Todo un campo por explorar.
- Pese a que no hay posibilidades en la práctica de modificar la escala, el volumen de las cámaras sí que puede ser mayor (algo más al menos). Ello corregiría los requisitos de tiempo de reverberación y aumentaría también la difusividad del campo acústico dentro. Aumentando por lo tanto la precisión de las medidas realizadas.
- Con una apertura de ensayo algo más pequeña, o una muestra algo mayor que la apertura actual, se puede lograr mejorar sellado utilizando las propias aristas de las cámaras. Esta idea se planteó al inicio de la investigación pero, en la práctica, el solapamiento que existe es probablemente demasiado escaso.

Las líneas que se abren en este ámbito, además de la citada investigación referente a elementos fisurados, pueden dirigirse hacia:

- Desarrollo de ensayos para elementos huecos y sistemas constructivos más complejos.
- Ensayos de aireadores, rejillas, cajas de persiana y elementos similares.
- Etc.







# Capítulo 4

## *Aislamiento acústico de hormigones con subproductos industriales*

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

---

## 4.1.- Descripción de los elementos ensayados

En este capítulo se aborda el segundo objetivo principal de la Tesis Doctoral: caracterizar desde el punto de vista del aislamiento acústico diferentes hormigones que incorporen subproductos industriales. Dado que la investigación se encuadra dentro del proyecto BlueCons [BlueCons, 2015], los hormigones con subproductos de la fabricación del acero que han sido validados en dicho proyecto conforman la principal parte del capítulo.

Por lo tanto, se van a determinar las prestaciones acústicas de dosificaciones que ya han demostrado sus prestaciones en otros aspectos tales como la trabajabilidad, resistencias mecánicas o durabilidad [Santamaría, 2017], sin buscar la maximización del aislamiento acústico por encima de otras propiedades. Es decir: en los hormigones ensayados acústicamente se ha priorizado su viabilidad industrial sobre cualquier otro aspecto siendo, por consiguiente, posible que existan otras dosificaciones que alcancen mejores características de aislamiento acústico, aún a costa de quizás perder otras cualidades mecánicas, siendo estas últimas las que gobiernan su principal propósito de uso (estructura, cimentación, etc.).

Inicialmente se consideraron 4 mezclas destinadas a un uso estructural. Todas las mezclas contienen escorias acería de arco eléctrico (EAF) como áridos en diferentes proporciones. Dos variables principales fueron introducidas: en primer lugar su trabajabilidad (hormigones bombeables y autocompactantes) y, en segundo término, el tipo de cemento utilizado (CEM I y CEM IV).



Figura 4.1: Elaboración de vigas con la misma amasada que se ensayará acústicamente.

Posteriormente, en sintonía con el avance del proyecto *BlueCons* (Retos de la sociedad 2014 del MINECO) las amasadas con fibras sintéticas y metálicas han sido también ensayadas.

En total, se han realizado amasadas de los siguientes tipos con áridos siderúrgicos:

- I-P (cemento tipo I, amasada de hormigón bombeable, *P-pumping*)
- IV-P (cemento IV, ídem)
- I-SC (cemento I, amasada de hormigón autocompactante, *SC-selfcompacting*)
- IV-SC (cemento IV, ídem)
- I-SC+SF (cemento I, amasada de hormigón autocompactante, con fibras sintéticas)
- I-SC+MF (cemento I, amasada de hormigón autocompactante, con fibras metálicas)
- I-SC-S (cemento I, amasada de hormigón autocompactante, áridos silíceos)

Asimismo, se han caracterizado también hormigones con otros subproductos industriales, tales como serrín, buscando en este caso mejorar las cualidades térmicas [M. Madrid *et al*, 2017].

- II-SD (cemento tipo II, serrín de pino radiata)



Figura 4.2: Probeta de hormigón aligerado con serrín, durante su fabricación.

Por último, se han realizado amasadas de referencia con áridos naturales para tener una comparativa, tomando como patrón de verificación unos materiales estandarizados y actualmente ya asumidos por el mercado de la edificación, tanto en hormigones bombeables como autocompactantes.

- Ref-P (cemento tipo I, áridos naturales, amasada de hormigón bombeable)
- Ref-SC (cemento I, áridos naturales, amasada de hormigón autocompactante)

El agua para las dosificaciones, que no contenía compuestos que pudieran afectar negativamente a las mezclas hidráulicas, fue tomada en cada caso de las redes urbanas de Burgos, San Sebastián y Bilbao.

#### 4.1.1.- Hormigones con áridos siderúrgicos

En estas muestras, se han utilizado dos tipos diferentes de cementos, ambos de acuerdo a la norma UNE-EN 197-1 [EN-197, 2011]:

- Cemento Portland tipo I. 52,5R (90 % clinker, 5% polvo de carbonato cálcico y 5% yesos)
- Cemento Portland tipo IV/B-V 32.5-N (que, entre otros, contiene: 50% Clinker, 40% cenizas volantes, 5% de polvo de carbonato cálcico, regulador de fraguado en forma de yesos, etc.)

Esta variable se introdujo para mostrar la influencia del tipo de cemento en la trabajabilidad de los hormigones y estudiar la influencia de la interacción entre los aditivos del cemento y las escorias en la respuesta estructural del hormigón reforzado. Se seleccionó un rango de consistencias para estudiar la fabricación de hormigones con la trabajabilidad deseada, variando el diseño de la mezcla.

El objetivo de obtener mezclas autocompactantes presentaba varios problemas, abordados en publicaciones previas de los integrantes del grupo de investigación [Santamaría *et al*, 2017]. Después de varios intentos, algunos de ellos descritos en el citado artículo, se seleccionaron dos mezclas diferentes para la fabricación de las muestras. Su granulometría se muestra en la siguiente figura:

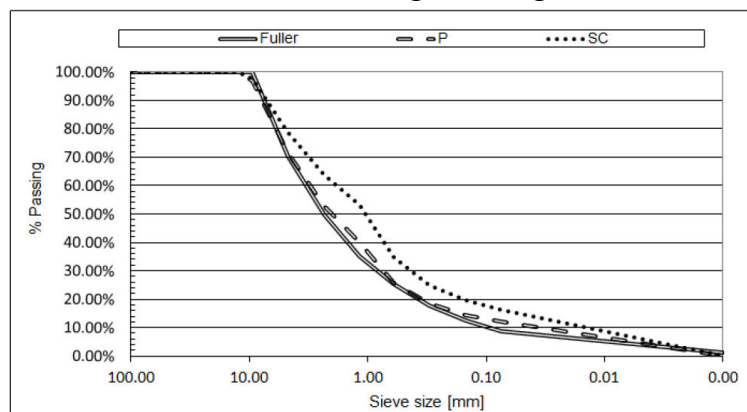


Figura 4.3: Granulometría de las muestras P y SC. (fuente Tesis Dra. Santamaría)

Las proporciones de materiales son:

	IP	IVP	ISC	IVSC
Cement I	330		330	
Cement IV		330		330
Water	160	160	165	165
EAFS coarse	950	950	760	760
EAFS sand	690	690	550	550
Lime sand	650	950	900	900
Plasticizer (%cement weight)	1.5%	1.5%	2%	2%

Tabla 4.1: Proporciones de materiales. (fuente Tesis Dra. Santamaría)

Los finos calizos tienen un tamaño máximo de 1,18 mm, un módulo de finura de 1,5 unidades y la distribución granulométrica que se presenta a continuación:

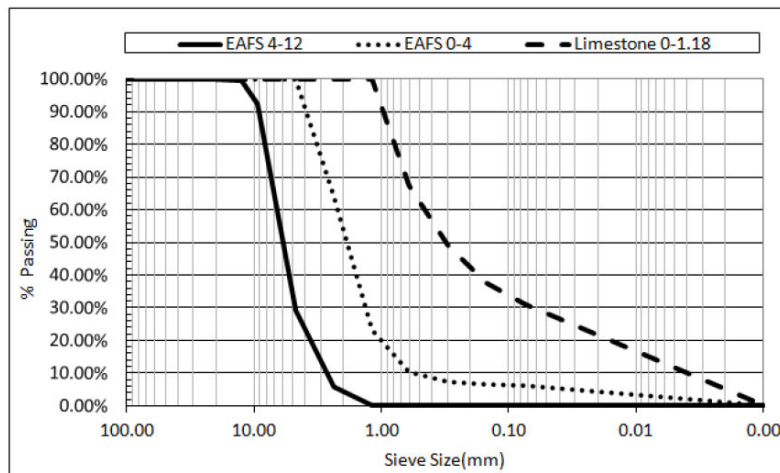


Figura 4.4: Gradación de los finos. (fuente Tesis Dra. Santamaría)

Las partículas de tamaño inferior a 1mm tienen un papel importante en la trabajabilidad de los hormigones. En este proyecto, estos finos han sido agregados para mejorar la misma y para prevenir la segregación de los áridos gruesos, así como compensar la falta de partículas finas en las propias escorias de acería (EAF).

Las escorias de arco eléctrico usadas fueron suministradas por la empresa *Hormor* ([www.grupoetxeberria.com](http://www.grupoetxeberria.com)) en dos fracciones (finos <4.75 mm y medios <12.5 mm). La composición química y algunas de sus propiedades físicas se detallan en la tabla 4.2. Su gradación granulométrica se incluye en la figura 4.4.

Compounds	EAFs (0-5 mm)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	22.3
CaO (%)	32.9
SiO <sub>2</sub> (%)	20.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	12.2
MgO (%)	3.3
MnO (%)	5.1
SO <sub>3</sub> (%)	0.42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.5
TiO <sub>2</sub> (%)	0.3
Loss on ignition (%)	gan
Water absorption (%)	1.12
Specific gravity (Mg/m <sup>3</sup> )	3.42
X-Diffraction main compounds	Wustite-Chelenite Krssteinite

Tabla 4.2: Composición química y propiedades físicas de las EAF. (fuente Tesis Dra. Santamaría)

Una descripción más exhaustiva de estos elementos puede encontrarse en la tesis doctoral de la Dra. Amaia Santamaría [Santamaría, 2017], así como en otras publicaciones del equipo de investigación [Arribas et al, 2015].



Figura 4.5: Elaboración de las probetas acústicas en las amasadas de noviembre de 2015 (bombeables).



Figura 4.6: Probeta acústica y viga a escala real con las amasadas de diciembre de 2015 (autocompactantes).

### **4.1.2.- Hormigones con áridos siderúrgicos y fibras**

En el transcurso de la acción investigadora BlueCons (marco de la presente Tesis Doctoral) se han resuelto algunos interrogantes y abierto otros nuevos referentes a la I+D+i. Cuestiones algunas que suponen enfoques rompedores tales como la introducción de fibras en mezclas siderúrgicas.

La adición de fibras (sintéticas u orgánicas) reduce algunos de los inconvenientes que puede presentar el hormigón tradicional, creando un material más homogéneo (e incluso isótropo) cuya resistencia a tracción y resistencia a la fatiga es mayor. Las fibras soportan algunos de los esfuerzos de tracción, controlando la fisuración y mejorando la tenacidad, mientras que la matriz de hormigón proporciona la resistencia a compresión y rigidez, distribuyendo los esfuerzos y protegiendo las fibras. Cuestiones algunas de las cuales ya fueron analizadas por el Dr. Orbe. integrante también del presente equipo de trabajo [Orbe et al., 2014 y Orbe et al., 2015].

En esta línea, se han realizado ya algunos tanteos iniciales cuyas prestaciones acústicas han sido también evaluadas



*Figura 4.7: Probetas acústicas con fibras sintéticas y metálicas.*

Las proporciones de los materiales empleados son:

**I-SC 3**

<u>Dosificación (20 litros)</u>	<u>kg</u>	<u>kg/m<sup>3</sup></u>
Cemento	7	350
Finos calizos (0/1,3mm)	19	950
Arena de escoria (0/4mm)	11,5	575
Grava de escoria (4/12mm)	14,5	725
Agua	3,5	175
Superplastificante	0,09	5
Retardante	0,04	1,75



**I-SC+SF (b)**

<u>Dosificación (38 litros)</u>	<u>kg</u>	<u>kg/m<sup>3</sup></u>
Cemento	13,3	350
Finos calizos (0/1,3mm)	16,34	430
Arena de escoria (0/4mm)	21,85	575
Grava de escoria (4/12mm)	27,55	725
Arena Silíceas (0,3/0,8mm)	19,76	520
Agua	5,29	175
Superplastificante	0,48	10,5
Fibras sintéticas	0,14	3,6

**I-SC+SF (a)**

<u>Dosificación (38 litros)</u>	<u>kg</u>	<u>kg/m<sup>3</sup></u>
Cemento	13,3	350
Finos calizos (0/1,3mm)	17,1	450
Arena escoria (0/4mm)	21,85	575
Grava escoria (4/12mm)	27,55	725
Arena Silíceas (0,3/0,8mm)	17,1	450
Agua	4	175
Superplastificante	0,28	9,1
Fibras sintéticas	0,14	3,6

La I-SC+SF (a) es hormigón autocompactante con aporte de finos calizos y silíceos y al que se le agrega fibras sintéticas. Las amasadas I-SC+SF (b) y la I-SC+SF (a) son dos amasadas con los mismos componentes pero con distinta proporción, la primera lleva más superplastificante algo más de aguas y distinta cantidad de finos de aporte calizos y sintéticos. Por otro lado, en la segunda hay menos superplastificante, algo menos de agua e igual proporción entre los finos calizos y silíceos. El incremento en plastificante y agua de la I-SC+SF (b) se orienta a escurrimientos mayores ante los superiores contenidos en finos.

**I-SC+MF**

<u>Dosificación (35 litros)</u>	<u>kg</u>	<u>kg/m<sup>3</sup></u>
Cemento	12,25	350
Finos calizos (0/1,3mm)	15,05	430
Arena escoria (0/4mm)	20,13	575
Grava escoria (4/12mm)	25,38	725
Arena Silíceas (0,3/0,8mm)	18,2	520
Agua	4,49 (6,13)	175
Superplastificante	0,37	10,5
Dramix	1,4	40

## I-SC-S

<u>Dosificación (35 litros)</u>	<u>kg</u>	<u>kg/m<sup>3</sup></u>
Cemento	12,25	350
Arena Silíceo (0,6/1,25mm)	17,5	500
Arena escoria (0/4mm)	20,13	575
Grava escoria (4/12mm)	25,38	725
Arena Silíceo (0,3/0,8mm)	15,75	450
Agua	4,63 (6,13)	175
Superplastificante	0,18	5,25
Retardante	0,06	1,75

### **4.1.3.- Hormigones con serrín**

El uso de un árido orgánico fino (serrín), proveniente de los residuos de aserraderos y la industria de la madera, genera un material con densidad menor a los hormigones convencionales y prestaciones térmicas mejoradas, así consensuada dentro del presente grupo de investigación [Madrid *et al*, 2017], según su web: [www.ehu.es/es/web/scm](http://www.ehu.es/es/web/scm).

La muestra ensayada acústicamente corresponde a una de las amasadas con cemento tipo II de la citada referencia en su tabla 3, concretamente la denominada como "SD" con 20 kg serrín/m<sup>3</sup>-hormigón.

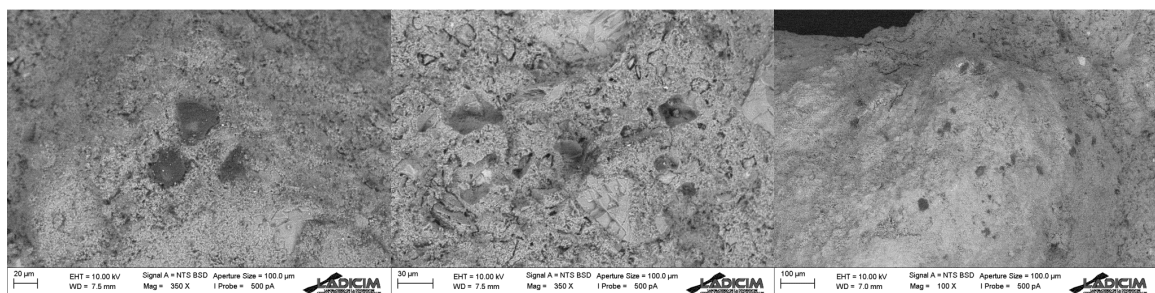


Figura 4.8: Virutas de serrín (partículas oscuras) en la masa de hormigón de la muestra I-SD.

### **4.1.4.- Amasadas de referencia**

El objetivo de las amasadas de referencia con áridos naturales es tener patrón de verificación según dosificaciones habituales, tanto en hormigones bombeables como autocompactantes.

Dosificación amasada *Ref-SC*-*"selfcompacting"* por cada metro cúbico de hormigón. Peso total en fresco 2700 kg/m<sup>3</sup>:

1. Cemento tipo I 350 kg.
2. Plastificante 2% (sobre peso de cemento).
3. Agua 175 kg, comenzar por 120 kg y añadir a necesidad visual.
4. Finos calizos 0/1,2mm, en total 950 kg.
5. Escoria 0/4mm, en total 575 kg.
6. Escoria 4/12mm, en total 725 kg.



*Figura 4.9: Aspecto de la masa fresca Ref-SC durante el ensayo de escurrimiento.*

Dosificación amasada *Ref-P*-*"pumping"* por cada metro cúbico de hormigón. Peso total en fresco 2680 kg/m<sup>3</sup>:

1. Cemento tipo I 350 kg.
2. Plastificante 2% (sobre peso de cemento).?
3. Agua 150 kg, comenzar por 100 kg y añadir a necesidad visual.
4. Finos calizos 0/1.2mm, en total 680 kg.
5. Escoria 0/4mm, en total 720 kg.
6. Escoria 4/12mm, en total 1000 kg.



*Figura 4.10: Aspecto de la masa fresca Ref-P durante el ensayo de escurrimiento.*

#### **4.1.5.- Resumen de propiedades mecánicas**

Para cada una de las muestras a ensayar, se ha determinado la masa y, por lo tanto, la densidad superficial, conocidas las dimensiones de las placas de 450x650 mm, en todos los casos.

El espesor exacto se ha medido también. Asimismo, para varias de las muestras se han realizado probetas cúbicas de 100 mm de lado para medir su peso exacto y resistencia a compresión.

Los datos más completos corresponden a los hormigones con áridos siderúrgicos P y SC se adjuntan en la tabla 4.3.

Valores Ensayo								
Tipo	$f_c$ (MPa)	Carga (kN)	Def. <sub>L</sub> (μ€)	Def. <sub>T</sub> (μ€)	Carga (kN)	Def. <sub>L</sub> (μ€)	E (MPa)	$\nu$
I-P-1	50	130,0	480,0	112,0	20,0	85,0	<b>35.457</b>	<b>0,233</b>
I-P-2	50	130,0	447,0	104,0	20,0	84,0	<b>38.583</b>	<b>0,233</b>
IV-P-1	30	80,0	363,0	74,5	15,0	99,5	<b>31.408</b>	<b>0,205</b>
IV-P-2	30	80,0	310,0	67,0	15,0	65,0	<b>33.780</b>	<b>0,216</b>
IV-SC-1	30	80,0	356,0	76,0	15,0	87,0	<b>30.766</b>	<b>0,213</b>
IV-SC-2	30	80,0	329,0	70,0	15,0	65,0	<b>31.349</b>	<b>0,213</b>
I-SC-1	50	130,0	452,0	99,5	20,0	88,0	<b>38.477</b>	<b>0,220</b>
I-SC-2	50	130,0	426,0	92,0	20,0	75,0	<b>39.902</b>	<b>0,216</b>

*Tabla 4.3: Propiedades mecánicas en amasadas P y SC, ensayando dos probetas/amasada.*

En otros casos, únicamente se ha realizado el ensayo de rotura a compresión. En dichos casos, a falta de un dato más exacto se ha utilizado el valor de referencia habitual en acústica de coeficiente de Poisson en 0,22.

Se presentan a continuación los datos registrados así como el espesor “desescalado” es decir: el espesor equivalente a escala real (producto de multiplicar por 6,3 el espesor medido). El objetivo de este dato es tener una idea más aproximada de las dimensiones del muro o forjado “real”, al objeto de valorar mejor sus prestaciones acústicas frente a las soluciones actuales equivalentes.

La tabla 4.4 resume las propiedades mecánicas.

	E (MPa)	$\mu$	Densidad superficial(kg/m <sup>2</sup> )	Espesor min * (mm)	Espesor máx.* (mm)
I-P-1	35.457	0,233	68,1	151	158
I-P-2	38.583	0,233	72	164	170
IV-P-1	31.408	0,205	68,9	158	158
IV-P-2	33.780	0,216	69,8	170	170
I-SC-1	38.477	0,22	70	158	170
I-SC-2	39.902	0,216	69,7	159	164
IV-SC-1	30.766	0,213	63,4	170	170
IV-SC-2	31.349	0,213	67,2	164	183
Ref-P-1	56.500	0,22	64,7	170	183
Ref-SC-1	39.250	0,22	56,6	164	164
Ref-SC-2	39.250	0,22	62	176	189
I-SC+SF (a)	51.000	0,22	74,7	164	164
I-SC+SF (b)	37.700	0,22	75,4	176	176
I-SC+MF	41.220	0,22	68,2	167	173
I-SC 3	ND	ND	74,7	170	170
I-SC-S	18.300	0,22	67,6	158	170
I-SD	ND	ND	63,2	163	164

*\*Dividir los espesores reales por el factor de escala 6,3 (valorar mejor la diferencia entre espesores zonas/muestras)*

*Tabla 4.4: Resumen de propiedades mecánicas para las diferentes muestras.*

## **4.2.- Representatividad de las muestras**

Como se ha podido apreciar en la tabla 4.4., el espesor de las diferentes muestras entre sí no es todo lo uniforme que hubiese sido deseable, lo cual dificulta la interpretación y la comparación directa de los resultados obtenidos. Al fin y al cabo, es bien conocida la falta de calibración de los elementos reales en construcción (un ejemplo: todavía hoy en día arrastramos la costumbre de la medida de centímetros).

En primer lugar, hay probetas con zonas de diferentes espesores dentro de la propia muestra, resultando que en su sección longitudinal tienen forma de trapecio. En los hormigones autocompactantes ello puede ser debido, por ejemplo, a que durante su curado no se situaron en una ubicación perfectamente horizontal (hecho no infrecuente en la realidad de obra). Ello ha podido dar lugar a las diferencias encontradas que, aunque estrictamente no parecen excesivas, siendo del orden de 1 a 2 mm (figura 4.11), al aplicar el factor de escala x6,3, se transforman en diferencias a escala real de 10 mm, o mayor diferencia en espesor dentro de una misma muestra (recordar aquí, por ejemplo, las bajas precisiones en los tableros de los encofrados de obra).



*Figura 4.11: medida del espesor con un reloj comparador en diferentes puntos de una muestra.*

En los hormigones bombeables, las diferencias en el espesor son las propias achacables a las características del material que no queda perfectamente plano (teniendo en cuenta que los espesores totales de las placas son de unos 25mm), como se ilustra en la figura 4.12.



*Figura 4.12: muestra de espesor no homogéneo debido a las propias texturas del hormigón bombeable.*

En ambas situaciones, para los cálculos que se realizan en los puntos siguientes, se ha tomado en estos casos el espesor mínimo y máximo en lugar de usar un valor medio como aproximación. Esto es debido a que la diferencia en espesor se traduce de forma directa en una rigidez a flexión variable pudiendo dar lugar, por lo tanto, a diferentes frecuencias críticas tal y como se ilustra en la figura 2.11.

En segundo lugar, supuestamente todas las placas realizadas tenían nominalmente un espesor de 25 mm (equivalente a "muros" de 150-160 mm en la escala real). Sin embargo, en la tabla 4.4 se ha visto cómo los espesores reales de las probetas están entre 24,5 y 29 mm, apreciable incluso a simple vista como se ve en la figura 4.13.



*Figura 4.13: Diferentes muestras con diferencias en el espesor real.*

Ello supone que en la escala real, se estarían comparando espesores de entre 158 y 183 mm. Por lo tanto, las diferencias son de hasta 25 mm de espesor, que es una

diferencia significativa. La figura 4.14. recoge por ejemplo los datos de aislamiento de losas de hormigón de diferentes espesores, donde se puede apreciar la variación en el aislamiento que podría esperarse por los cambios en el espesor.

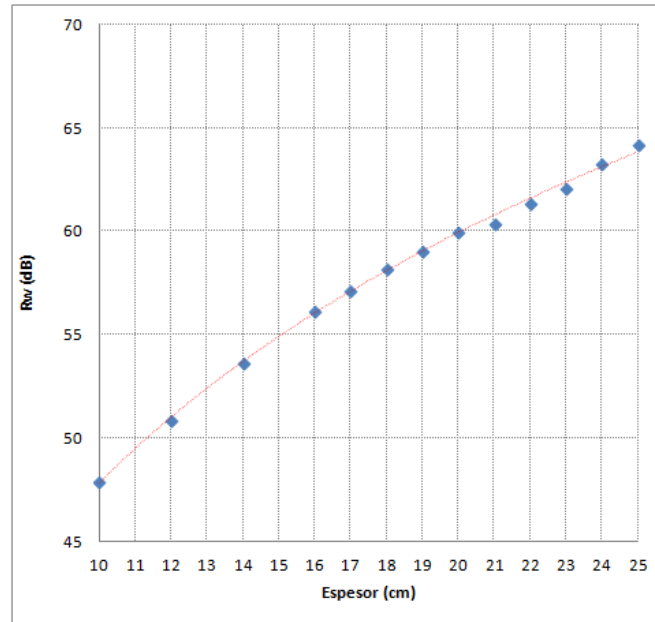


Figura 4.14: gráfica con el aislamiento ( $R_w$ ) de losas de hormigón macizo de diferentes espesores (mismo hormigón).

Como primera conclusión de lo anterior, para futuras investigaciones, si se trata de hormigones (árido de 10 a 25 mm de tamaño máximo) será preciso plantearse probetas-placa de mayores espesores ante el riesgo de las lógicas faltas de calibración. No obstante, dicha solución presenta limitaciones por la posible aparición de resonancias en el espesor, que invalidan la característica de “placa plana” de la probeta (ver ec.2.12). Otra solución podría pasar por la elaboración de morteros equivalentes (tamaño máximo de árido de 5 mm) con los consiguientes ajustes necesarios para simular los elementos reales de hormigón estructural (hasta los 25 mm de tamaño máximo de árido). En tal caso, según las reglas de escalamiento desarrolladas por Kling y vistas en el punto 2.3.4, sería necesario mantener una relación entre modelo a escala y real de:

$$\left[ \frac{E}{\rho \cdot (1 - \mu^2)} \right]_m = \left[ \frac{E}{\rho \cdot (1 - \mu^2)} \right]_o \quad (ec.4.1)$$

Lo cual se antoja complicado de conseguir con suficiente precisión. Por ello la solución más sencilla es el empleo de moldes metálicos de dimensiones muy calibradas a modo de encofrado.



No obstante, en el caso de la presente investigación, se ha optado por ajustar teóricamente los valores medidos para normalizarlos frente a un espesor estándar y que sean directamente comparables, tal y como se desarrolla en el punto 4.4. del presente capítulo. Cuestión esta que puede ser de utilidad como aprendizaje para la realidad de los edificios construidos, en referencia a los estudios acústicos futuros.

Por último, hay que indicar que la muestra con árido silíceo I-SC-S se realizó buscando un patrón con aporte de finos únicamente silíceos y, por supuesto, autocompactante. Sin embargo, se convirtió en una amasada fallida porque los resultados de amasado, escurrimiento y de compresión no fueron asumibles (figura 4.15), pues la placa quedó totalmente porosa dado que la lechada no se mantuvo con los áridos y se iba al fondo del molde (la imagen derecha muestra la cara superior de la muestra, sin adherencia entre los áridos por falta de lechada). No obstante, la muestra sí se ensayó acústicamente por verificar si pudiera relacionarse de algún modo los resultados obtenidos con las propiedades físicas.



*Figura 4.15: muestra I-SC-S. En la fotografía de la izquierda se aprecia la lechada concentrada en la parte inferior.*

### 4.3.- Resultados de aislamiento acústico obtenidos

Se analizan a continuación los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo obtenidos para las muestras de hormigón descritas anteriormente. Por claridad en la exposición, los resultados se presentan agrupados por tipo de hormigón, áridos, cemento, etc., buscando facilitar la comparación y posterior análisis.

Dado que el espesor de las muestras se ha escalado también, tal y como se describe en el punto 3.4 de la presente Tesis Doctoral, el desplazamiento directo de la escala de frecuencias permite presentar los aislamientos correspondientes a muestras del espesor indicado en la tabla 4.4. Las curvas de aislamiento que se muestran son, por lo tanto, obtenidas empíricamente en todos los casos y frecuencias, sin realizarse sus correcciones teóricas.

A fin de poder detectar anomalías en los resultados de los ensayos, la tabla 4.5 recoge los resultados del cálculo teórico de las frecuencias críticas utilizando la ecuación 2.14 y los datos de espesor y módulos de Young y Poisson de la tabla 4.4.

	Espesor min *(mm)	Espesor máx.*(cm)	fc min (Hz)	fcmax (Hz)
I-P-1	151	158	183,9	176,5
I-P-2	164	170	167,3	161,1
IV-P-1	158	158	189,3	189,3
IV-P-2	170	170	170,3	170,3
I-SC-1	158	170	172,3	159,6
I-SC-2	159	164	167,7	162,5
IV-SC-1	170	170	170,2	170,2
IV-SC-2	164	183	180,2	161,5
Ref-P-1	170	183	126,6	117,9
Ref-SC-1	164	164	147,4	147,4
Ref-SC-2	176	189	143,4	133,8
I-SC+SF (a)	164	164	148,7	148,7
I-SC+SF (b)	176	176	161,4	161,4
I-SC+MF	167	173	155,1	149,4
I-SC 3	170	170	ND	ND
I-SC-S	158	170	245,6	227,4
I-SD	163	164	ND	ND

Tabla 4.5: Frecuencia crítica mínima y máxima esperadas según los espesores y módulos de Young medidos.

### 4.3.1.- Hormigones bombeables con árido siderúrgico

La figura 4.16. muestra los resultados de aislamiento a ruido aéreo de los hormigones bombeables con cemento tipo I y árido siderúrgico: I-P- 1 e I-P-2.

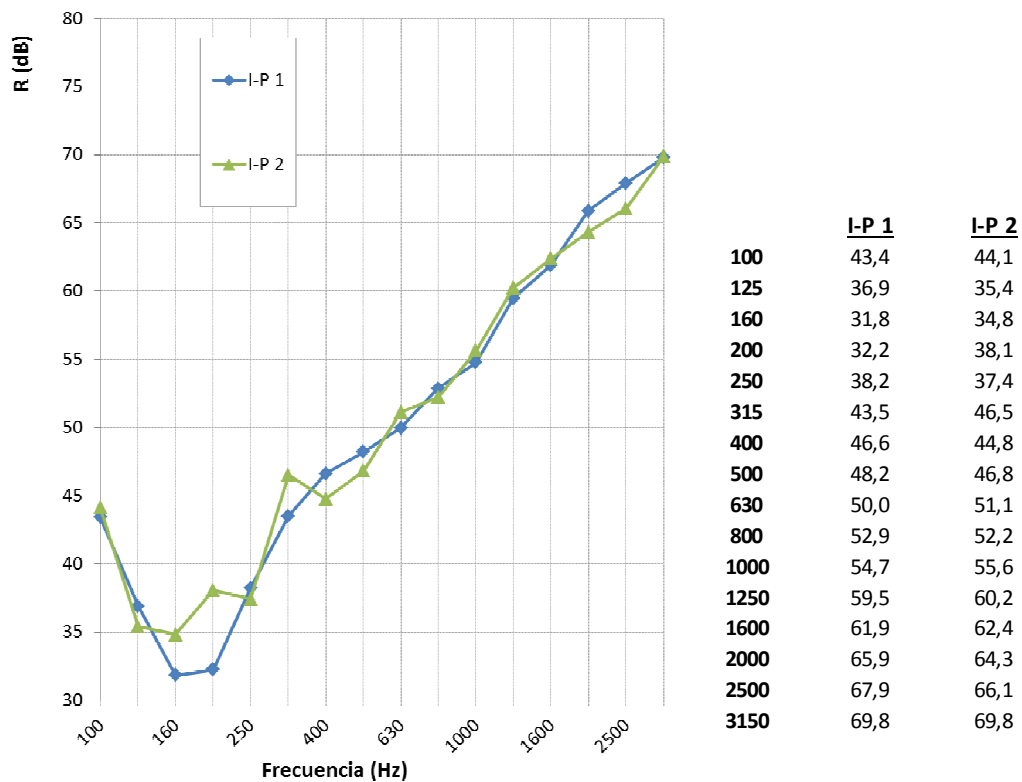


Figura 4.16: aislamiento de las muestras I-P-1 e I-P-2.

Las frecuencias críticas coinciden con los valores esperados según la tabla 4.5. Estando los valores calculados (para los espesores mínimo y máximo) en el entorno de la frontera entre dos bandas de 1/3 de octava (160 y 200 Hz) la caída en el aislamiento se manifiesta en ambas.

La repetibilidad entre ambas muestras es buena, con valores muy similares en todo el espectro considerado, excepto en la zona de la frecuencia crítica donde si hay una cierta dispersión, siendo la muestra I-P-2 (más pesada por tener algo más de espesor) ligeramente mejor en dicha zona.

La pendiente de las curvas por encima de la  $f_c$  está en los 8-9 dB/oct, en consonancia con lo esperado teóricamente.

La figura 4.17. recoge los resultados de aislamiento a ruido aéreo de las muestras de hormigones bombeables con cemento tipo IV y árido siderúrgico: IV-P-1 e IV –P-2.

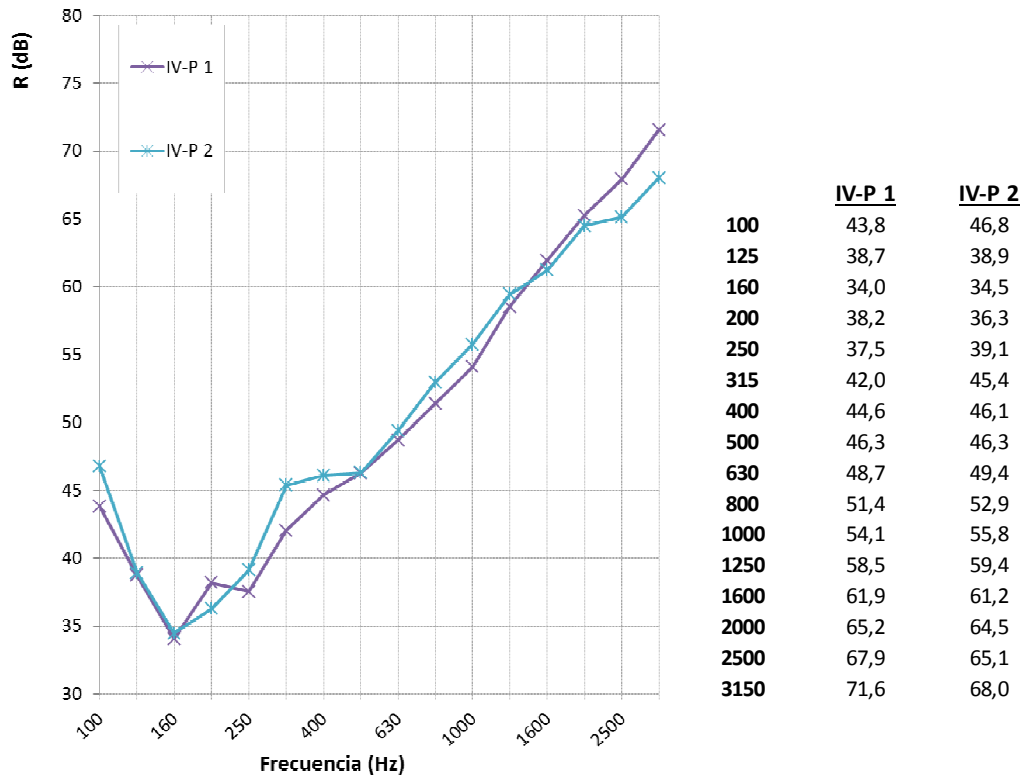


Figura 4.17: aislamiento de las muestras IV-P-1 e IV-P-2.

Las frecuencias críticas coinciden con los valores esperados según la tabla 4.5, aunque para la muestra 1 podría esperarse un valor ligeramente superior, quizás ya en la banda de los 200 Hz. Al ser unas muestras de espesor mucho más regular en toda su superficie, se aprecia que la frecuencia crítica afecta de forma clara únicamente a una banda.

La repetibilidad entre ambas muestras es muy buena, con valores muy similares en todo el espectro considerado, incluyendo la zona de la frecuencia crítica.

La pendiente de las curvas por encima de la  $f_c$  está en lo esperado teóricamente, con unos 9 dB/oct. La ligera caída a altas frecuencias de la muestra 2 puede ser debida a un sellado imperfecto de la misma, tal y como se desarrolló en el capítulo anterior. Se desecha por lo tanto dicha muestra para el análisis posterior.

Finalmente, en la figura 4.18. se comparan los resultados de aislamiento de ambos tipos de muestra frente al hormigón bombeable de referencia, con áridos naturales.

En vista de la correcta repetibilidad de los ensayos anteriores, se ha optado por presentar el promedio de los dos resultados obtenidos del hormigón I-P, como valor más representativo de sus prestaciones.

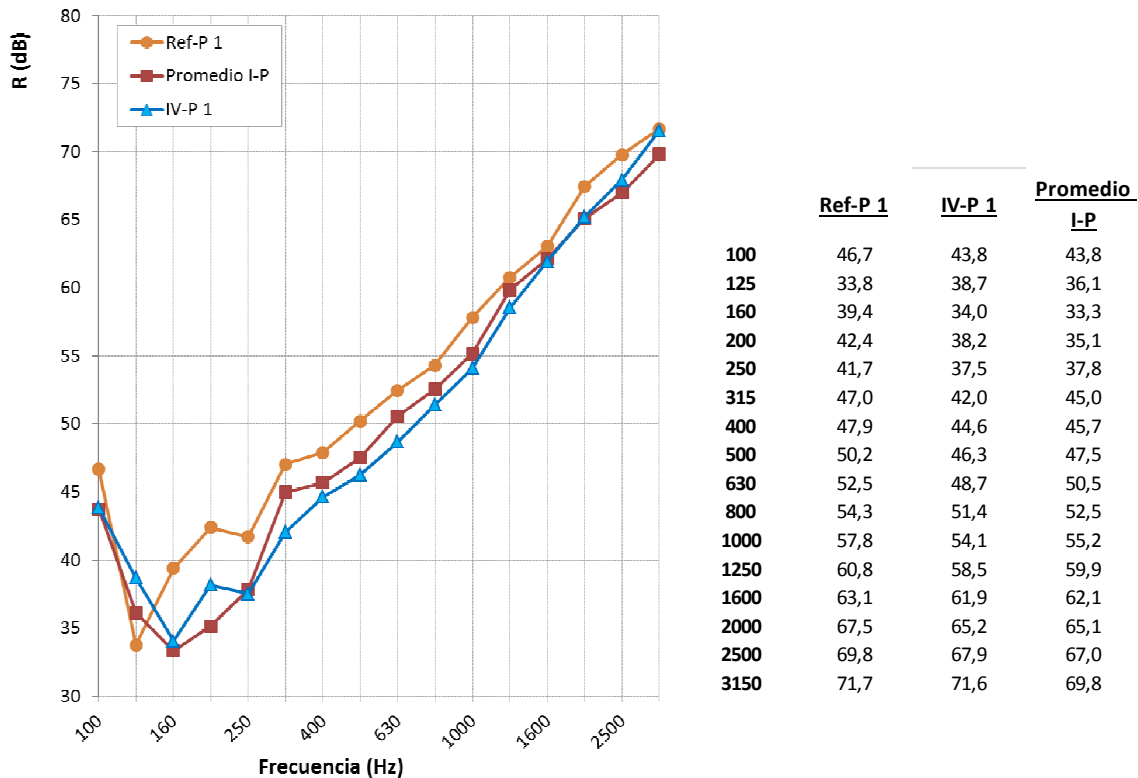


Figura 4.18: aislamiento de las muestras de hormigón bombeable con árido natural y escoria negra.

También en el caso de la amasada con árido natural, la frecuencia crítica coincide con el valor calculado y la pendiente de la curva se ajusta a lo esperado teóricamente.

Se aprecia cómo la frecuencia crítica es más baja en la probeta de referencia, debido en parte a un módulo de Young más alto (aproximadamente 56,5 para la muestra Ref-P-1, 37,2 para las I-P y 32,6 para la IV-P; ver tabla 4.4), pero también a un espesor algo mayor (siendo por lo tanto la rigidez a flexión mayor también).

A partir de dicho valor, la curva discurre paralela a las otras dos pero con valores de aislamiento superiores, pese a la menor densidad de los áridos naturales frente a las escorias.

### 4.3.2.- Hormigones autocompactantes con árido siderúrgico

En la figura 4.19 se muestran los resultados de aislamiento a ruido aéreo de los hormigones autocompactantes con cemento tipo I y árido siderúrgico: I-SC-1 e I-SC-2.

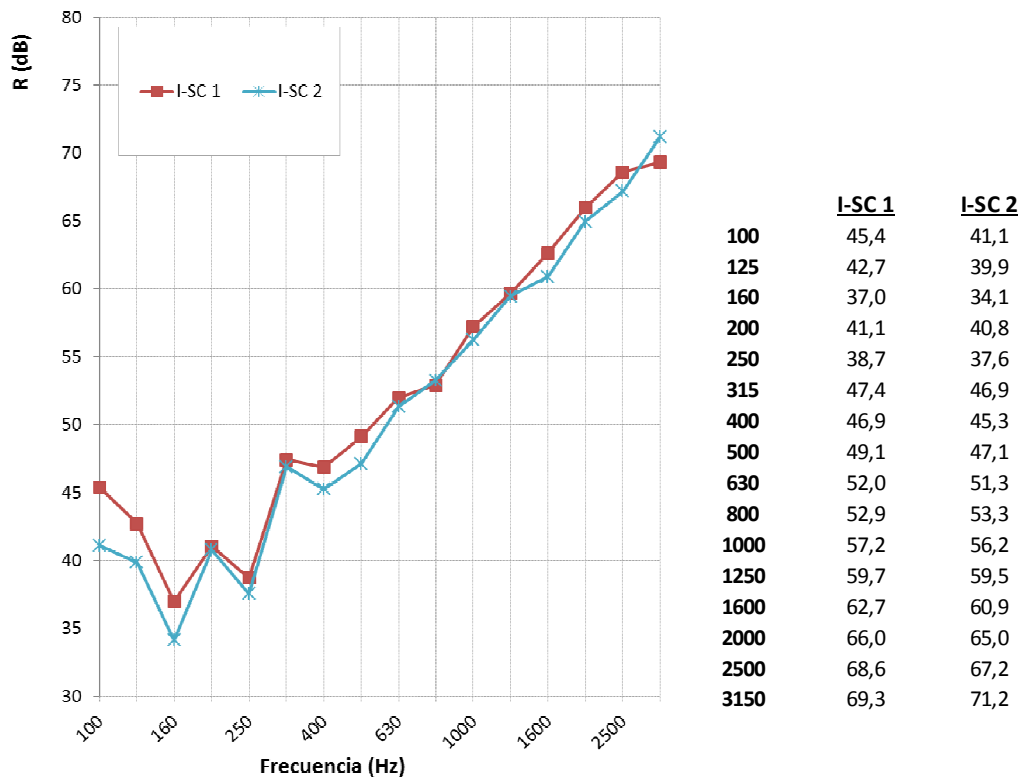
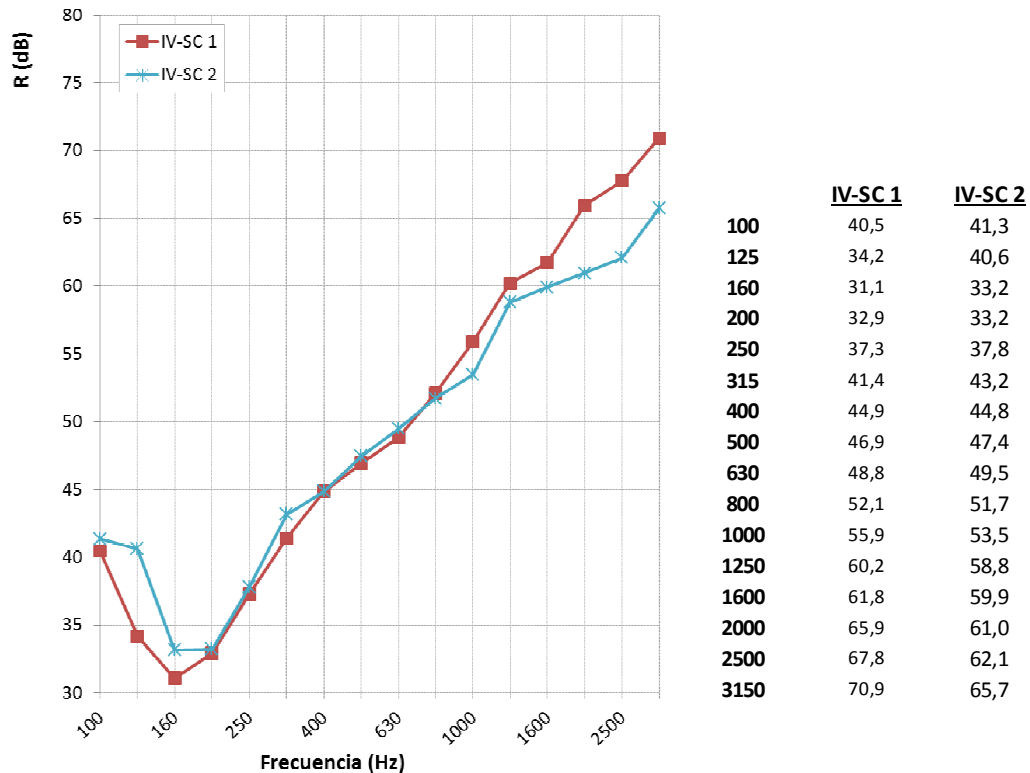


Figura 4.19: aislamiento de las muestras de hormigón I-SC-1 e I-SC-2.

En ambas muestras se aprecian dos picos separados de caída en el aislamiento para las bandas de 160 y 250 Hz, aunque el valor esperado estaría únicamente en la banda de 160 Hz, no habiéndose encontrado explicación aparente al segundo pico.

Igualmente, las diferencias por debajo de la  $f_c$  no se explican por distinta masa superficial, que es prácticamente la misma en ambas muestras. Por encima de la  $f_c$  la repetibilidad es muy buena, con pendiente de 9 dB/oct.

La figura 4.20. recoge los resultados de aislamiento a ruido aéreo de los hormigones autocompactantes con cemento tipo IV y árido siderúrgico: IV-SC-1 e IV-SC-2.



*Figura 4.20: aislamiento de las muestras de hormigón IV-SC-1 e IV-SC-2.*

La ligera caída a altas frecuencias de la muestra 2 puede ser debida a un sellado imperfecto, aunque el ensayo se repitió para tratar de descartar dicha posibilidad. Se valora, por lo tanto, la eventualidad de que exista algún tipo de fisura no apreciable en la muestra pero que puede afectar al resultado, tal y como se comentó en el punto 3.6.4. aunque afectando a frecuencias más altas. Esta hipótesis podría comprobarse mediante, por ejemplo, ultrasonidos. No obstante, los resultados de la muestra a altas frecuencias no se consideran fiables al 100%, quedando descartados para el análisis.

Por lo demás, la primera parte de la pendiente de ambas curvas y las frecuencias críticas observadas entre las bandas de 160 y 200Hz coinciden con lo calculado en la tabla 4.5.

El mejor aislamiento de la muestra IV-SC-2 respecto a la IV-SC-1 puede explicarse por la mayor masa (al tener algo más de espesor) de la primera.

En cuanto a las muestras de referencia de hormigón autocompactante con áridos naturales, los resultados obtenidos se recogen en la figura 4.21.

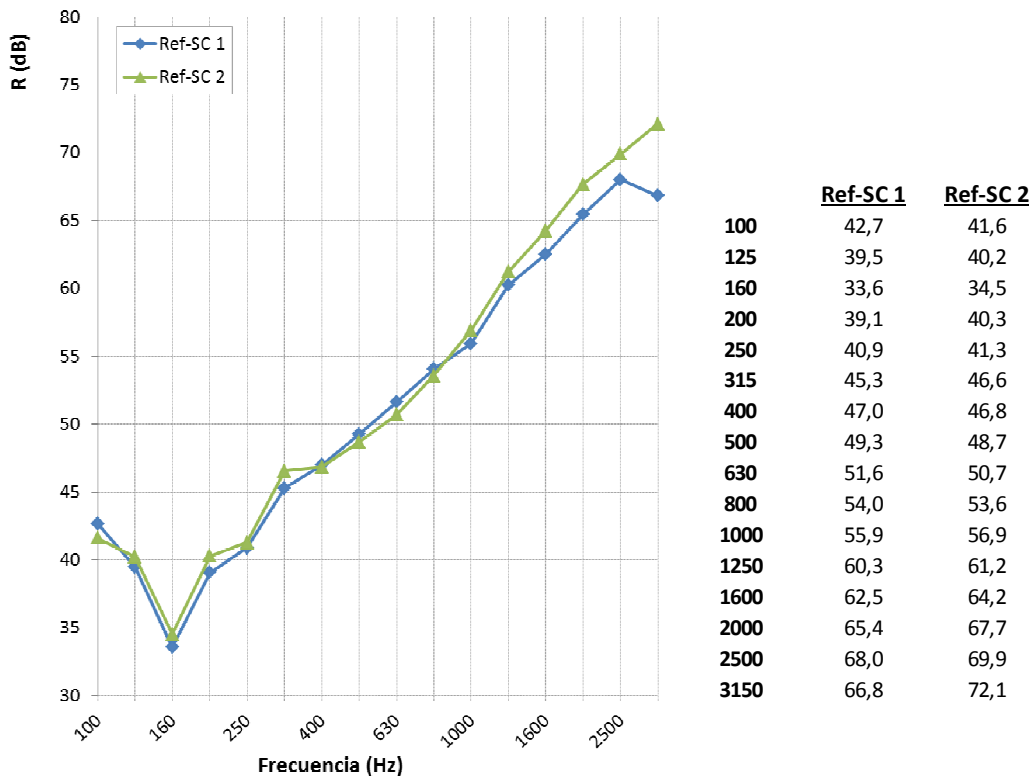


Figura 4.21: aislamiento de las muestras de muestras de referencia autocompactantes.

La caída en el aislamiento a la frecuencia de 3150 Hz para la muestra SC-1 se achaca a una interferencia por ruido de fondo en la frecuencia de 20kHz (3150 Hz a escala). No obstante, igual que en el caso anterior, se decide por precaución eliminar la muestra Ref-SC-1 del análisis posterior.

En el resto del espectro ambas curvas son prácticamente iguales, con una frecuencia crítica marcada en la banda de 160 Hz. Hubiera sido quizás esperable un comportamiento ligeramente mejor de la muestra Ref-SC-2, más pesada que la Ref-SC-1.

Comparando los tres tipos de muestras (árido siderúrgico con cementos tipo I y IV y referencia con árido natural), la figura 4.22 muestra como todas tienen una frecuencia crítica centrada en la banda de 160 Hz.

La muestra IV-SC-1, sin embargo, presenta valores de aislamiento 2-3 dB inferiores a las dos probetas con cemento de tipo I, lo que sugiere probable menor amortiguamiento interno en la muestras IV-SC, además de ser algo más ligera que la I-SC.



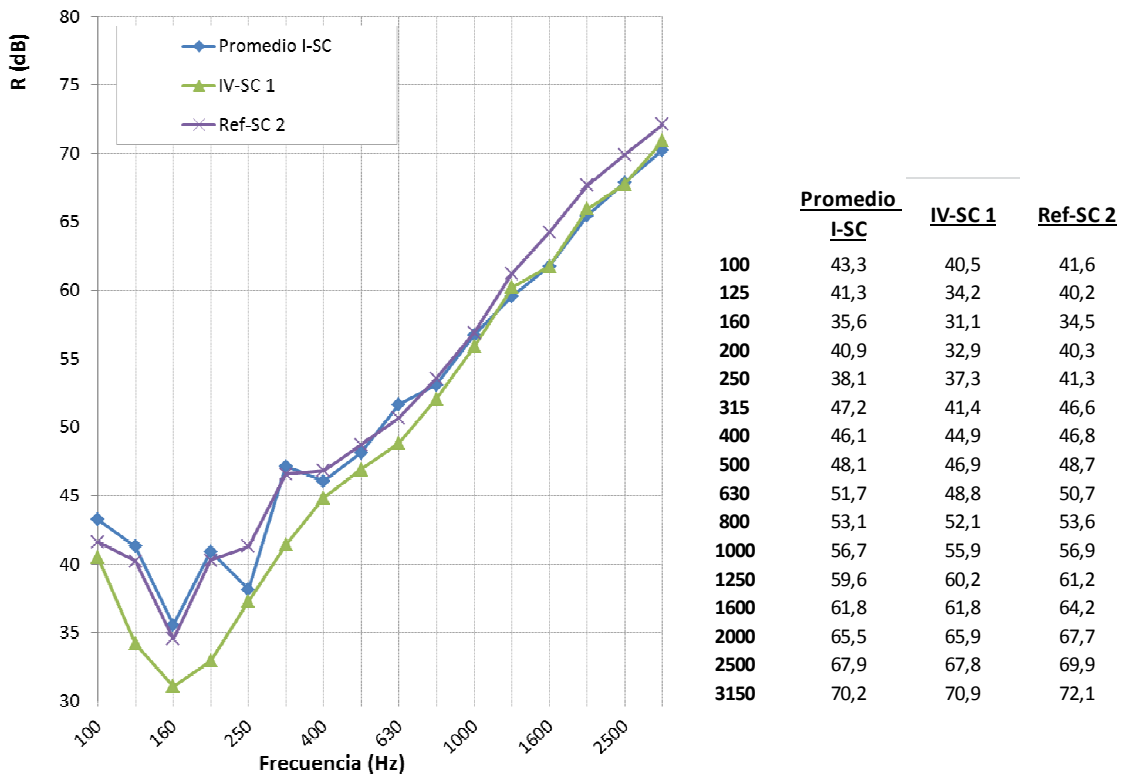


Figura 4.22: comparación del aislamiento de los tres tipos de muestras autocompactantes.

Las muestras I-SC y Ref-SC-2, presentan aislamiento similares pese a la mayor densidad superficial de los áridos siderúrgicos lo que, de nuevo, se relaciona con un menor amortiguamiento interno que no compensa la ganancia en masa.

Si se comparan las dos amasadas, bombeable y autocompactante, de árido siderúrgico con cemento tipo I, puede verse en la figura 4.23 que ambas presentan un aislamiento muy similar excepto en la zona de la frecuencia crítica, centrada en la banda de 160 Hz como se ha visto anteriormente.

Teniendo ambas muestras la misma densidad y espesor, estas diferencias deberían explicarse por el mayor amortiguamiento interno de la amasada autocompactante. Sin embargo, la figura 4.24, con cemento tipo IV muestra exactamente el comportamiento opuesto, con diferencias únicamente en la zona de frecuencia crítica pero esta vez a favor del hormigón bombeable. No obstante, en este caso la diferencia de masa sí puede explicar el peor comportamiento de la IV-SC.

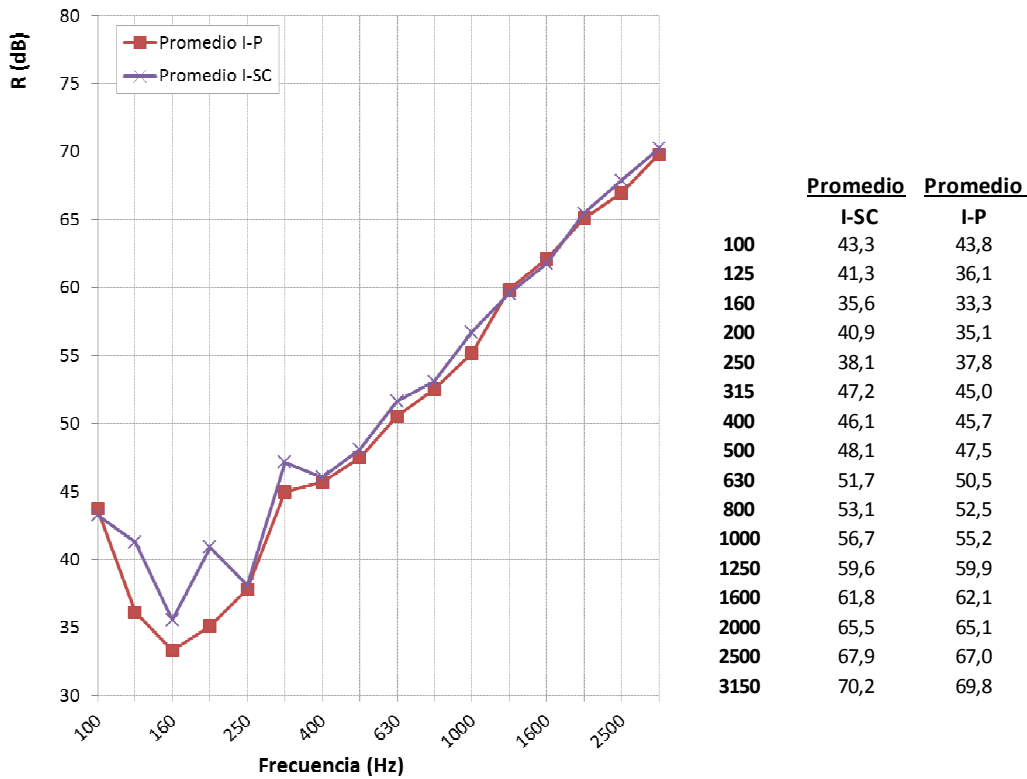


Figura 4.23: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y cemento tipo I.

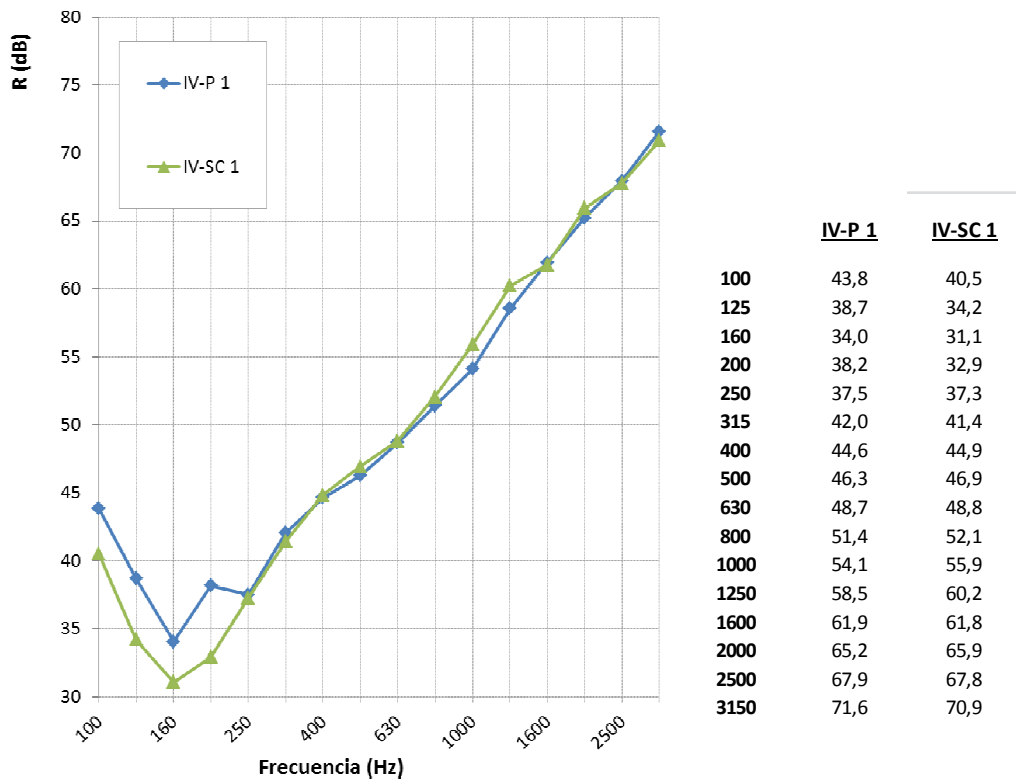


Figura 4.24: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y cemento tipo IV.

### 4.3.3.- Hormigones con árido siderúrgico y fibras

La figura 4.25. compara los aislamientos de tres amasadas muy similares, todas con cemento tipo I y árido siderúrgico, con la adición de fibras sintéticas y superplastificantes en distintas proporciones (muestras I-SC+SF (a) y (b)). Todas ellas frente a una amasada de referencia sin la adición de fibras. Las tres muestras tienen masas prácticamente iguales.

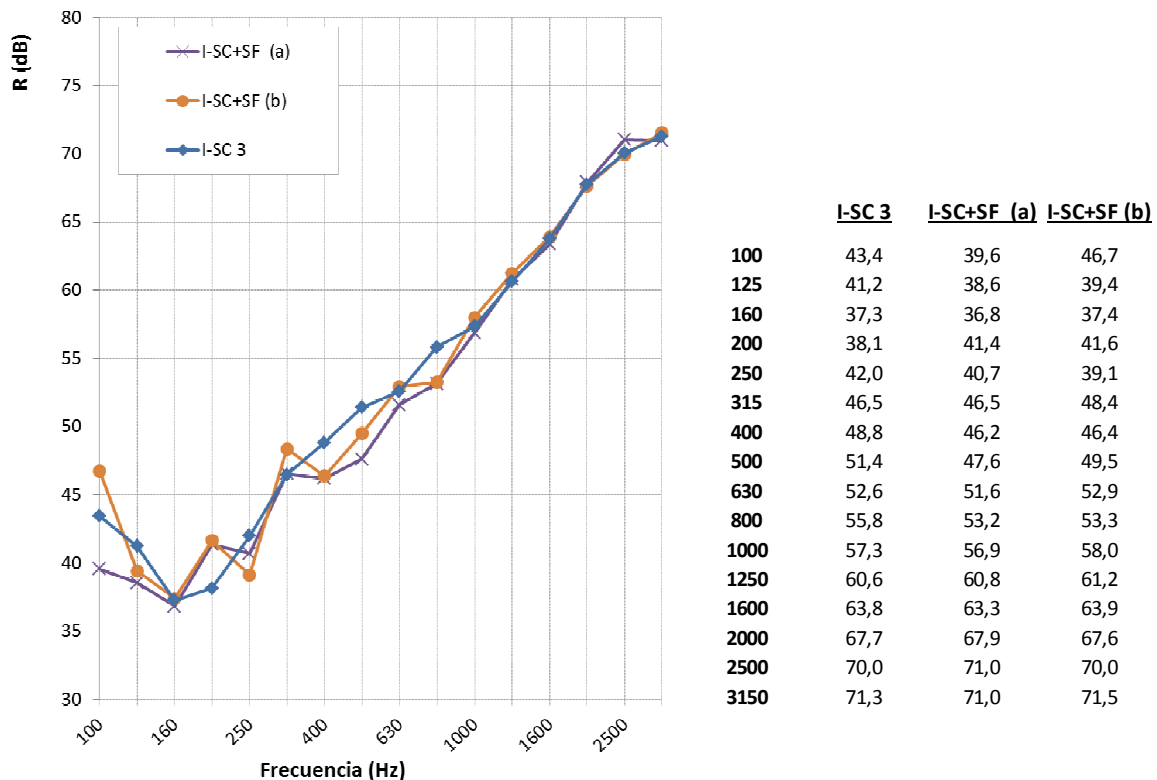


Figura 4.25: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y cemento tipo I, sin aditivos y con fibras sintéticas.

A igualdad de espesores, la muestra SF(a) podría tener una  $f_c$  algo más baja que la SF(b) por su módulo de Young más alto. Sin embargo, el menor espesor compensa este efecto, con las tres muestras en los valores de frecuencia crítica esperados.

Las tres muestras tienen un aislamiento prácticamente idéntico, pudiéndose concluir que las fibras sintéticas, en las proporciones aquí estudiadas, ni aportan mejora ni restan prestaciones acústicas a las muestras con áridos siderúrgicos.

Sin embargo, si se contrastan las curvas de las muestras con fibras sintéticas (SF) frente a la de fibras metálicas (MF) tipo *Dramix*, puede observarse cómo esta última presenta una caída en el aislamiento por el efecto de coincidencia mucho mayor que las primeras (figura 4.26).

Este comportamiento peor se da únicamente en la frecuencia crítica y no en el resto del espectro, pese a la menor masa de la muestra I-SC-MF. Asimismo, destaca que la frecuencia crítica en esta ocasión no coincide con lo calculado en función del módulo de Young, siendo más alta de lo esperado (lo que correspondería con una rigidez menor).

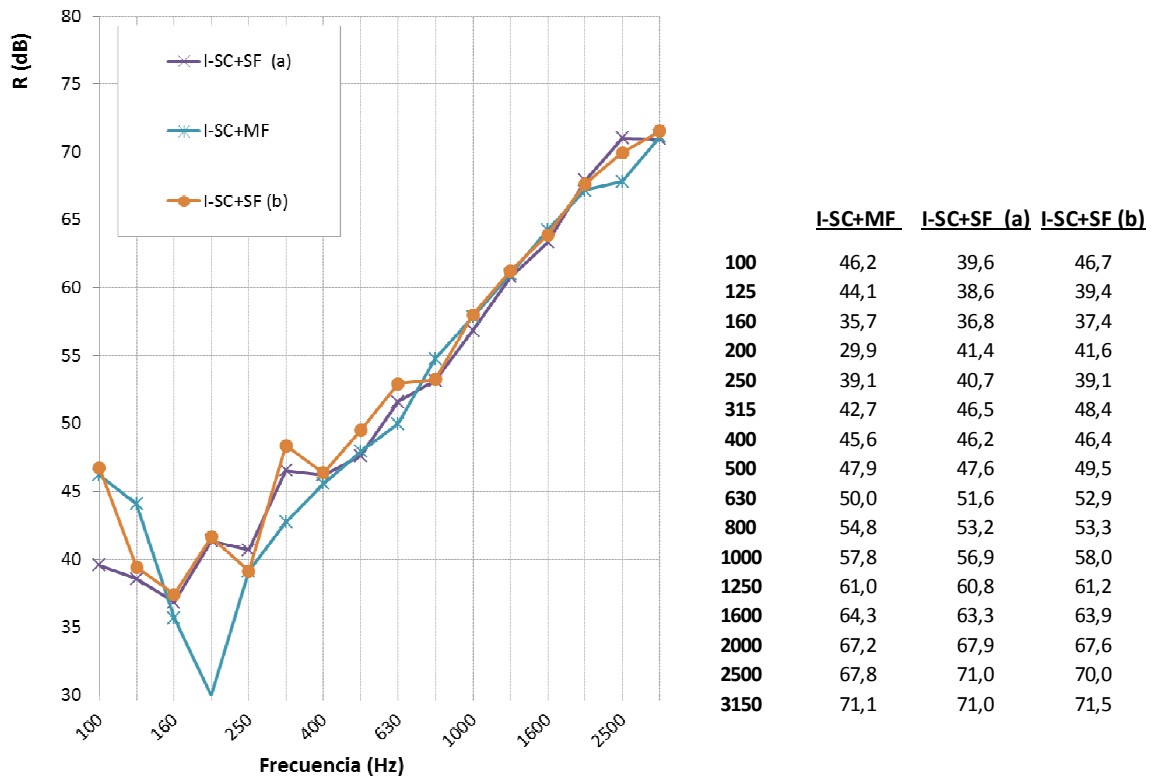


Figura 4.26: comparación del aislamiento de muestras con fibras sintéticas (SF) y metálicas (MF).

Por último, en la figura 4.27. se compara el resultados de aislamiento de la muestra con árido silíceos frente a la de árido calizos.

Como se comentó en el punto 4.2 (figura 4.15), dicha muestra presentó defectos durante su fabricación, no estando la lechada homogéneamente distribuida en su espesor. Sin embargo, su aislamiento medido sólo es ligeramente peor que el de la probeta de árido calizos, también más pesada.

Asimismo, tampoco en este caso coincide la frecuencia crítica obtenida en el ensayo con la esperada a partir de los datos del módulo de Young (que debería estar en los 250 Hz en lugar de los 160-200Hz).

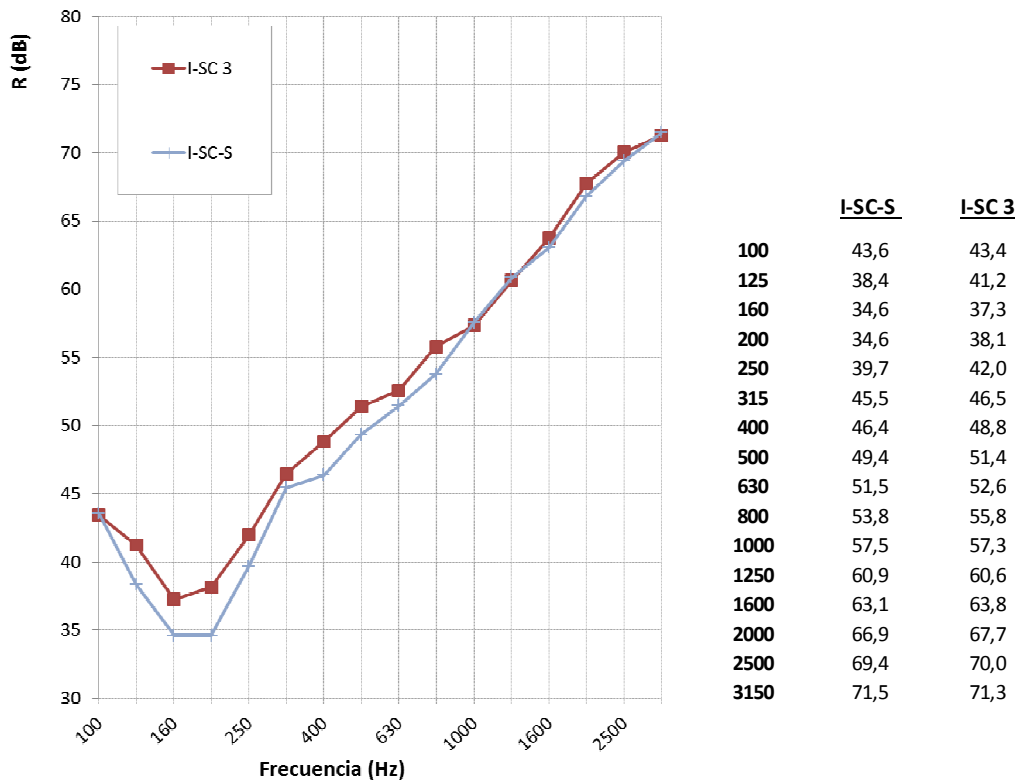


Figura 4.27: comparación del aislamiento de muestras con árido siderúrgico y áridos silíceos (I-SC-S) y calizos (I-SC-3).

#### 4.3.4.- Otros ensayos (serrín y referencias)

Fuera del ámbito de los áridos siderúrgicos, pero incorporando también otros subproductos industriales como es el serrín, se compara el aislamiento de una muestra de cemento tipo II con serrín. Comparación que se aborda empleando las referencias disponibles de hormigón bombeable y autocompactante con cemento tipo I.

Las masas de las tres probetas son muy similares, mostrando que el aligeramiento neto logrado con el serrín no es significativo (sin entrar a valorar otras propiedades térmicas que se buscaban con dicha amasada).

Su aislamiento a ruido aéreo, no obstante, sí que se ve afectado presentando valores algo inferiores a las otras dos muestras, sobre todo en la zona de frecuencia crítica, como se ve en la figura 4.28.

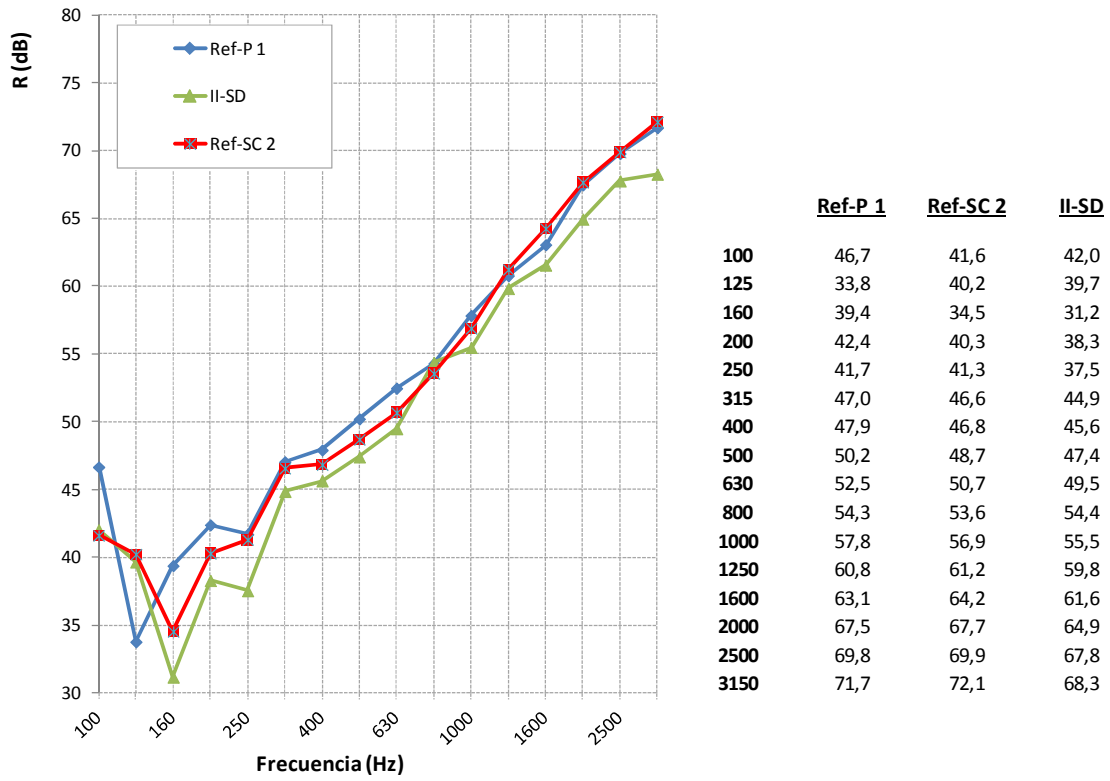


Figura 4.28: comparación del aislamiento de una muestra con serrín frente a las amasadas de referencia.

## 4.4.- Análisis de los resultados

A partir de las curvas de aislamiento obtenidas mediante ensayo, y después de haber aplicado el factor de escala correspondiente, se obtiene para cada caso el *índice de aislamiento acústico ponderado*  $R_w$ , según lo establecido en la UNE-EN ISO 717-1 [ISO 717, 2013]. Dicho índice resume en una única cifra la curva de aislamiento, calculándose a partir de las desviaciones que quedan por debajo de una curva de referencia, tal y como se ilustra en la figura 4.29. para la muestra II-SD.

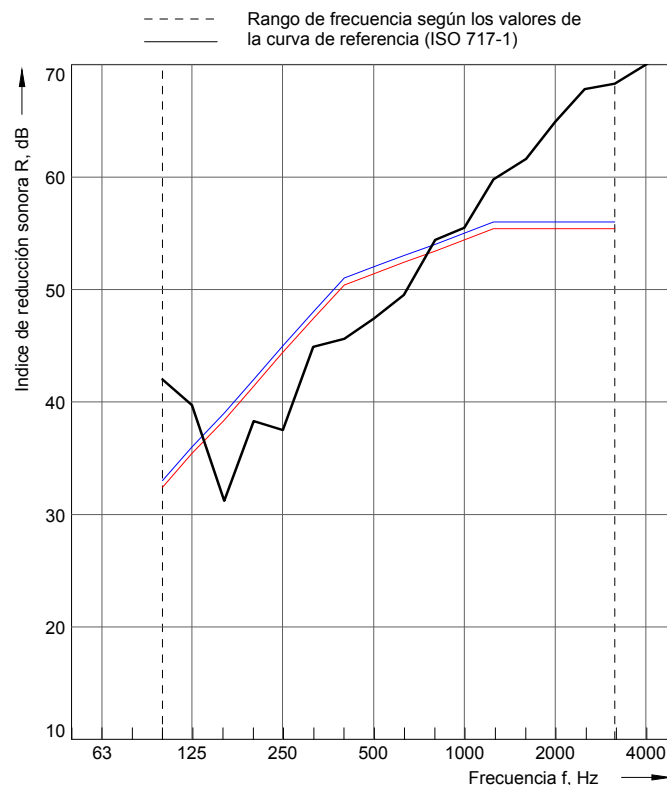


Figura 4.29: Cálculo del índice  $R_w$  para la muestra II-SD, comparando su curva de aislamiento con una curva de referencia desplazada (en línea roja punteada).

El uso de estos índices facilita una comparación más sencilla y directa, motivo por el cual son utilizados siempre a nivel comercial y normativo. No obstante, la calidad de la información es superior cuando se dan los datos en frecuencias, motivo por el cual estos últimos se utilizan especialmente a nivel de cálculos de ingeniería.

Los índices obtenidos (con un decimal) para la totalidad de las muestras de hormigón ensayadas se resumen en la figura 4.30. En aquellas amasadas de las que se realizaron dos probetas, se presenta el valor medio junto con los máximos y mínimos alcanzados.

Los resultados obtenidos están en el orden de magnitud esperado para muestras de hormigón de estos espesores, tal y como ya se desarrolló en el punto 3.6.3. El valor cuantitativo absoluto depende de las condiciones de contorno en cada laboratorio y, como se ha analizado ya en el punto 3.2.2.5, el uso de un marco de madera y montaje perimetral con silicona conlleva aislamientos medidos inferiores a los obtenidos en otras instalaciones.

Sin embargo, cualitativamente, la comparación entre todas las muestras es correcta ya que las condiciones de contorno de todos los ensayos han sido idénticas.

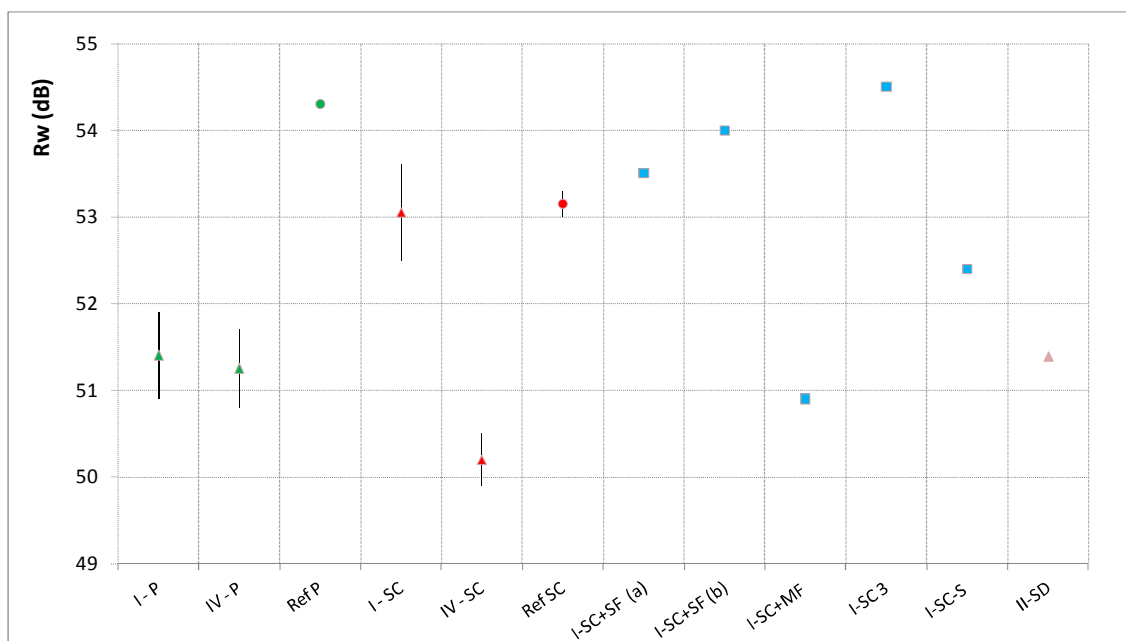


Figura 4.30: Índice Rw de las muestras de hormigón ensayadas.

Sin embargo a la hora de valorar y comparar resultados, hay que tener también muy en cuenta las diferencias en el espesor entre las distintas muestras (y por lo tanto en la masa, independientemente de la densidad de cada material), que son significativas tal y como se explicó ya en el punto 4.2.

Descartando las muestras indicadas en el punto 4.3 que han podido verse afectadas por problemas de sellado o ruido de fondo, la tabla 4.6 muestra el resumen de los aislamientos Rw obtenidos para cada tipo de hormigón, junto a su espesor (desescalado), densidad aproximada calculada a partir de la masa de cada probeta (en  $\text{kg/m}^3$ ) y módulo de Young.



	Rw (dB)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	Espesor promedio (mm)
IV-P 1	50,8	2755	32,6	158
Promedio I-P	51,4	2746	37,2	161
Promedio I-SC	53,1	2701	39,2	163
I-SC+SF (a)	53,5	2873	51,0	164
I-SC-S	52,4	2601	18,3	164
II-SD	51,4	2431		164
IV-SC 1	49,9	2349	31,1	170
I-SC+MF	50,9	2526	41,2	170
Ref-P 1	54,3	2312	56,5	176
I-SC+SF (b)	54,0	2693	37,7	176
Ref-SC 2	53,3	2138	39,3	183

Tabla 4.6: Aislamiento Rw obtenido junto a otras propiedades significativas en cada muestra.

La comparación directa de muestras que tendrían diferencias de hasta 25 mm de espesor distorsiona el análisis que, en este caso, busca únicamente comparar materiales.

Por ello, y ante la imposibilidad de abordar amasadas con un espesor estrictamente controlado, se ha optado por realizar una corrección teórica normalizando el resultado del Rw a un espesor estándar de 160mm. Para realizar dicha corrección se ha utilizado una curva de regresión logarítmica basada en los datos de la figura 4.14.

Los resultados de este ajuste, ordenados de menor a mayor aislamiento acústico, se muestran en la tabla 4.7 que, ahora sí, permite una comparación directa entre materiales.

	Rw (dB)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)
IV-P 1	50,5	2755	32,6
IV-SC 1	51,0	2349	31,1
Promedio I-P	51,5	2746	37,2
II-SD	51,8	2431	---
I-SC+MF	52,0	2526	41,2
I-SC-S	52,8	2601	18,3
Promedio I-SC	53,4	2701	39,2
I-SC+SF (a)	53,9	2873	51,0
Ref-SC 2	55,6	2138	39,3
I-SC+SF (b)	55,7	2693	37,7
Ref-P 1	56,0	2312	56,5

Tabla 4.7: Aislamiento Rw corregido para normalizar el espesor a 160mm para todas las muestras.

La figura 4.31 muestra gráficamente estos mismos datos. Al objeto de emplear una escala igual en todos los parámetros que permita identificar tendencias, en lugar de la densidad, se ha graficado el peso que tendría la probeta de 160 mm en cada caso.

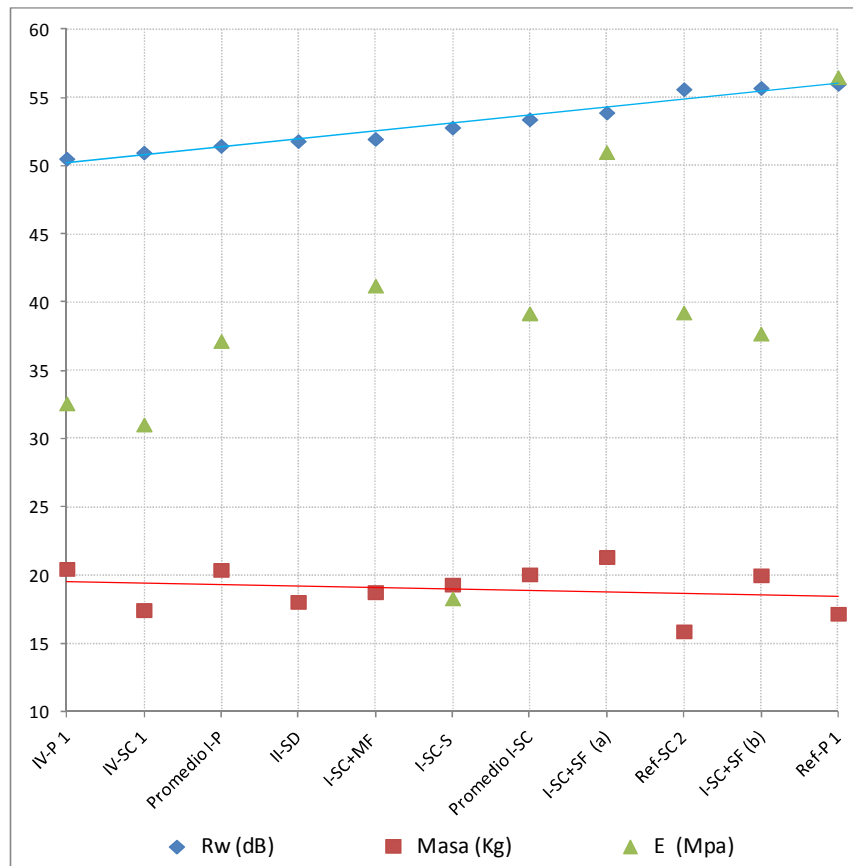


Figura 4.31: Índice  $R_w$  corregido por espesor, frente a masa y módulo de Young en muestras ensayadas.

No se aprecia correlación evidente entre aislamiento y módulo de Young. Pero, más sorprendente aún, es el hecho de que la masa y el aislamiento acústico no aumentan de forma simultánea en este caso, contradiciendo la creencia habitual de que un hormigón con mayor densidad que otro debería tener, necesariamente, más aislamiento acústico.

Se plantea la hipótesis de que la adición de los áridos siderúrgicos disminuye de algún modo el amortiguamiento interno del material y que el aumento de densidad no es capaz de compensar dicho efecto. No obstante, sería necesario realizar investigaciones experimentales en profundidad sobre ello y, llegado el momento, encontrar la explicación a este fenómeno de forma que se pueda, eventualmente, identificar alguna vía de mejora del aislamiento acústico.

## 4.5.- Ruido de impactos

Aunque el nivel de ruido de impactos no es parámetro que se pueda medir directamente en una muestra a escala, tal y como se explicó en el punto 2.3.5, sí se puede estimar su valor a partir del resultado de aislamiento a ruido aéreo.

Aplicando la ley de reciprocidad, se muestra en la figura 4.32 los valores esperables del índice ponderado de ruido de impactos  $L_{n,w}$ .

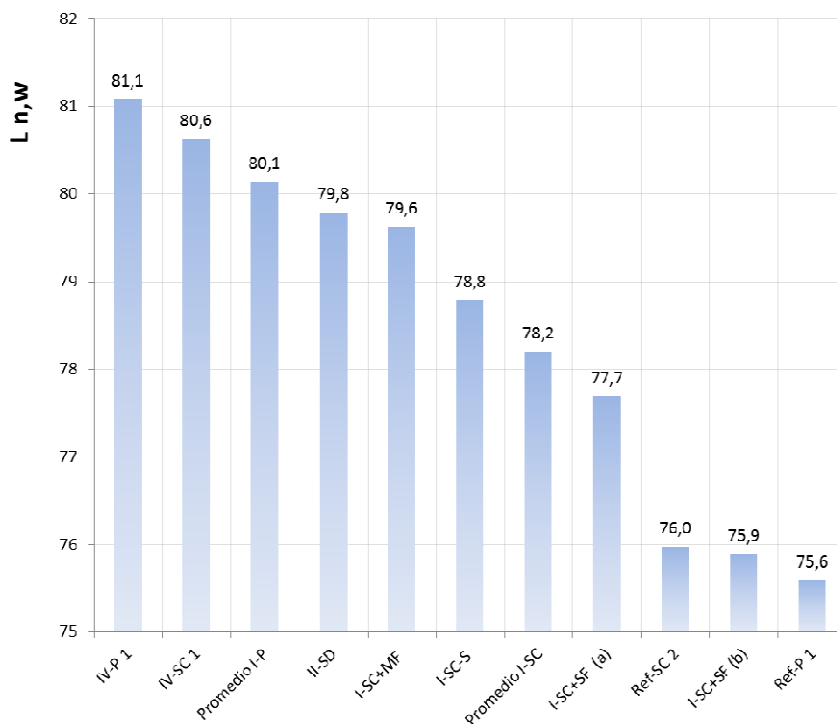


Figura 4.32: Índice  $L_{n,w}$  corregido por espesor, obtenido por la ley de reciprocidad.

Análogamente al caso de ruido aéreo, los resultados obtenidos están en el orden de magnitud esperado para muestras de hormigón de estos espesores y, además, los datos mostrados son válidos a nivel de comparación entre muestras, dependiendo el valor cuantitativo absoluto de las condiciones de contorno de cada laboratorio.

## **4.6.- Aplicabilidad acústica de los hormigones con subproductos industriales**

Como se ha mostrado en el punto 4.4, los resultados de aislamiento acústico obtenidos al incorporar subproductos industriales son algo peores que en un hormigón equivalente con árido natural. Pero ello no significa, en todo caso, que no sean suficientemente buenos para su uso en edificación residencial o terciaria.

Entre las aplicaciones reales de estos hormigones, podría estar la de su utilización como muros de carga o losas, o también su uso para prefabricación de elementos tales como bloques. En este segundo caso, habría que estudiar si las mezclas desarrolladas son las más apropiadas para ello o si se podrían sacrificar otras propiedades mecánicas a cambio de lograr un aumento del aislamiento acústico. Es por lo tanto una vía de investigación que queda abierta para el futuro.

En el caso de muros/losas, la aplicación directa de las amasadas estudiadas no requiere de investigaciones adicionales para cumplir los requisitos mínimos que actualmente fija el CTE DB-HR, pudiendo aplicarse ya sin problemas tanto como separadores verticales *tipo 1* o como elementos de separación horizontal (ver punto 3.1.2.3 del CTE DB-HR).

Fuera del campo de la edificación, pueden existir también otros usos de estos hormigones aprovechando sus características acústicas, como es por ejemplo la construcción de pantallas antiruido de hormigón, construcción de centros de transformación, etc...

## **4.7.- Conclusiones**

Como primera conclusión, importante para futuras investigaciones, es necesario asumir la debilidad que supone no poder asegurar una calibración dimensional suficiente en las probetas, como así ocurre en la realidad constructiva/edificatoria (holguras dimensionales de la ejecutoria constructiva: desalineamientos permitidos entre ejes pilares, variabilidad de secciones de vigas/pilares, etc.), muchas de ellas recogidas en los propios códigos vía coeficientes de seguridad. Esta cuestión es especialmente delicada en lo referente al espesor para luego poder comparar adecuadamente distintos materiales. Una solución posible pasa por la utilización de microhormigones (áridos menores) y/o conjugar las influencias de los efectos de escala en pieza (espesor) y material (tamaño árido). En definitiva, un problema complejo de resolver. El uso de moldes metálicos de dimensiones muy calibradas a modo de encofrado de prefabricación puede ser una solución suficientemente satisfactoria.

En cuanto a los resultados de aislamiento acústico obtenidos para los hormigones bombeables, se ha mostrado que no hay diferencias significativas entre el uso de cementos tipo I y IV, siendo en ambos casos las prestaciones acústicas algo peores que frente al hormigón de referencia, pese a ser este más ligero.

En los hormigones autocompactantes este patrón cambia. El uso de cemento tipo I implica una mejora en el aislamiento que no se justifica únicamente por la diferencia de peso. Asimismo, el hormigón de referencia con áridos naturales tiene un mejor aislamiento.

En cuanto a las amasadas con fibras sintéticas, estas no parecen afectar al aislamiento acústico, aunque para las fibras metálicas el comportamiento si empeora. Y esto lo hace, especialmente, a la frecuencia crítica, que además no se ubica en la banda de 1/3 de octava que teóricamente le correspondería, siendo un campo a estudiar más en detalle para el futuro.

Por último, la muestra con serrín buscando mejorar las prestaciones térmicas (otra vía de doctorado en el presente grupo de investigación) tiene un aislamiento acústico algo peor que el hormigón de referencia, aunque en este caso el uso de cemento tipo II puede haber tenido también influencia.

Como conclusión global, puede afirmarse que, contradiciendo lo esperado, los hormigones con escorias tienen aislamiento acústico inferior al que sería esperable dada

su mayor densidad. Ello, no obstante, no invalidaría sus posibilidades reales de uso tanto en separaciones verticales (muros) como horizontales (losas), donde también se ha estimado su aislamiento a ruido de impactos, al igual que otros posible usos donde el aislamiento acústico sea un parámetro relevante.



# Capítulo 5

## *Aislamiento acústico de yesos con áridos siderúrgicos*





## 5.1.- Descripción de los elementos ensayados

El tercer objetivo parcial de esta Tesis Doctoral, la caracterización del aislamiento acústico de yesos y escayolas que incorporan subproductos de la fabricación del acero, es abordado en el presente capítulo.

El yeso como material de construcción, tal y como ya se refería en la presente tesis doctoral, se utiliza habitualmente como pasta para guarnecidos y enlucidos (amasados y aplicados *in situ*); o bien prefabricado, como paneles de yeso laminado o natural para tabiques y escayolados para techos. Recientemente está cobrando importancia una tercera opción mixta, consistente en el guarnecido de los tabiques de fábrica de ladrillo mediante el trasdosado directo empleando placas de yeso laminado o natural, con el objetivo de mejorar el rendimiento en obra (evitando tiempos de secado), además de simplificar la ejecución de los encuentros de tabiquería sobre bandas elásticas [Santiago *et al*, 2017; Esteban *et al* 2005].

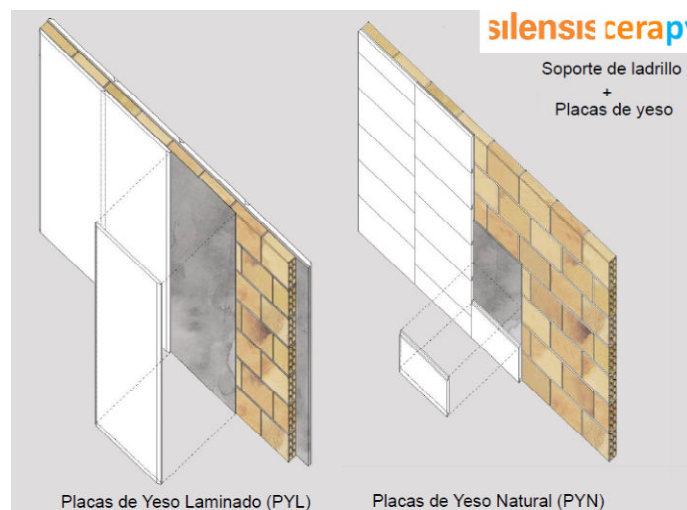


Figura 5.1: Revestimiento de fábrica de ladrillo mediante trasdosado directo de placa de yeso laminado o natural. Imagen cortesía de Hispalyt

El efecto de los revestimientos sobre el aislamiento acústico del conjunto del cerramiento no es en absoluto despreciable, como se puede comprobar, por ejemplo, en estudios realizados comparando las prestaciones de enlucidos y enfoscados sobre un mismo paramento base [Esteban *et al*, 1999]. La figura 5.2 muestra los aislamientos medidos sobre paredes de fábrica cerámica y de hormigón prefabricado donde, con iguales espesores, se consiguen incrementos de 4 o 5 dB en el índice de aislamiento

acústico ponderado. Ello da una idea del orden de magnitud de mejora que podría conseguirse incorporando escorias u otros subproductos a los yesos.

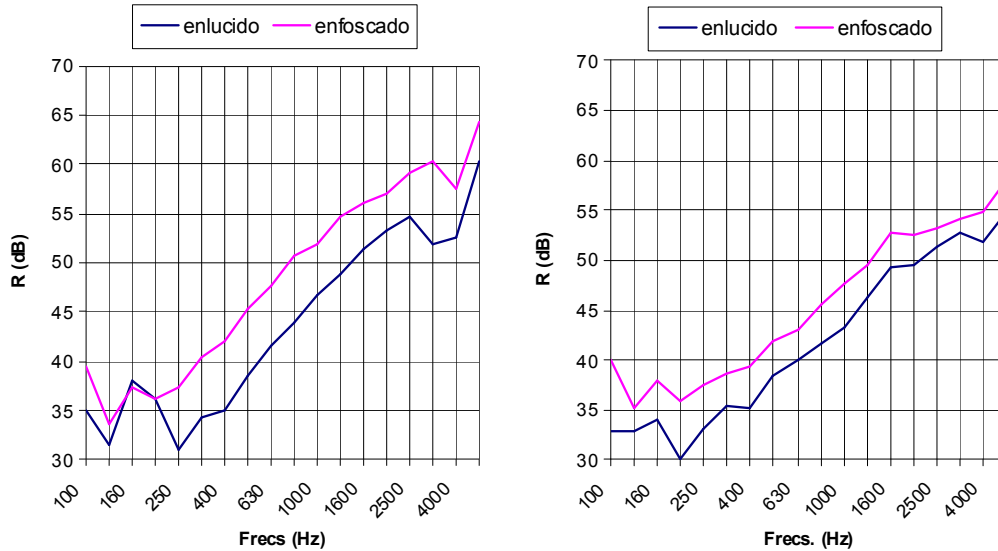


Figura 5.2: Mejora en el aislamiento modificando el material de revestimiento sobre fábricas de prefabricado de hormigón y de arcilla cocida. Fuente: Esteban 1999

Al contrario que en el capítulo anterior, donde las propiedades de hormigones con incorporación de escorias negras, tanto en fresco como endurecidos, ya están siendo estudiadas desde años atrás, en el caso de los yesos/escayolas no existen experiencias al respecto. Las amasadas propuestas aquí se entienden entonces como una primera aproximación de tanteo para experimentar con aspectos tales como la trabajabilidad, propiedades mecánicas, estéticas (importantes en un elemento que puede quedar a la vista) y, cómo no, acústicas. Recordar aquí cómo la escayola (es el yeso calcinado mezclado con agua) es un producto industrial obtenido del yeso natural (o aljez) o, dicho de otro modo, es un yeso de alta calidad y grano muy fino, con pureza mayor del 87% en mineral aljez.

Se han realizado dos probetas sin escorias a modo de valor de referencia (Ref-yeso y Ref-escayola), con la proporción de agua de amasado (según indicaciones del fabricante) correspondiente (0.75 l/kg para el yeso y 0.65 l/kg para la escayola).

Se ha ensayado también una placa de yeso laminado estándar de 15 mm de la marca *Knauf*, junto con las dos placas en espesor 12,5 mm ya descritas para el proceso de validación de las cámaras acústicas en la sección 3.6.2, con el objeto de contar con más valores de comparación frente a soluciones comerciales existentes en el mercado.

Para la fabricación de las placas de yeso laminado, además del yeso y la celulosa que recubre el conjunto, se aportan una serie de aditivos por parte de los fabricantes, al objeto de modificar parámetros como la densidad o aportar propiedades específicas de reacción al fuego, humedad, etc...



Figura 5.3: Sección de una de las placas de yeso laminado, donde se aprecia la presencia de fibras sintéticas.

En concreto, para la placa *Phonique*, es pertinente añadir en este punto su descripción que el fabricante declara en su catálogo: *“La selección en cantera del mineral de yeso y la modificación de su hábito cristalino durante el proceso de rehidratación, permiten obtener un placa de yeso con un menor módulo de elasticidad dinámico, y que junto con su densidad, aporta una menor rigidez a la placa. El empleo en los sistemas de placa de yeso laminado de Placo Phonique, permite incrementar hasta en 3 dB el aislamiento acústico al ruido aéreo”* [www.placo.es].

Para la fabricación de las probetas se han utilizado tanto yeso tosco YG como escayola E-30 comerciales. Se designa como YG (antiguamente llamado negro, moreno o tosco) al yeso grueso de construcción que está constituido, fundamentalmente, por sulfato cálcico hemihidrato y anhidrita II artificial, con la eventual incorporación de aditivos reguladores del fraguado. El YG suele emplearse para pasta de agarre en la ejecución de tabicados, en revestimientos interiores y como conglomerante auxiliar en obra. El yeso utilizado es del fabricante “Yesos Albi”, extraído de canteras en Burgos y denominación comercial “yeso manual tosco YG”.

En cuanto a la escayola, término que se utiliza para designar un yeso hemihidratado de especial pureza, blancura y finura, se designa E-30 la constituida, fundamentalmente, por sulfato cálcico hemihidrato con la posible incorporación de aditivos reguladores del fraguado. Suele utilizarse en la ejecución de elementos prefabricados para tabiques y techos. En este caso, se ha utilizado la escayola “E-30 VA” de *Iberplaco*.

Los áridos siderúrgicos, finos <4,75 mm como se puede ver en la figura 5.4, han sido suministrados por la empresa *Hormor* ([www.grupoetxeberria.com](http://www.grupoetxeberria.com)). El detalle de sus propiedades fundamentales pueden consultarse en la figura 4.4 y tabla 4.2 .

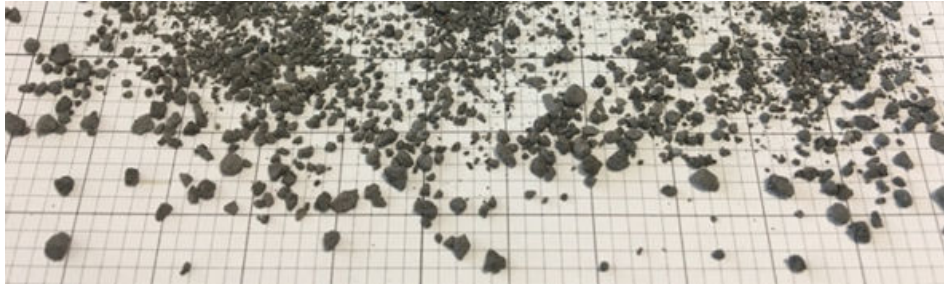


Figura 5.4: Muestra de los finos de escoria negra utilizados (tamaño de cuadrícula fina =2mm).

En cuanto a las probetas con escoria negra, la proporción de finos añadidos se estimó en el orden del 20% en volumen. Teniendo en cuenta las densidades del yeso fraguado y de la escoria, la proporción en peso es del 33% de escoria y 66% yeso más agua.

La muestra de yeso y escorias negras (EAFS) queda, por lo tanto, con la dosificación de una masa total fresca de (yeso + agua) 5,85 kg, constituida por yeso con 3,34 kg y agua en un volumen de 2,5 l; siendo la parte de escoria en una cantidad de 2,9kg. El proceso de presenta en la figura



Figura 5.5: Amasada de yeso con escorias EAFS.

Y para la muestra de Escayola y EAFS se empleó de Escayola más agua un total de 6,6 kg de masa (escayola 4 kg y agua 2,6 l), además de un peso de escoria de 3,1 kg. El proceso se presenta en la siguiente figura 5.6.



*Figura 5.6: Amasada de escayola con escorias EAFS.*

Todas las probetas se han fabricado con un espesor de 15 mm, valor muy común tanto en las placas prefabricadas como para los espesores de enlucido sobre tabiques habituales en la construcción residencial.

El tiempo de fraguado ha sido superior a 28 días asegurándose, asimismo, que el grado de humedad remanente en las probetas estaba ya equilibrado, mediante la medida periódica de su peso.

## 5.2.- Comentarios sobre las muestras

En esta ocasión, con la experiencia adquirida tras la fabricación de las amasadas de hormigón y gracias también, en parte, a la mayor facilidad de realización de las amasadas de yeso, los espesores de todas las muestras se corresponden con el valor nominal de 15mm, permitiendo una comparación directa entre probetas sin necesidad de realizar otros ajustes. Las muestras de placa de yeso laminado, comerciales, tienen también el espesor nominal declarado por el fabricante.

En las probetas que incorporan escorias, existía la duda sobre si estas podrían no repartirse uniformemente por toda la mezcla, aglutinándose por ejemplo de forma mayoritaria en el fondo del molde por efecto de la gravedad. Sin embargo, ha podido constatarse que dicha eventualidad no ha tenido lugar, siendo en los dos casos la distribución de escorias satisfactoriamente uniforme en todo el espesor de las probetas.

Es destacable, asimismo, que la trabajabilidad de las amasadas, tiempos de fraguado, etc., no se han visto negativamente afectados por la incorporación de las escorias. Lo cual se considera un aspecto positivo de cara al futuro de esta línea de investigación.

En cuanto a las propiedades físicas, en esta ocasión se han medido las masas superficiales de las distintas probetas, tal y como queda recogido en la tabla 5.1:

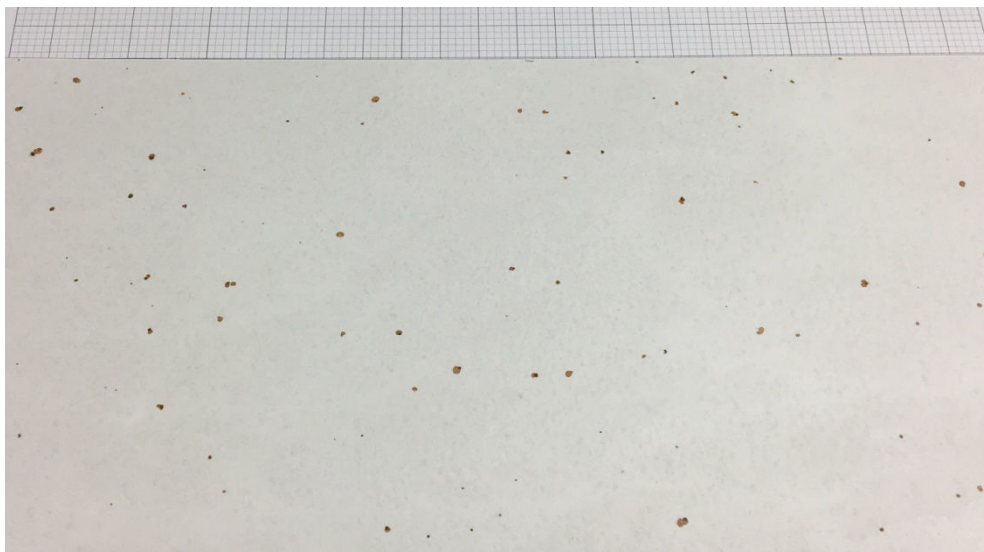
	Masa (kg)	Densidad superficial (kg/m <sup>2</sup> )
PYL <i>phonique</i> 12.5 mm	3,63	12,3
PYL estándar 12.5 mm	2,63	8,9
PYL estándar 15 mm	3,23	10,9
Ref-Yeso	4,69	15,9
Ref-Escayola	5,06	17,2
Yeso + EAFS	6,30	21,4
Escayola + EAFS	6,45	21,9

*Tabla 5.1: Densidades de las muestras de yeso ensayadas.*

Como puede apreciarse, la densidad de las placas de yeso laminado es considerablemente inferior a las probetas de referencia de yeso o escayola natural fabricadas, siendo la placa “acústica” notablemente más densa que las estándar (un 38%).

El incremento de masa debido a la incorporación de las escorias negras es del 28% para la amasada de escayola y del 34 % para la de yeso, desconociéndose a la fecha cómo ha afectado a otras propiedades mecánicas. En ausencia de otros datos, se tomarán los presentados en la tabla 2.2. como valores de referencia orientativos.

A nivel puramente estético, es mencionable el hecho de que (como por otra parte era de esperar pues las EAFS contienen óxidos de Fe) hayan aparecido pequeños puntos de óxido en la superficie de las dos muestras que incorporan las escorias negras, tal y como se puede ver en la figura 5.7.



*Figura 5.7: Manchas de óxido superficiales (tamaño de cuadrícula fina = 2 mm).*

Dichas manchas no han aumentado de tamaño después del secado de las probetas, estando conservadas en las condiciones de humedad y temperatura existentes en cualquier vivienda. No obstante, no se considera que haya pasado un periodo de tiempo suficientemente representativo como para descartar problemas a más largo plazo y ello debería ser objeto de un estudio en detalle antes de validar la viabilidad para un uso comercial de estos yesos con escoria negra. Dicho esto además, en el ánimo de valorar, por ejemplo, su interacción con pinturas o qué ocurre cuando quedan confinadas bajo una capa de celulosa como es el caso de las placas de yeso laminado, donde podría no suponer inconvenientes.

### **5.3.- Resultados de aislamiento acústico obtenidos**

Se analizan a continuación los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo obtenidos para las muestras de yeso descritas anteriormente. Por claridad en la exposición, y análogamente a lo realizado para las muestras de hormigón, los resultados se presentan agrupados por diversos criterios, siempre buscando facilitar la comparación y análisis de los resultados obtenidos.

En este caso, no tiene sentido escalar el espesor de las muestras puesto que la aplicación real coincide con los espesores absolutos ensayados en las cámaras a escala. Por lo tanto se realiza la corrección teórica de los valores por debajo de las frecuencias donde se consigue un campo difuso dentro de las cámaras, tal y como se describe en el apartado 3.5 de la presente Tesis Doctoral. Las curvas de aislamiento que se muestran son, por lo tanto, obtenidas mediante estimación teórica hasta la frecuencia de 630 Hz y, empíricamente, en las frecuencias superiores.

Aplicando los datos de espesor reales, junto con el valor de referencia para la velocidad de propagación de ondas longitudinales dada en la tabla 2.2 para yesos, el cálculo teórico de las frecuencias críticas arroja valores situados entre las bandas de 1/3 de octava de 2500 y 3150 Hz.

Estos valores, estimados a partir de la ecuación correspondiente ya expuesta, coinciden con los medidos experimentalmente. Por ejemplo, en la figura 5.8 se muestran los resultados de aislamiento a ruido aéreo de las tres placas comerciales de yeso laminado. En la referida figura se aprecia cómo la placa estándar de 12,5 mm tiene una frecuencia crítica ligeramente superior a la de 15 mm (debido a su menor rigidez a flexión por el menor canto frente al mismo material). La placa *Phonique* presenta la frecuencia crítica en la misma banda de 1/3 de octava aunque, siendo de dos casas comerciales diferentes, no puede concluirse si tiene o no la menor rigidez declarada por el fabricante. En cualquiera de los casos, sus prestaciones, como ya se vio en el capítulo 3, son claramente superiores a la placa estándar del mismo espesor, e incluso mejoran el aislamiento de la placa de 15 mm en frecuencias medias.

Las curvas discurren por lo demás paralelas entre sí, con pendiente de 6 dB/oct en la zona de ley de masas (que, se recuerda, ha sido calculada teóricamente) y de 9-10 dB/oct por encima de esta, conforme a lo esperado.



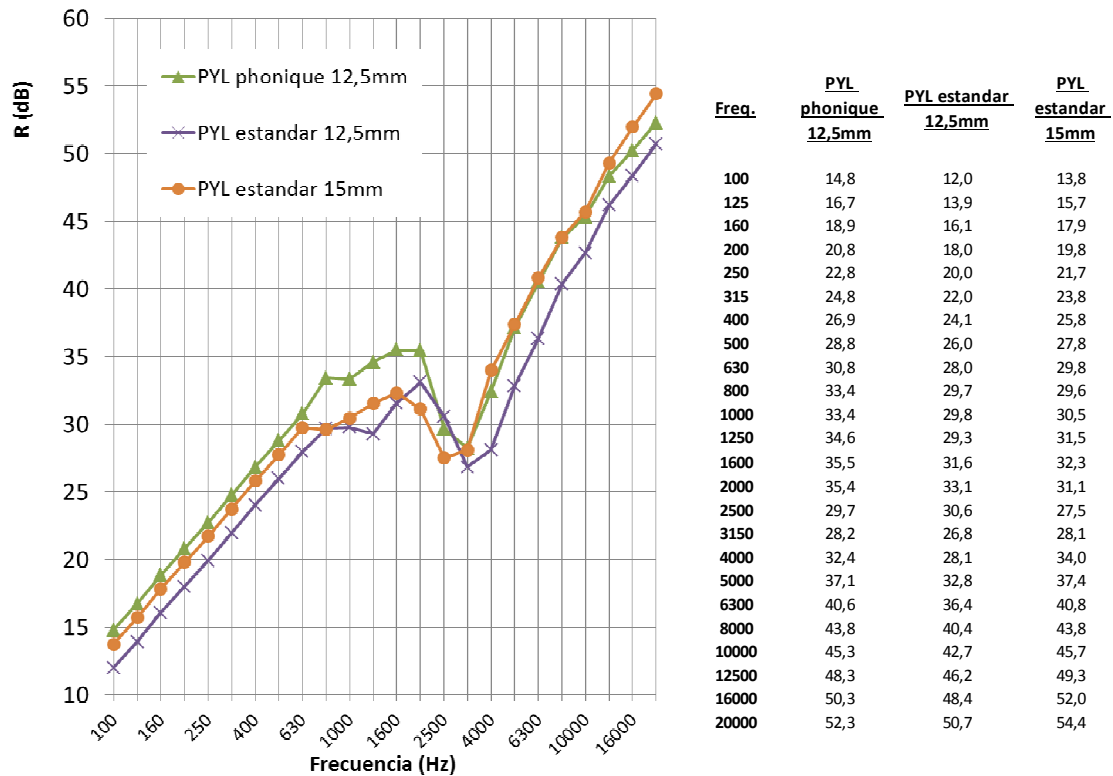


Figura 5.8: aislamientos medidos para las muestras comerciales de PYL.

Entrando ya en el comportamiento de las mezclas con áridos siderúrgicos, la figura 5.9 recoge los aislamientos a ruido aéreo determinados para las muestras de yeso natural (Ref-yeso), yeso con incorporación de escoria negra (Yeso+EAFS) y placa de yeso laminado (PYL estándar 15mm), las tres con idéntico espesor.

Las dos muestras sin escoria negra presentan una frecuencia de coincidencia en la misma banda de los 2500Hz, mientras que la que incorpora finos de EAFS tiene una frecuencia crítica algo superior, en la banda de 3150 Hz. Ello sugiere, a falta de confirmaciones más directas, que la adición de los áridos siderúrgicos tiene cierta influencia en la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, relacionada directamente con la rigidez a flexión, siendo el módulo de Young esperable algo más bajo por efecto de la adición de escorias.

Por debajo la frecuencia crítica los aislamientos se muestran proporcionales a la densidad superficial de cada muestra, por supuesto en la zona de la curva calculada pero también en el rango de los 800 a los 2000 Hz que ha sido medido empíricamente. El yeso con EAFS presenta, por lo tanto, el mejor comportamiento, siendo unos 2,5 dB mejor que

el yeso natural y cerca de 6 dB más aislante que la placa de yeso laminado (que pesa prácticamente la mitad).

Sin embargo, por encima de la frecuencia crítica, en la zona contralada por el amortiguamiento, los valores para las tres muestras son prácticamente iguales en todas las frecuencias. El comportamiento en dicha zona de frecuencias puede describirse a partir de la ecuación correspondiente del capítulo 2. Existiendo variaciones significativas entre la densidad de los tres materiales, a igual amortiguamiento, serían esperables también diferencias en los aislamientos medidos. Por lo tanto, parece que el amortiguamiento es mejor para la placa de yeso laminado, quizás por el propio efecto de la celulosa o de los aditivos utilizados, seguida por la placa de yeso natural. El menor amortiguamiento interno correspondería al yeso con finos EAFS, tendencia que ya se había apuntado también para el caso de los hormigones descritos en el capítulo 4.

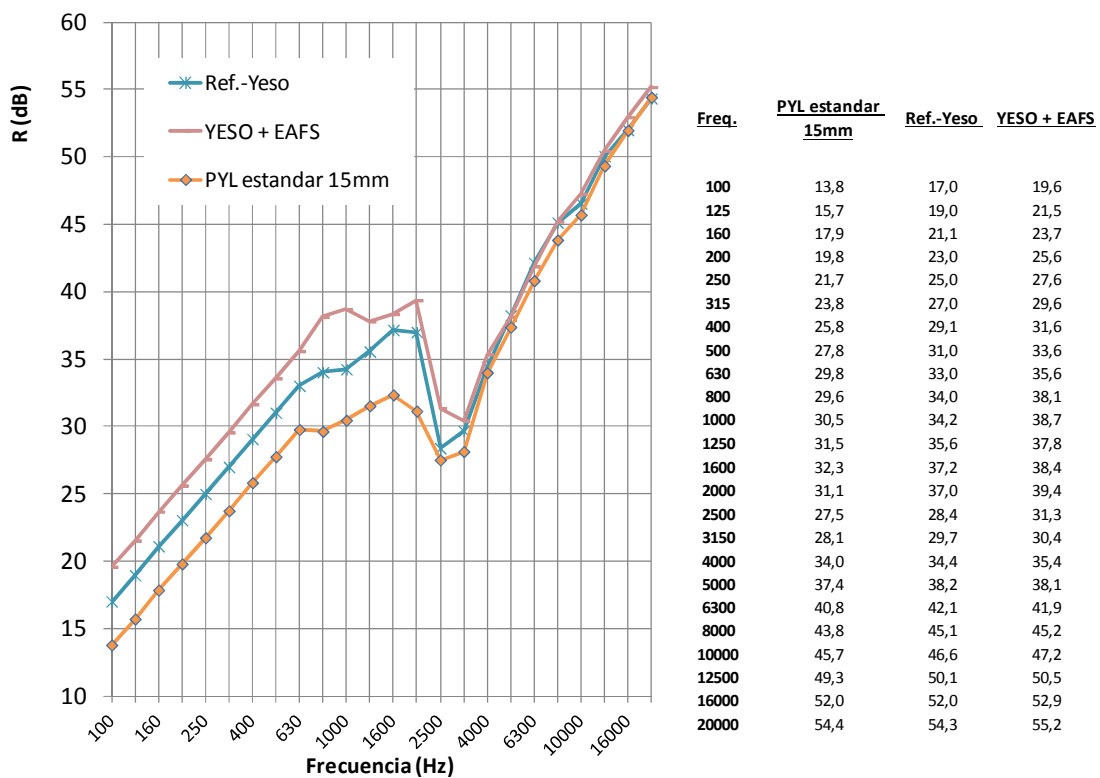


Figura 5.9: aislamientos medidos para las muestras de yeso de 15 mm (placa de yeso laminado, yeso natural y yeso con escoria negra).

El hecho de que la influencia de la densidad y del amortiguamiento interno, parámetros en principio no directamente relacionados entre sí, se anulen casi exactamente entra ciertamente en el terreno de lo improbable. Por ello se han analizado

y revisado otras posibilidades como errores humanos durante los ensayos y/o el tratamiento de datos o la existencia de transmisiones indirectas de algún tipo que *bypasdeen* la transmisión acústica entre cámaras, no habiéndose detectado nada que cuestione los resultados presentados.

Por lo tanto, y aunque sería deseable confirmarlo mediante una campaña experimental más amplia con otras dosificaciones distintas de escoria negra, por ejemplo, la coincidencia de los aislamientos medidos entre los 2500Hz y 20 kHz para las tres muestras se atribuye a una casualidad.

En cuanto a las escayolas, el aislamiento a ruido aéreo medido sigue exactamente el mismo patrón que para los yesos, comportamiento este esperable al tratarse de materiales muy similares. En la figura 5.10 se puede observar cómo la frecuencia crítica para los casos de escayolas con y sin escorias negras están en la misma banda de frecuencia. No obstante lo cual, en el caso del material sin adiciones, esta frecuencia se insinúa un poco más baja, indicando un módulo de Young quizás algo mayor.

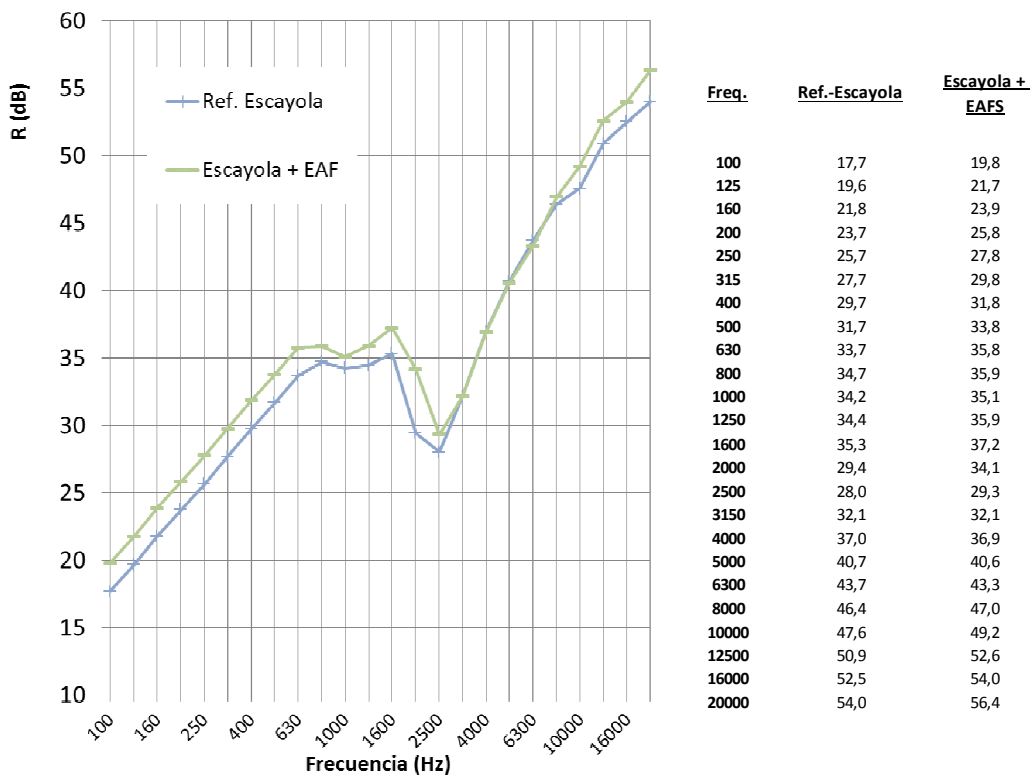


Figura 5.10: aislamientos medidos para las muestras de escayola de 15 mm (natural y con escoria negra).

Los valores en la zona de masas corresponden al comportamiento esperado y, por encima de la frecuencia crítica, vuelve a mostrarse el comportamiento descrito para los yesos, al que se da la misma explicación por la citada similitud entre materiales base y proporción de escorias añadida.

La caída en altas frecuencias de la curva de aislamiento de la *Ref. Escayola* se interpreta debida a un sellado imperfecto de la muestra.

Por último, comparando en la figura 5.11 los aislamientos de las dos muestras con escoria negra, puede verse cómo en la zona de ley de masas el comportamiento es idéntico entre ellas y, a partir de ahí, la escayola con una frecuencia crítica algo inferior es algo más aislante en altas frecuencias.

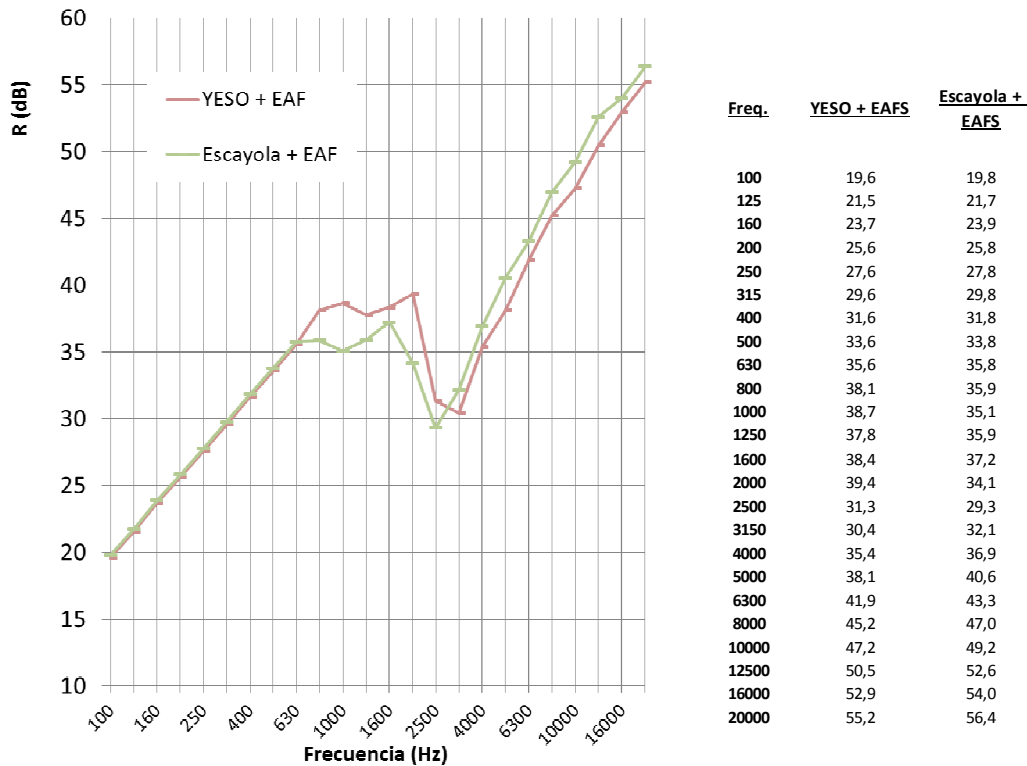


Figura 5.11: aislamientos medidos para las dos muestras (yeso y escayola) incorporando escoria negra.

## 5.4.- Análisis de los resultados

Siguiendo el mismo criterio que en el análisis de resultados de los aislamientos de hormigones recogidos en el apartado 4.4., se obtiene el *índice de aislamiento acústico ponderado*  $R_w$ , a partir de las curvas de aislamiento presentadas para cada muestra, resumiendo en una única cifra las curvas de aislamiento.

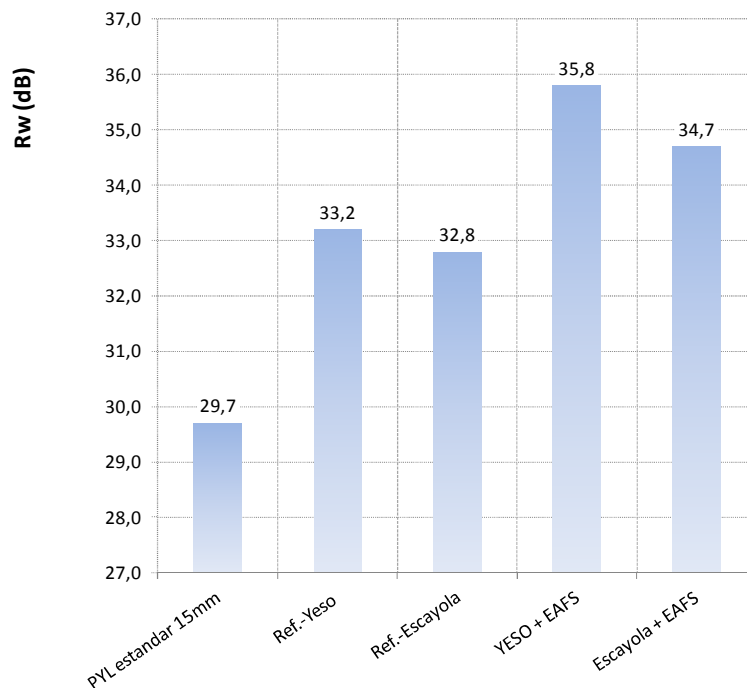


Figura 5.12: Índice  $R_w$  de las muestras de yeso/escayola ensayadas.

Como los índices se calculan a partir de los datos de aislamiento en el rango de 100 a 3150 Hz, la zona controlada por la masa tiene una influencia muy grande, de forma que los aislamientos son proporcionales a las densidades superficiales recogidas en la tabla 5.1. De este modo, se constata cómo la adición de las escorias EAFS, realizada a las amasadas de yeso o escayola, incrementan el aislamiento entre 2 y 2,6 dB en índice global. Es importante resaltar que esta mejora existe en los casos de espesores del orden de los ensayados (15 mm), aplicable por ejemplo al caso de los cerramientos con entramados autoportantes.

Si se estuvieran considerando elementos de tabiquería de escayola (en desuso actualmente pero relativamente habituales hace no demasiado tiempo) de, por ejemplo, 90 a 100 mm de espesor, habría que escalar las curvas de aislamiento obtenidas, tal y

como se ilustra en la figura 5.13. La frecuencia de 630Hz pasaría a ser en este caso 100Hz, siendo entonces los valores de aislamiento muy similares, con una mejora en el índice global inferior a 1 dB.

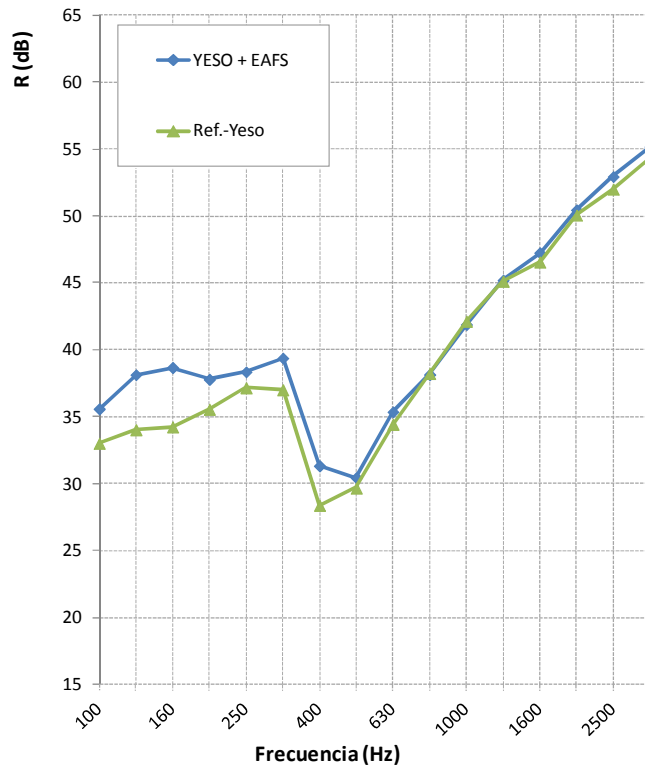


Figura 5.13: aislamientos medidos para las muestras de yeso (natural y con EAFS), ya aplicado el factor de escala 1:6,3.

Quedaría, por último, valorar la posible mejora al sustituir un enlucido tradicional por otro ejecutado con yesos que incorporen escorias negras, tanto aplicadas in situ como en forma de trasdosado directo, como en el caso del sistema *Cerapy* de la figura 5.1. Con los datos obtenidos en la presente Tesis Doctoral no es posible dar un valor adecuado.

Futuras investigaciones deberían, por lo tanto, cuantificar el incremento real en las prestaciones de dichos sistemas constructivos respecto al tradicional. No obstante, la mejora acústica aportada por la aplicación de un enfoscado de mortero frente a enlucidos de yeso, mostrada en la figura 5.3, permite ser optimista al respecto de la viabilidad del yeso mezclado con finos de escoria negra en revestimientos de altas prestaciones acústicas.

## **5.5.- Conclusiones**

La sustitución parcial del mineral de yeso por escorias siderúrgicas provenientes de horno eléctrico de arco *EAFS* es un campo de investigación nuevo que, después de este trabajo, puede considerarse abre prometedoras posibilidades en el campo de la acústica. Y lo hace, dado que las prestaciones de aislamiento a ruido aéreo obtenidas se han mostrado significativamente superiores a las del material natural sin adiciones. Todo ello, reduciendo, a la vez, el impacto ambiental de la extracción del yeso en canteras, además de dar una vía de alto valor añadido a los residuos siderúrgicos. Este primer trabajo de aproximación, pese a ser limitado en cuanto a las dosificaciones estudiadas, se considera suficientemente relevante.

La mejora es evidente en elementos de pequeño espesor (12-15mm), donde el aumento de masa se traduce en una mejora del aislamiento en el rango de frecuencias habitual de 100 a 3150Hz. Para elementos de mayor espesor, como podrían ser bloques de escayola, la mejora es mucho más reducida debido a la pérdida de amortiguamiento que supone la adición de las escorias, análogamente a lo que se ha visto también para el caso de los hormigones en el capítulo 4.

Las prestaciones en el caso de enlucidos (en fresco o como trasdosado directo) sobre fábricas de ladrillo, no pueden ser determinadas con los datos obtenidos hasta la fecha, siendo necesario avanzar y profundizar más en la vía de investigación abierta. No obstante, experiencias con otras variantes en los revestimientos, hacen que se pueda ser optimista respecto al uso de los yesos con escorias negras.

La trabajabilidad y homogeneidad de las amasadas realizadas se ha mostrado satisfactoria, aunque una mayor y más detallada investigación sería necesaria antes de validar completamente su viabilidad en obra. Igualmente, el aspecto estético ha de ser comprobado en ensayos a más largo plazo, dado el uso de estos materiales como revestimientos.







# Capítulo 6

## *Conclusiones y futuras líneas de investigación*



## **6.1.- Conclusiones principales**

La sociedad industrial se enfrenta a las problemáticas de disponer de recursos naturales y energéticos finitos que dan muestras incipientes de agotamiento, además del propio impacto ambiental asociado a las actividades productivas, especialmente grave en aspectos tales como el cambio climático. Por ello, es necesario cambiar el patrón de crecimiento basado en la hipótesis de abundancia, avanzando hacia una economía circular donde se busca maximizar la utilidad de cualquier elemento. Ello supone una oportunidad de mejora competitiva para las empresas, a la vez que responde a la demanda social de respeto al medio ambiente, vía un desarrollo sostenible en su sentido más integral: económico, funcional, medioambiental y social.

La industria de la construcción tiene un enorme impacto a nivel económico que se refleja también a nivel ambiental, tanto por la explotación de las materias primas que requiere, como por las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por su actividad. A la vez, otras industrias, como la siderúrgica, son generadoras de grandes cantidades de subproductos, tales como las escorias de acería provenientes de hornos de arco eléctrico. La industria del acero en la CAPV supone el 1% de la generación mundial de dichos residuos o, visto de otro modo, de 270 kg por persona/año en su entorno geográfico (reducida extensión y orografía compleja). Haciendo virtud de la necesidad, no solo es de enorme interés incorporar estos subproductos como materiales para la industria constructora, sino que los estudios ya realizados sobre el tema, muestran la viabilidad de que las escorias de acería dejen de ser residuos y subproductos para pasar a constituirse en materias primas nobles de alto valor añadido en mezclas de hormigón (por ejemplo en hormigones autocompactantes).

Por otro lado, la creciente sensibilidad social hacia el problema del ruido hace que las normativas al respecto avancen en exigencias afectando, por supuesto, a las prestaciones de aislamientos demandadas a las edificaciones. El aislamiento acústico de un material es ya, por lo tanto, un parámetro de importancia crucial en el mercado de los productos de construcción. Dicho aislamiento puede estimarse teóricamente pero no de forma sencilla ni exacta. Igualmente, los laboratorios de medida de transmisión acústica son instalaciones complejas y que presentan, además, desventajas que dificultan y encarecen las pruebas experimentales, orientadas al desarrollo de materiales. Otras alternativas, como la realización de ensayos a escala, no han sido hasta la fecha desarrolladas en todo su potencial, por razones relativas a la complejidad que implican unas cámaras acústicas, así como por la dificultad para lograr resultados comparables a los obtenidos en un laboratorio de escalado real.

Sin embargo, la presente Tesis Doctoral demuestra que, con unas cámaras de transmisión sonora a escala 1:6,3, es posible la obtención de resultados válidos tanto cuantitativa como cualitativamente. La escala de 1:6,3, obtenida como cociente entre bandas centrales de 1/3 de octava normalizados, requiere de unas muestras de tamaño manejable y fabricación sencilla, lo que permite la utilización de equipos de medida estándar en acústica en edificación y, en definitiva, simplifica totalmente el escalado de los resultados obtenidos, que se hace de forma directa.

La falta de difusividad a frecuencias bajas, producto de las dimensiones a escala de las cámaras, se solventa mediante el enfoque mixto propuesto. Enfoque que combina la estimación teórica por ley de masas en bajas frecuencias, con la medida empírica en las frecuencias medias y altas.

Los valores absolutos medidos son comparables a los obtenidos en laboratorios reales de referencia. El valor exacto que se obtiene, como en cualquier laboratorio, es dependiente de las condiciones de contorno de la muestra, lo cual es un inconveniente inherente a la propia norma de medida. En cualquiera de los casos, los aislamientos medidos son valores totalmente comparables entre sí, lo cual hace de las cámaras a escala un método perfecto para confrontar diferentes variantes durante el desarrollo de nuevos materiales.

La metodología experimental aquí desarrollada ha sido aplicada al estudio de las prestaciones acústicas de los hormigones con subproductos de acería, siendo el primer trabajo en esta línea realizado a nivel global. Como conclusión principal, puede afirmarse que, contradiciendo lo esperado, los hormigones con escorias tienen aislamiento acústico inferior al que sería esperable dada su mayor densidad. La incorporación de serrín, buscando mejores prestaciones térmicas, se traduce también en un aislamiento acústico algo peor que el hormigón de referencia, aunque en este caso el uso de cemento tipo II también podría haber tenido su influencia.

No obstante, dicho lo cual, ello no significa que los aislamientos de los hormigones con subproductos industriales sean bajos, de modo que sus posibilidades reales de uso, tanto en separaciones verticales (muros), como horizontales (losas), o en otras aplicaciones donde el aislamiento acústico sea un parámetro relevante, es perfectamente viable.

Por último, se ha realizado un primer trabajo de sustitución parcial del mineral de yeso por escorias siderúrgicas provenientes de horno eléctrico de arco *EAFS*, limitado en

cuanto a las dosificaciones estudiadas, que se considera muy positivo en el campo de la acústica. Los aislamientos a ruido aéreo obtenidos se han mostrado significativamente superiores a los del material natural sin adiciones. Cuestión positiva esta que, en definitiva, abre un campo de investigación nuevo con prometedoras posibilidades en productos tales como cerramientos ligeros de entramado autoportante o revestimientos de altas prestaciones acústicas para paredes de fábrica.

## ***6.2.- Futuras líneas de investigación***

En lo referente a los ensayos a escala, y aunque la presente Tesis Doctoral deja sentadas las bases que muestran la viabilidad de la escala 1:6,3 para medidas de aislamiento acústico en el desarrollo de materiales, existen aún aspectos por investigar para la mejora de la metodología propuesta. Por ejemplo, un aumento en el volumen de las cámaras se piensa que corregiría los requisitos de tiempo de reverberación y aumentaría también la difusividad del campo acústico, reduciendo la incertidumbre de las medidas. Asimismo, el montaje de las muestras, tanto en lo referente a su control dimensional exacto, como a la influencia de las condiciones de contorno, se ha mostrado como un factor de enorme importancia en el resultado de aislamiento obtenido. Es, por lo tanto, necesario continuar trabajando en este campo, al objeto de mejorar la precisión de las medidas realizadas, así como su comparación frente a valores en laboratorios de escala 1:1.

Del mismo modo, sería interesante desarrollar investigaciones orientadas a la aplicación de las cámaras a escala en la medida del aislamiento de elementos como aireadores, rejillas, cajas de persiana u otros productos que se sabe debilitan notablemente el aislamiento acústico de las fachadas. Igualmente, el desarrollo de ensayos para elementos huecos y sistemas constructivos más complejos es otra vía nueva de investigación, al objeto de profundizar en el uso de ensayos a escala.

La constatación de la influencia significativa que ha tenido la presencia de una fractura (pese a estar sellada) en una de las placas sobre su aislamiento, abre una nueva línea de investigación en el ámbito de la rehabilitación acústica. Cuestión ésta debida a que se trata de una situación que, eventualmente, podría reproducirse en un edificio real al fisurarse tabiques o medianeras.

Los conocimientos actuales sobre el fenómeno físico de la transmisión acústica fluido-sólido-fluido, apuntan al menor amortiguamiento del material como la causa principal de que, los hormigones que incorporan escoria negra, como sustitutivo de la natural, tengan un aislamiento por debajo del esperado dada su mayor densidad. La comprobación experimental de este hecho, así como la comprensión profunda de los mecanismos reológicos que lo provocan, permitirán en el futuro el diseño de mezclas con prestaciones aún superiores a las ya obtenidas en la presente Tesis Doctoral. Dicho conocimiento será extensible también a hormigones con otros subproductos industriales o, incluso, a otros materiales de base (matrices varias).

En cuanto a los yesos, se ha abierto una nueva vía de investigación en la cual es fundamental ahondar, abarcando aspectos tan amplios como las propiedades mecánicas en fresco o fraguado, los problemas estéticos o de otra índole achacables a la presencia de óxidos o, ya centrados en el fenómeno acústico, la mejora efectiva en el aislamiento para el caso de enlucidos (en fresco o como trasdosado directo) sobre fábricas de ladrillo.



# Capítulo **7**

## ***Bibliografía***





[Amaral da Lima, L. 1999]. "Hormigones con escorias de horno eléctrico de arco como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

[Ameri, 2013] M. Ameri, S. Hesami, H. Goli. Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building Materials* 49 (2013) 611–617.

[Anefa, 2016] <http://www.aridos.org/estadisticas/>

[Arribas I, Santamaría A, Ruiz E, Ortega-López V, Manso JM.2015] Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Constr Build Mater* 2015;90:68-79.

[Bharath V, Rao P, 2015]. Study on the fibre reinforced concrete using steel slag as the coarse aggregate replacement. *Int. J. Technol. Res. Eng.*, 2(7): 1322-26.

[BlueCons, 2015]. Maximización del valor sostenible de materiales y productos de la edificación, incorporando subproductos de la fabricación del acero. MINECO-BIA2014-55576-C2-2-R. UPV/EHU, UBU y ERAIKER.

[Bolton J.S, Yoo T, Olivieri O, 2007] A four microphone procedure for measuring the normal incidence transmission loss and other acoustical properties of a sample in a standing wave tube. *B&K Technical Review*. 2007.

[Braungart M, McDonough W.,2005]. *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. ISBN 84-481-4295-0, Ed. McGraw-Hill.

[Cops A and M. Minten, 1984] Comparative study between the sound intensity method and the conventional two-room method to calculate the sound transmission loss of wall constructions, *Noise Con. Eng. J.* 22(3) 1984 104-111.

[Cortés, A; Esteban, A.2004] "Application of the European standard EN12354 to the Spanish hollow constructions". 18th International Congress on Acoustics ICA 2004

[Craik, 1996 R.J.M], "Sound Transmission Through Buildings Using Statistical Energy Analysis", Gower.

[Craik, R. J. M. 1992] The influence of the laboratory on measurements of wall performance, *Appl. Acoust.* 35 1992 25-46.

[Cremer L, 1942]. Theorie der schalldämmung wände bei schrägem einfall, *Akust. Z.*(7):81-104.

[Cremer, L. Heckl, M. And Ungar,EE ,1973] *Structure-borne sound*, 1973, Springer-Verlag.

[Cremer, L., Heckl, M.]: *Structure Borne Sound*, 2nd edition, Berlin, Springer Verlag, 1988.

[Cuadrado et al, 2015] Cuadrado J, Zubizarreta M, Rojí E, García H, Larrauri M (2015). Sustainability-Related Decision Making in Industrial Buildings: an AHP Analysis. *Hindawi Publishing Corporation. Mathematical Problems in Engineering*, ID157129:1-13.

[Del Val, Alfonso 2011] «El problema de los residuos en la sociedad del bienestar», Boletín CF+S, 50, pp. 29-38. Recurso electrónico en línea: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n50/aaval.html> [Consulta: 05 de noviembre de 2017]

[Esteban 2005] Modelo de predicción de transmisión de ruido en edificios UNE-EN12354: Precisión, limitaciones e investigaciones en el ámbito de las viviendas en España. (Jornadas Investigación IeTCC 2005)

[Esteban A, G. Castelruiz, A. Cortés e I. Álvarez.] Tópicos de la acústica a prueba y otras curiosidades sobre el comportamiento acústico de materiales en laboratorio. Congreso tecniacustica 1999.

[Esteban, A; Cortés, A; Arribillaga, O. 2004]. "In situ loss factor in Spanish hollow constructions: improving EN12354's accuracy". The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Internoise 2004. Praga, 2004.

[Esteban, Alberto; Santiago, Elena; Ribas, Ana); Muzio, Giovanni] Nuevas soluciones cerámicas de altas prestaciones acústicas. Congreso tecniacustica 2005

[European Commission, 2013]. Action Plan for a competitive and sustainable steel industry in Europe. Strasbourg.

[European Commission, 2013]. Action Plan for a competitive and sustainable steel industry in Europe. Strasbourg.

[Fausti P, R. Pompoli, R Smith, 1999] An intercomparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of lightweight plasterboard walls, J. Build. Acoust. 6(2) 1999 pp. 127-140.

[Frías M, Rodríguez O, Vigil De La Villa R, García R, Martínez-Ramírez S, Fernández-Carrasco LJ, Vegas I , 2016]. The Influence of Activated Coal Mining Wastes on the Mineralogy of Blended Cement Pastes. Journal of the American Ceramic Society 99(1):300-307.

[García D, Vegas I, Cacho I, 2014]. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete. Construction and Building Materials 64:293-300.

[García-Cuadrado, 2017] J. García-Cuadrado, A. Rodríguez, I.I. Cuesta, V. Calderón, S. Gutiérrez-González (2017). Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags. Construction and Building Materials, 138:204-213.

[Geiseler. J 1996] Use of steelworks slag in Europe. Waste Management 16 (1996) 59– 63.

[Gerretsen E; T. Nightingale, 1999]. "Prediction models in Building Acoustics", introduction to the special session at forum Acusticum 1999 in Berlin

[Guraya, T.; Goikoetxea, P.; Esteban, A.; Fernández Alcalá, P.; Neira, S. ; Luengo, I. ] Nuevas metodologías para el desarrollo de materiales acústicos basados en el reciclado de neumáticos

fuera de uso. 34º Congreso Nacional de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica y EAA Symposium Bilbao, 2003. Plan Nacional de I+D: Proyecto: "Influencia De La Estructura En Las Características Acústicas De Materiales De Caucho Reciclado De Neumáticos Fuera De Uso Para Futuras Aplicaciones Industriales". Proyecto TRAVACAMA, MAT2001-3896-C03. MiCyT, 2002-2004.

[Guy R.W, A. De Mey and P. Sauer, 1985] The effect of some physical parameters upon the laboratory measurements of sound transmission loss, Appl. Acoust. 18 1985 81-98.

[Guy R.W. and P. Sauer, 1984] The influence of sills and reveals on sound transmission loss, Appl. Acoust. 17 1984 453-476.

[Heckl, M., Rathe, E. J.]: Relationship between the transmission loss and the impact noise insulation of floor structures. JASA 1963, 35: 1825-1830.

[Heckl, Manfred; Müller, Helmut A 1994].: Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Berlin, Heidelberg, New York., 1994.

[Herrero T, I.J. Vegas, A. Santamaría, J.T. San-José, M. Skaf, 2016]. Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. Construction and Building Materials, 123:404–413.

[Herrero T, Vegas J, Santamaría A, San-José JT, Skaf M, 2016]. Effect of high-alumina LFS as cement substitution in masonry mortars. Constr. & Build. Mat., 123:404-13.

[Herrero, 2016] T. Herrero, I.J. Vegas, A. Santamaria, J.T. San-Jose, M. Skaf. Effect of high alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. Construction and Building Materials 123 (2016) 404–413.

[Hirsch, 2005] PEAKING OF WORLD OIL PRODUCTION: IMPACTS, MITIGATION, & RISK MANAGEMENT Robert L. Hirsch, SAIC, Project Leader Roger Bezdek, MISI Robert Wendling, MISI February 2005

[Hongisto V, 2000] Airborne sound insulation of wall structures - measurement and prediction. Phd Thesis. methodsHelsinki University of Technology. Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing

[Hopkins 2007] Sound Insulation. Elsevier / Butterworth-Heinemann,

[Hubbert, M. King 1956] «Nuclear Energy and the Fossil Fuels 'Drilling and Production Practice»(PDF). API. pp. 22-27

[IEC 60942:2003] Electroacústica. Calibradores acústicos

[IEC 61672-1:2013] Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones.

[ISO 14040, 2006] Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve

[ISO 14044, 2006]): Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, International Organisation for Standardisation (ISO), Geneva

[Kangas, 2004] Kangas, P. (2004) “Ecological Engineering. Principles and practice”. College Park (USA): University of Maryland

[Kihlman T and A. C. Nilsson, 1972] The effects of some laboratory designs and mounting conditions on reduction index measurements, J. Sound Vib. 24(3) 1972 349-364.

[Kling, C 2008] Investigations into damping in building acoustics by use of downscaled models. PhD Thesis. Aachener Beitr age zur Technischen Akustik.

[Költzsch, Peter: 1995] Die Verwendung der Helmholtz-Zahl als Kriterium in der Akustik und Strömungsakustik. Institut für Technische Akustik, ET-ITA-01-1995, 1995.

[Koros P.J..2003]. Dusts, scale, slags, sludges... Not wastes, but sources of profits. Metallurgical and Materials Transactions B 34 (2003) 769–779.

[Kruppa and Olesen, 1988] Intercomparison of laboratory sound insulation measurements in window panes, Report EUR 11576 EN, The Commission of the European Communities, BCR Information, Applied Metrology, 1988.

[Ljunggren,1991] S. Airborne sound insulation of thick walls, JASA 1991, vol. 89, num. 5.  
[London 1950]. Transmission of reverberant sound through double walls. J. Acoust. Soc. Am, 22:270–279.

[Lord Rayleigh] London Math. Soc. Proc., 4, 1873

[Losañez, M 2006]. Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil. Tesis Doctoral defendida en la UPV/EHU.

[Lyon, Richard H.; DeJong, Richard G., 1995] Theory and application of statistical energy analysis. Butterworth-Heinemann Boston. Second Edition, 1995.

[Maderuelo, R] Investigaciones sobre la aplicabilidad en edificación de materiales acústicos procedentes de la valorización de residuos. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura.

[Madrid M, Orbe A, Rojí E, Cuadrado J, 2017]. The effects of by-products incorporated in low-strength concrete for concrete masonry units. Construction and Building Materials 153:117-128.

[Maghool F, Arulrajah A, et al, 2017]. Laboratory evaluation of ladle furnace slag in unbound pavement-base/subbase applications. J. Mater. Civ. Eng., 29(2).

[Malhotra, V.M., Metha, P.K., 2002] “Role of fly ash in sustainable development”. High-performance, high volume fly-ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice and case histories. ISBN:0-9731507-0-X, pp. 1-11

[Manso J.M., Polanco J.A., Losañez M., González J.J., 2006] “Durability of concrete made with EAF slag as aggregate”. *Cement and Concrete Composites*, Volume 28(6), pp. 528-534

[Manso J.M., V. Ortega-Lopez, J.A. Polanco, J. Setien.2013] The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Construction and Building Materials* 40 (2013) 126– 134.

[Manso, 2004] Manso JM, Gonzalez JJ, Polanco JA. Electric arc furnace slag in concrete. *J Mater Civ Eng* 2004;16:639-45.

[Maslehuddin, M; Sharif, A.M.; Shameem, M.; Ibrahim, M.; Barry, M.S. 2003] “Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes”. *Construction and Building Materials*, 17, pp. 105-112

[Meadows, Donella H 1972] *Los Límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad*, Fondo de Cultura Económica. 1972. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, William W. Behrens III. ISBN 0-87663-165-0

[Meehl et al, 2005] Meehl, Gerald A.; Washington, Warren M.; Collins, William D.; Arblaster, Julie M.; Hu, Aixue; Buja, Lawrence E.; Strand, Warren G.; Teng, Haiyan (18 de marzo de 2005). «How Much More Global Warming and Sea Level Rise» (PDF). *Science*(en inglés) 307 (5716): 1769-1772. Bibcode:2005Sci...307.1769M. PMID 15774757. doi:10.1126/science.1106663.

[Meehl, Gerald A, 2007] Meehl, G. A., et al.. «Ch 10: Global Climate Projections». Sec 10.3.3.2 Changes in Snow Cover and Frozen Ground (en inglés)., en IPCC AR4 WG1, 2007, pp. 770, 772. Sec 10.5.4.6 Synthesis of Projected Global Temperature at Year 2100] (en inglés)., en IPCC AR4 WG1, 2007

[Meier and Schmitz, 1999] Application of total loss factor measurements for the determination of sound insulation, *J. Build. Acoust.* 6(2) 1999 71-84.

[Michelsen, N 1983] Effect of size on measurements of the sound reduction index of a window or a pane, *Appl. Acoust.* 16 1983 215-234.

[Motz H, J. Geiseler.2001] Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management* 21 (2001) 285–293.

[Mulholland K. A., Lyon R. H., 1973] Sound insulation at low frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.* 54(4) 1973 867-878.

[NASA, 2015]. «NASA, NOAA Find 2014 Warmest Year in Modern Record» (en inglés).

[Neves,A, J. Nascimento, I. Castro, P. Amado-Mendes, L Godinho, 2015].Comparison of strategies for the experimental analysis of airborne sound insulation of building elements. *Proceedings of Euronoise 2015*. Maastrich.

[Olesen y Pedersen, 1991] The development of guidelines for the choice of loudspeaker positions for building acoustic laboratory measurements, Report EUR 13380 EN, The Commission of the European Communities, BCR Information, Applied Metrology, 1991.

[Orbe , E. Rojí, J. Cuadrado, R. Losada] Estudio para la optimización de la composición de un HACFRA (hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero) estructural. Informes de la Construcción Vol. 67, 537, e061 enero-marzo 2015 ISSN-L: 0020-0883

[Orbe , R. Losada, E. Rojí, J. Cuadrado, A. Maturana] The prediction of bending strengths in SFRSCC using Computational Fluid Dynamics (CFD). Construction and Building Materials 66 (2014) 587–596

[Oreskes, Naomi 2004]. «Beyond the Ivory Tower: The Scientific Consensus on Climate Change». Science 306 (5702): 1686. PMID 15576594.

[Ortega-Fernandez, 2015] I. Ortega-Fernandez, J. Rodriguez-Aseguinolaza, A. Gil, A. Faik, B. D’Aguanno. New thermal energy storage materials from industrial wastes: Compatibility of steel slag with the most common heat transfer fluids 137 (2015).

[Ortega-Lopez V., J.M. Manso, I.I. Cuesta, J.J. Gonzalez 2014]. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soilstabilization applications. Construction and Building Materials 68 (2014) 455– 464.

[Oses et al, 2017] Oses U, Roji E, Gurrutxaga I, Larrauri M (2017). A multidisciplinary sustainability index to assess transport in urban areas: a case study of Donostia-San Sebastian, Spain. Journal of Environmental Planning and Management (JEPM), 60(11):1891–1922.

[Palacios JM, Arana JL, Larburu JI ,2002]. La Fabricación del Acero. UNESID.

[Papanikolaou and Trochides,1985] Design of a test facility for transmission loss measurement, Appl. Acoust. 18 1985 315-323.

[Pasetto, 2011] Pasetto M., Baldo N., Mix design and performance analysis of asphalt concrete with electric arc furnace slag, Construction and Building Materials, 25 (2011) 3458-68.

[Pellegrino, 2013] C. Pellegrino, P. Cavagnis, F. Faleschini, K. Brunelli. Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate. Cement and Concrete Composites 37 (2013) 232–240.

[Pellegrino, C. Gaddo, V., 2009] “Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate”. Cement Concrete Composites 31(9), pp. 663-671

[Reyes et al, 2014] Reyes JP, San-José JT, Cuadrado J, Sancibrian R (2014). Health & Safety criteria for determining the sustainable value of construction projects. Safety Science, 62:221–232.

[Rindel, J. H. 1994] Dispersion and absorption of structure-borne sound in acoustically thick plates, Appl. Acoust. 41 1994 97-111.

[Rodriguez, 2009] A. Rodriguez, J.M. Manso, A. Aragon, J.J. Gonzalez. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. Resources, Conservation and Recycling 53 (2009) 645–651.

[Rodríguez, 2013] A. Rodríguez , S. Gutiérrez-González , M. Horgnies, V. Calderón. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials and Design* 52 (2013) 987–994

[Rodríguez, Á., 2008] “Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción”. Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Civil.

[Sabine, Wallace Clement 1922] *Collected Papers on Acoustics* (New York: Dover Publications, 1964) [first published by Harvard University Press, 1922]

[San José et al , 2007] San-José, J.T, Losada, R., Cuadrado, J., Garrucho, I. (2007) “Approach to the quantification of the sustainable value in industrial buildings”. *Build Environ*; 42, pp. 3916–23

[San-José et al, 2007] San-José JT, Garrucho I, Losada R, Cuadrado J (2007). A proposal for environmental indicators towards industrial building sustainable assessment. *The International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 14(2):160-173.

[Santamaría A, 2017]. Development of cementitious matrix materials, with improved performance, incorporating by-products from the steelmaking industry. PhD Thesis.

[Santamaría A, Orbe A, Losañez MM, Skaf M, Ortega-Lopez V, González JJ, 2017]. Selfcompacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate. *Mater Des* 2017;115:179-93.

[Santamaría A, V. Ortega-López, M. Skaf, I. Marcos, J.T. San-José and J.J. González, 2017]. Performance of Hydraulic Mixes Manufactured with Electric Arc Furnace Slag Aggregates. *Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress (TMS 2017, 146th Annual Meeting and Exhibition) (ISI-JCR)*. San Diego (USA), 26Feb–2Mar.

[Santamaría et al, 2016].: Santamaria Leon, Amaia; Roji Chandro, Eduardo; Skaf, Marta; Marcos Rodriguez, Ignacio; Gonzalez Martinez, Javier Jesus. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars ISSN: 0950-0618. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS* Volumen: 106

[Santamaría et al, 2017], Santamaria Leon, Amaia; Orbe Mateo, Aimar; Losañez, Milagros; Skaf, Marta; Ortega López, Vanesa; Gonzalez Martinez, Javier Jesus Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate ISSN: 0261-3069. *MATERIALS & DESIGN* Volumen: 115 Número: Página inicial: 179 Página final: 193

[Santiago Monedero Elena, Ana Ribas Sangüesa, José Luís Valenciano Estévez, 2017] *Silensis-Cerapy*, paredes de ladrillo con revestimientos de placa de yeso y detalles BIM. Congreso *Tecniacustica 2017*

[Schmitz, Fisher. 2001] “How will heavy walls be measured in future in test facilities according to ISO 140”. *Proceedings of 17th ICA 2001*. Rome, 2001.

[Serjun, 2015] V.Z. Serjun, A. Mladenovic, B. Mirtic, A. Meden, J. Scancar, R. Milacic. Recycling of ladle slag in cement composites: Environmental impacts. *Waste Management* 43 (2015) 376–385.

[Sewell, E.C 1970] Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle, *J. Sound Vib.* 12(1) 1970 21-32.

[Sharp B.H, 1973], A study of techniques to increase the sound insulation of building elements, Wyle laboratories report WR73-5, El Segundo, California, USA, 1973. (Prepared for Department of Housing and Urban Development HUD, Contract H- 1095, Waashington, USA, 1973.)

[Shi, 2002] C. Shi. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 459–462.

[Skaf et al, 2017] Skaf M, Manso JM, Aragón Á, Fuente-Alonso JA, Ortega-López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour Conserv Recycl* 2017;120:176-85.

[Skaf, 2017]. M. Skaf, J.M. Manso, A. Aragón, J.A. Fuente-Alonso, V. Ortega-López (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 120:176-185.

[Smith R.S., R. Pompoli and P. Fausti, 1999] An investigation into the reproducibility values of the European inter-laboratory test for lightweight walls, *J. Build. Acoust.* 6 (3-4) 1999 187-210.

[TOUTONGE. José de Aviz 2006]. Projeto reconstrução de câmaras reverberantes em escala reduzida para o estudo das características de perda de transmissão de divisórias confeccionadas a partir de Materiais regionais. belém – Pará – Brasil. Setembro 2006 Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Mestrado em Engenharia Mecânica.

[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 del ruido aéreo entre recintos. Comité CTN 74 – ACÚSTICA.

[UNE-EN 197-1:2011]. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

[UNE-EN 61260-1:2014] Electroacústica. Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava. Parte 1: Especificaciones. (Ratificada por AENOR en agosto de 2014.)

[UNE-EN ISO 10140-4:2011] Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 4: Procedimientos y requisitos de medición. (ISO 10140-4:2010)

[UNE-EN ISO 12999-1:2014] Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios. Parte 1.- Aislamiento acústico.

[UNE-EN ISO 3382-2:2008] Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008)



[UNE-ISO/IEC GUIA 98-3:2012 IN] Incertidumbre de medida. Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM:1995).

[Unión de Empresas Siderúrgicas, 2016]. La industria siderúrgica española.

[USEPA, 2010] "Defining Life Cycle Assessment (LCA)." US Environmental Protection Agency. 17 October 2010. Web.

[Vázquez Ramonich,, E., Luxán, M.P., Barra, M., 1997] "Los materiales secundarios de la demolición de estructuras de hormigón". Ed. Cl. Ing. De C.C.P. Madrid, pp. 101-116

[Vegas I, Broos K, Nielsen P, Lambertz O, Lisbona A. 2015]. Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. Construction and Building Materials 75:121-128.

[Vegas, I.J, Ibañez, J.A., San José, J.T, Urzelai, A., 2008] "Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction". Waste Management. ISSN 0956-053X; 28/565–574 Elsevier SCI Ltd Estados Unidos

[Vegas, I.J., 2009] "Comportamiento físico-mecánico y durabilidad de mezclas basadas en cemento Pórtland y lodos del destintado del papel activados térmicamente". Tesis Doctoral, ETSI Bilbao (UPV-EHU)

[Warnock, C. C. 1922] Some effects of multiple sources in reverberation room tests, Proceedings of Internoise 82, San Francisco, USA, 17-19 May 1982, 833-836.

[Warnock, C. C. 1982] Influence of specimen frame on sound transmission loss measurement, Appl. Acoust. 15 1982 307-314.

EN 12354-1,2: Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms; Part 2: Impact sound insulation between rooms (2000).

NBE-CA88. Orden de 29 de septiembre de 1988 por la que se aclaran y corrigen diversos aspectos de los anexos a la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-82 sobre «Condiciones Acústicas en los Edificios».

ORDEN 3107 de 15 de junio de 2016, del Consejero de Empleo y Políticas Sociales, sobre Control Acústico de la Edificación. BOPV.

UNE-EN ISO 10140-2:2011 Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. (ISO 10140-2:2010)



---

UNE-EN ISO 10140-4:2011 Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 4: Procedimientos y requisitos de medición. (ISO 10140-4:2010)

UNE-EN ISO 10140-5:2011 Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5: Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo. (ISO 10140-5:2010)

UNE-EN ISO 12999-1:2014. Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios. Parte 1: Aislamiento acústico. Comité CTN 74 - Acústica en la Edificación.

UNE-EN ISO 140-14:2005/AC:2009. Medición del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción. Parte 14: Directrices para situaciones especiales in situ Comité CTN 74 - Acústica.

UNE-EN ISO 717-1:2013. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Comité CTN 74 - Acústica.