

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

## **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!*

## 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.

## 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.

## 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*

## **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.