

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DESARROLLO DE MATERIALES
ABSORBENTES ACÚSTICOS A PARTIR DE
ESCORIAS NEGRAS.

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA QUÍMICA

Autora:

Sandra María Tirado Torrado

Tutoras:

Mónica Rodríguez Galán

Celia García Arenas

30 de junio de 2015

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional y su constante cariño a lo largo de estos duros años. Vuestros consejos siempre me han guiado aunque en ocasiones pareciera no escucharlos.

A mis amigos y compañeros porque ya me avisaron que con el paso de los años sería lo mejor que me llevaría de la carrera. Gracias a vosotros se que se han hecho más llevaderas las largas épocas de exámenes. La facultad se convirtió en nuestra casa y vosotros en la familia.

A Raquel Zambrano Varela por su infinita paciencia, su capacidad de escuchar y su manera de allanarme el camino. Gracias por integrarme en tu familia.

A mis profesores y, sobretodo, a mis maravillosas y DOCTORAS tutoras por esbozarme el camino y saber transmitirme esa vocación por la ingeniería química. Gracias por todo lo que me habéis enseñado y por sacar tiempo de donde no teníais incluso para ejercer de RRHH.

A David Garduño Navarro por comprenderme y ayudarme, por tu cariño y apoyo diario. Me has enseñado a reirme de aquellos problemas que parecían gigantes y a divertirme entre tantas obligaciones. Gracias por hacerme diferentes y más felices estos últimos años de carrera.

Sandra María Tirado Torrado

Resumen

La acumulación de residuos procedentes de la actividad industrial se está convirtiendo en un grave problema tanto para el medio ambiente como para la salud pública. En este sentido, las normativas europeas y españolas vigentes referentes a la gestión de residuos están fomentando el reciclado de éstos. La gestión de estos residuos debe seguir el proceso marcado por la jerarquía de residuos, que promueve el reciclado de los mismos antes que su deposición en vertederos.

Por otro lado, la contaminación acústica está aumentando cada vez más como una de las mayores preocupaciones entre la población debido a los impactos negativos que ésta produce en la salud de las personas.

El principal objetivo de este proyecto fin de carrera es reciclar escorias de hornos de arco eléctrico como sustitución del árido grueso en la producción de un hormigón poroso con propiedades de absorción acústica. Para ello se ha analizado en profundidad el hormigón poroso fabricado desde los puntos de vista químicos, físicos, mecánicos, acústicos y de durabilidad y presentado soluciones constructivas de cara a la elaboración de barreras acústicas de carretera.

A la vista de los resultados obtenidos, las escorias negras de hornos siderúrgicos de arco eléctrico pueden ser potencialmente recicladas en dispositivos reductores de ruido de tráfico de carreteras, ya que los productos conformados con un 80 % de escorias presentan características similares a las de otros productos utilizados tradicionalmente en este tipo de aplicaciones.

Abstract

The waste accumulation from industrial activity is becoming a serious problem for both environment and public health. In this regard, the European and Spanish regulations regarding waste management are encouraging the recycling policies. The waste management must follow the process set by the waste hierarchy, which promotes the recycling of these before his deposition in landfills.

Furthermore, noise pollution is becoming increasingly a major concern among the population due to the negative impacts it produces on human health.

The main objective of this master's thesis is to recycle slag from electric arc furnaces as a replacement of coarse aggregate in the production of porous concrete with acoustic absorption properties. The porous concrete has been deeply analyzed from the point of view of chemical, physical, mechanical, acoustic and durability properties. Moreover, a constructive solution is presented facing the development of road noise barriers.

In view of the results obtained, the black slag from steel electric arc furnaces can be potentially recycled in reducing road traffic noise devices, since the products formed with 80 % of slags have similar characteristics to those other products traditionally used in these applications.

Índice general

1 ANTECEDENTES	11
1.1. Introducción	13
1.2. Escorias	14
1.3. Estado del arte	18
1.3.1. Reutilización de las escorias	18
1.3.2. Uso de escorias negras	21
1.3.3. Reutilización de residuos en materiales acústicos	22
2 INTRODUCCIÓN	25
2.1. Gestión de residuos sólidos	28
2.1.1. Definiciones	28
2.1.2. Jerarquía de los residuos	31
2.1.3. Producción de residuos y objetivos	34
2.2. Contaminación acústica	38
2.2.1. El ruido	38
2.2.1.1. Diferencia entre ruido y sonido	38
2.2.1.2. Conceptos fundamentales, definiciones, notaciones y unidades	39
2.2.2. Distribución espacial del ruido	44
2.2.2.1. Absorción acústica	46
2.2.2.2. Reflexión acústica	47
2.2.3. Contaminación atmosférica	47
2.2.3.1. Fuentes de contaminación acústica	48
2.2.3.2. Efectos sobre la salud	49
2.2.3.3. Índice de valoración de ruidos	52
2.2.3.4. Control de contaminación acústica	53
2.2.4. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras	54
2.2.4.1. Normativa	59
2.2.4.2. Propiedades de los materiales empleados tradicionalmente	64

3	OBJETIVOS Y ALCANCE	71
4	MATERIALES Y MÉTODOS	75
4.1.	Materiales	77
4.1.1.	Escorias	77
4.1.2.	Áridos	77
4.1.3.	Cemento	78
4.2.	Métodos de caracterización	80
4.2.1.	Caracterización física-química	80
4.2.1.1.	Composición química	80
4.2.1.2.	Densidad aparente	80
4.2.1.3.	Porosidad abierta	82
4.2.1.4.	Humedad	83
4.2.1.5.	Gravedad específica	83
4.2.1.6.	Distribución granulométrica	83
4.2.1.7.	Estabilidad volumétrica	84
4.2.2.	Propiedades mecánicas	84
4.2.2.1.	Resistencia a compresión	84
4.2.3.	Propiedades acústicas	86
4.2.3.1.	Coefficiente de absorción acústica	86
4.2.3.2.	Coefficiente de reducción de ruido (NRC)	90
4.2.4.	Ensayos de durabilidad	91
4.2.4.1.	Absorción de agua por inmersión total	91
4.2.4.2.	Ataque ácido	91
4.2.4.3.	Resistencia al agua de mar	91
4.2.4.4.	Ciclos de hielo/deshielo	92
4.2.4.5.	Resistencia a ciclos térmicos	92
4.3.	Fabricación de probetas	93
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
5.1.	Caracterización de los materiales de partida	97
5.2.	Estudio de un hormigón poroso estándar	101
5.2.1.	Estudio de la relación entre árido grueso y árido fino en hormi- gones estándar	101
5.2.1.1.	Densidad aparente	101
5.2.1.2.	Resistencia a compresión	102

5.2.2.	Estudio del ratio agua/cemento en hormigones porosos estándar	104
5.2.2.1.	Densidad aparente	104
5.2.2.2.	Resistencia a compresión	104
5.2.3.	Composición óptima	106
5.3.	Desarrollo de un material acústico absorbente a base de escorias negras y cemento	107
5.3.1.	Estudio de la relación agua/cemento del material a base de escorias	107
5.3.1.1.	Propiedades físicas	108
5.3.1.2.	Propiedades mecánicas	109
5.3.1.3.	Propiedades acústicas	111
5.3.1.4.	Material definitivo	114
5.3.2.	Caracterización del material óptimo	114
5.3.2.1.	Propiedades físicas	115
5.3.2.2.	Propiedades mecánicas	116
5.3.2.3.	Propiedades acústicas	116
5.3.2.4.	Ensayos de durabilidad	122

6 CONCLUSIONES **129**

Bibliografía **133**

Índice de figuras

1.2.1.	Escoria negra de acería de horno de arco eléctrico.	14
1.2.2.	Pantalla antirruído Pantabel.	16
2.1.1.	Árbol de decisión para la determinación de subproductos.	30
2.1.2.	Jerarquía de residuos.	31
2.1.3.	Generación de residuos en Europa en 2012.	35
2.1.4.	Generación de residuos por actividad económica en Europa en 2012.	35
2.1.5.	Generación de residuos por actividad económica en España en 2012.	36
2.1.6.	Tratamiento de residuos en los países europeos en 2013.	36
2.2.1.	Onda acústica.	40
2.2.2.	Curvas de ponderación.	44
2.2.3.	Distribución espacial del sonido.	45
2.2.4.	Barreras acústicas.	56

2.2.5.	Condiciones geométricas en la evaluación del apantallamiento. . .	56
2.2.6.	Atenuación sonora de pantallas.	57
2.2.7.	Espectro normalizado del ruido de tráfico.	58
2.2.8.	Bloques de hormigón Soundblox.	65
2.2.9.	Pantallas hormigón Climablok.	66
2.2.10.	Pantalla acústica hormigón Grupo Postigo.	67
2.2.11.	Pantalla acústica metálica Grupo Postigo.	68
2.2.12.	Pantalla antirruído Pantabel.	68
4.1.1.	Escoria negra de acería de horno de arco eléctrico.	77
4.1.2.	Árido fino empleado.	78
4.1.3.	Árido grueso empleado.	78
4.1.4.	Cemento tipo II.	79
4.2.1.	Diagrama esquemático del método de disgregación basado en la norma ASTM 3682-78.	81
4.2.2.	Equipo usado en la determinación de la resistencia a compresión.	85
4.2.3.	Esquema tubo Kundt.	86
4.2.4.	Posiciones de micrófonos y distancias en el tubo de impedancia.	87
4.2.5.	Tubo de impedancia acústica.	90
4.2.6.	Esquema ciclos térmicos.	92
5.1.1.	Distribución granulométrica de la grava y la escoria empleadas.	99
5.2.1.	Variación de la densidad aparente con la relación de áridos de hormigones estándar.	102
5.2.2.	Variación de la resistencia a compresión con la relación de áridos de hormigones estándar.	103
5.2.3.	Probeta H80 seleccionada.	103
5.2.4.	Variación de la densidad aparente con la relación de agua/cemento.	105
5.2.5.	Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/ cemento.	105
5.3.1.	Variación de la densidad aparente con la relación de agua/cemento.	108
5.3.2.	Porosidad abierta de los hormigones a base de escorias negras.	109
5.3.3.	Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/ cemento (Gruesos $d_p > 2,5$ mm).	110
5.3.4.	Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/ cemento (Finos $d_p < 2,5$ mm).	110
5.3.5.	Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/ cemento comparativa.	111

5.3.6. Variación de la absorción acústica con la relación de agua/cemento en la fracción gruesa ($dp > 2,5$ mm).	112
5.3.7. Variación de la absorción acústica con la relación de agua/cemento en la fracción fina ($dp < 2,5$ mm).	113
5.3.8. Probetas ensayadas. a)E80W50F b)E80W40G c)H80W45 d)A80W40.	115
5.3.9. Absorción acústica de la fracción gruesa ($dp > 2,5$ mm).	117
5.3.10. Absorción acústica de la fracción fina ($dp < 2,5$ mm).	117
5.3.11. Absorción acústica a diferentes longitudes (Gruesos $dp > 2,5$ mm).	118
5.3.12. Absorción acústica a diferentes longitudes (Finos $dp < 2,5$ mm).	119
5.3.13. Combinación de las probetas ensayadas acústicamente. A la izquierda la combinación BBA, a la derecha la combinación BAA.	121
5.3.14. Absorción acústica de probetas multicomposición.	122
5.3.15. Probetas tras 14 días de inmersión. A la derecha las probetas inmersas en agua; a la izquierda las probetas inmersas en ácido.	124
5.3.16. Pérdida de masa en ciclos de hielo/deshielo.	125
5.3.17. Pérdida de longitud en ciclos de hielo/deshielo.	126
5.3.18. Pérdida de resistencia mecánica en ciclos de hielo/deshielo.	126
5.3.19. Pérdida de resistencia mecánica en ciclos térmicos.	127
5.3.20. Pérdida de resistencia mecánica en probetas sumergidas en agua de mar.	128

Índice de tablas

1.2.1. Producción anual de escorias de acería.	17
2.2.1. Frecuencias preferentes.	40
2.2.2. Efectos del ruido.	52
2.2.3. Categoría de comportamiento de absorción.	60
2.2.4. Categorías de comportamiento de aislamiento.	61
2.2.5. Espectro normalizado de ruido de tráfico.	62
5.1.1. Composición química por elementos.	97
5.1.2. Composición química por compuestos.	97
5.1.3. Gravedad específica de los materiales.	98
5.2.1. Composición de las probetas de hormigón estándar.	101
5.2.2. Composición de hormigones porosos estándar.	104
5.2.3. Resumen de las propiedades de H80W45.	106

5.3.1. Composición de las probetas compuestas por la fracción gruesa (dp>2,5 mm) del material.	107
5.3.2. Composición de las probetas compuestas por la fracción fina (dp<2,5 mm) del material.	108
5.3.3. Variación del índice NCR con la relación de agua/cemento.	113
5.3.4. Resumen de las propiedades de los materiales definitivos a base de escoria.	114
5.3.5. Composición de las probetas definitivas de estudio.	114
5.3.6. Resumen de las propiedades físicas de los materiales definitivos (fracción dp>2,5 mm).	115
5.3.7. Resumen de las propiedades mecánicas de los materiales definitivos.	116
5.3.8. Nomenclatura utilizada para la descripción de la solución constructiva	121
5.3.9. Combinaciones estudiadas para la solución constructiva óptima	121
5.3.10. Absorción de agua por inmersión total.	123
5.3.11. Resistencia a ataque ácido.	123

Capítulo 1

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

La contribución a la protección del medio ambiente mediante la coordinación de la política de residuos con las políticas económica, industrial y territorial debe ser uno de los objetivos primordiales en el desarrollo de un país. Para ello, debe incentivarse la reducción en origen de los residuos, de forma que se pueda alcanzar el objetivo de desligar el crecimiento económico de la producción de residuos (6^o Programa de acción comunitaria sobre el medio ambiente) y dar prioridad a la reutilización, reciclado y valorización, por encima de otras técnicas de gestión.

Los pilares básicos de la estrategia de gestión de residuos deben de ser la prevención y la reducción de los mismos. La prevención o reducción de residuos puede lograrse, entre otras, a través de las siguientes estrategias: desarrollando tecnologías más limpias, mejorando el diseño de los productos, sustituyendo ciertos materiales y modificando algunos hábitos de consumo.

La recuperación, ya sea reutilización o reciclado, se convierte en una opción atractiva económicamente cuando se generan grandes cantidades de residuos viables. De esta forma, el reciclaje puede alcanzar tasas óptimas, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico, siendo parte de una política integrada de gestión de residuos.

Por lo general, los materiales reciclados tienen que competir con productos de bajo coste. No obstante, cuando las propiedades de los residuos permiten su uso en procesos de elaboración de materiales para aplicaciones específicas, estos pueden resultar claramente competitivos, al no tener que contemplar los costes medioambientales que la gestión de su vertido conlleva.

Las escorias procedentes de la valorización energética (combustión, gasificación o incineración) de carbón y/o biomasa, residuos sólidos urbanos e, incluso, las procedentes de procesos siderúrgicos, entre otras, son residuos que presentan unas propiedades físico-químicas que los hacen, en principio, atractivos para su utilización como constituyente básico de materiales reciclados con propiedades de absorción acústica.

1.2 Escorias



Figura 1.2.1: Escoria negra de acería de horno de arco eléctrico.

El proceso de fabricación del acero, tanto común como especial, en las acerías de horno de arco eléctrico se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o fusión, donde se produce la fusión de las materias primas que se realiza en hornos de arco eléctrico, y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del baño fundido, que se inicia en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara.

La principal materia prima empleada para la fabricación de acero en horno de arco eléctrico es la chatarra de hierro dulce o acero. Como elementos auxiliares se pueden cargar también pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro y de ferroaleaciones.

La etapa de fusión incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso y silicio, la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las escorias negras (Figura 1.2.1).

Tras la extracción de la escoria del horno, su enfriamiento puede hacerse de diferentes formas:

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. La escoria presentada un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.

- Se puede verter en un cono de fundición que se coloca debajo de la piquera del horno eléctrico. La escoria comienza a enfriarse en el cono y se vierte en una fosa donde se enfría. La escoria obtenida presenta un aspecto menos poroso que la anterior y es más cristalina.

- Se vierte en un cono de fundición que se deja enfriar. En este caso el enfriamiento es el más lento, y una vez fría se saca del cono. La escoria obtenida es muy compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.

La etapa de afino incluye la desoxidación, que permite eliminar los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descarburación del acero. El líquido fundido procedente del horno eléctrico se alimenta al horno-cuchara, se cubre con una escoria que se denomina escoria blanca y se agita continuamente con el soplado de gas inerte, normalmente argón. La escoria blanca permite la reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño, durante la denominada fase de desoxidación. Paralelamente se realiza la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca.

En España funcionan actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco (14 de ellas en el País Vasco), que produjeron en el año 2007 un total de 14,8 Mt de acero de las cuales:

- Acero común o especial 13.704.300 t
- Acero inoxidable 1.104.657 t

1. Antecedentes

con el siguiente reparto por comunidades (en el 2007) (Figura 1.2.2):

País Vasco	48,0 %
Cataluña	15,4 %
Andalucía.....	11,3 %
Cantabria.....	7,6 %
Madrid	6,7 %
Galicia	5,0 %
Extremadura	4,0 %
Aragón	1,5 %



Figura 1.2.2: Pantalla antirruído Pantabel.

Considerando la generación de escorias que se producen por tonelada de acero se obtienen las siguientes cantidades anuales de escorias de acerías de acero común o especial (Tabla 1.2.1):

Producción de acero (10^3 t)	Generación de escoria (kg/t de acero)	Producción de escorias (t)
13.704	Escoria negra	110-150
	Escoria blanca	20-30
		1.781.560
		342.608

Tabla 1.2.1: Producción anual de escorias de acería.

Debido a que tanto sus propiedades como sus posibilidades de valorización son claramente diferentes, es fundamental la separación entre escorias negras y blancas. Hasta la fecha se han encontrado cuatro alternativas de valorización de las escorias negras que han sido sancionadas por la experiencia:

- Introducción en cementera como aporte de hierro en el proceso de fabricación del clinker.
- Utilización en la capa de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa.
- Como material para explanadas, subbases y bases de carreteras.
- Como árido para hormigón.

Será en esta última aplicación en la que se centre este proyecto. [1]

1.3 Estado del arte

A continuación se presenta una breve búsqueda bibliográfica de distintos reciclados de escorias en algunas aplicaciones en construcción.

1.3.1 Reutilización de las escorias

- **Propiedades de resistencia del hormigón incorporando cenizas de fondo del carbón y arena siderúrgica. [2]**

Las cenizas volantes del carbón y las de fondo son subproductos de las centrales térmicas. La arena siderúrgica se desarrolla durante la producción de hierro en las plantas de hierro y acero. Esta investigación se llevó a cabo para evaluar la propiedad y resistencia a compresión y algunas características de durabilidad del hormigón incorporando estas escorias. Las cenizas volantes se utiliza como aglomerante en sustitución parcial del cemento; las cenizas de fondo y la arena siderúrgica se utilizan como reemplazo parcial del árido fino sin moler. La capacidad de absorción de agua, el peso y la fuerza de compresión a 7, 28 y 90 días se evaluaron experimentalmente. Para estos experimentos, las muestras de hormigón se producen en el laboratorio en formas apropiadas. Las muestras se dividen en dos categorías principales: M1, que incorporaban cenizas de fondo y arenas siderúrgicas; y M2, que incorporan cenizas volantes, cenizas de fondo, y arenas siderúrgicas. Se observan disminuciones notables en la fuerza de compresión y la capacidad de absorción de agua del hormigón. La densidad aparente del hormigón también se reduce. Se puede concluir que si el contenido de cenizas de fondo y arenas siderúrgicas se limita a una cantidad razonable, las pequeñas disminuciones en la fuerza puede ser aceptada para obras de hormigón de baja resistencia.

- **Avances en las propiedades químicas y físicas de escorias de horno de arco eléctrico de acero al carbono en procesos de superficie caliente y mezcla mineral. [3]**

Las escorias son reconocidas como un instrumento sumamente eficiente y rentable en la industria procesadora de metal, reduciendo al mínimo pérdidas de calor, la oxidación metálica por contacto con aire, quitando impurezas metálicas y protegiendo superficies refractarias y electrodos de grafito. Cuando las comparamos con áridos naturales en su empleo en la industria de construcción, las escorias

tienen un mayor peso específico que actúa como una fuerza disuasoria económica. En este artículo se presenta un método de cambiar el peso específico de escoria, mediante el tratamiento de etapa caliente y la mezcla de mineral, durante la producción de acero. El método tiene una mínima interferencia con el proceso de producción de acero, incluso si limitamos las adiciones de los minerales necesarios a altas temperaturas. Se examinan cinco minerales: la perlita, la escoria de horno de cucharón, la bauxita, la diatomita y olivina. Las medidas del peso específico son acompañadas por la difracción de rayos X y análisis de fluorescencia y exploración de imágenes espectrales de microscopía de electrones. También se muestra como se espera que el cambio en la composición química afecte al forro refractario del horno. Además, el proceso ha sido repetido para la mezcla óptima en un horno de gas y se ha examinado las propiedades físicas. La alteración del peso específico puede lograr propiedades satisfactorias en la escoria para específicos usos en el sector de construcción.

- **Propiedades ingenieriles del hormigón sin cemento producido de GGBFS y escorias recicladas de desulfurization. [4]**

En este estudio se usaron subproductos de fabricación de acero, escorias de alto horno granulada (GGBFS) y escorias de procesos de desulfuración (DS), para producir el hormigón de sin cemento. Los superplastificantes (SP) se añadieron para mejorar la absorción de agua de DS y realzar (mejorar) la fuerza de compresión del hormigón. La viabilidad de la fabricación fue evaluada por las propiedades de la ingenieriles de flexión, tiempo de fraguado, fuerza compresiva, cambio de longitud, resistencia de ataque de sulfato y análisis de microscopía de electrones (SEM). Los resultados mostraron que 14 MPA podrían ser obtenidos con la adición de 550 kilogramos/m³ de GGBFS. La fuerza compresiva y la resistencia de ataque de sulfato del hormigón se mejoraron aumentando la cantidad de SP añadido, y el cambio de longitud no excedió el 0,05 % en los siguientes 90 días, indicación una buena estabilidad de volumen. El SEM mostró que los productos de hidratación principales eran el hidróxido de calcio y el gel tobermorite durante la etapa temprana de hidratación, que da al hormigón sin cemento su temprana fuerza.

- **Caracterización de la fatiga de mezclas de asfalto que contienen escorias de acero de horno de arco eléctrico (EAF) sujetas a un largo plazo de envejecimiento. [5]**

En este artículo se evalúa el comportamiento de fatiga de mezclas de asfalto que contienen escorias de acero de horno de arco eléctrico (EAF) tanto en condicio-

nes envejecidas como en no envejecidas. Se prepararon seis juegos de mezclas de laboratorio. En cada juego se han sustituido distintas cantidades de árido por escoria EAF de acero. Se realizó un test de fatiga de cuatro puntos en modo de tensión controlado a varios niveles de tensión para caracterizar el comportamiento de fatiga de las mezclas de asfalto. Se usaron varias aproximaciones, basados en la rigidez y la disociación la energía, para analizar los datos de los modelos de fatiga. Además, para evaluar el funcionamiento a largo plazo de mezclas que contienen escoria EAF, los especímenes fueron sometidos a envejecido según el método AASHTO PP2 estándar. Los resultados mostraron que la inclusión de EAF en mezclas mejoraban bastante la vida de las muestras sometidas a fatiga. Para especímenes envejecidos, la vida de fatiga no cambió considerablemente. Esto es consecuencia de la mayor rigidez de las mezclas que contienen porcentajes bajos escoria EAF. Este descubrimiento aprobó la hipótesis de que cuanto mayor es la adherencia, mayor es la mitigación de envejecido en mezclas de asfalto.

- **El hormigón fabricado a partir de residuos de la industria cerámica: propiedades de durabilidad. [6]**

El hormigón que contiene productos de desecho como áridos se le conoce como hormigón "verde". El uso de residuos en el hormigón conducirá a un entorno verde y una tecnología del hormigón sostenible por lo que este tipo de hormigones son conocidos como "verdes". Los hormigones hechos con residuos de cerámica sustituyendo al árido grueso presentan buenas características de manejabilidad, tracción, compresión y fortalezas a la flexión y módulo de elasticidad. Además, el estudio de su durabilidad garantizará una mayor fiabilidad en su uso. Las características de permeabilidad se utilizan ampliamente para cuantificar las propiedades de durabilidad del hormigón. Este artículo presenta una investigación experimental sobre las características de permeabilidad [volumen de huecos y la absorción de agua (ASTM C642-06), penetración de cloruro (ASTM C1202-10) y absorción] del hormigón con residuos cerámicos de aislante eléctrico como árido grueso (en lo sucesivo se le llama hormigón árido reciclado) con seis relaciones agua-cemento diferentes en comparación con los de las correspondientes mezclas de hormigones convencionales. En los resultados se ha observado que no hay cambio significativo en la tendencia básica de las características de permeabilidad de este hormigón reciclado en comparación con el hormigón convencional. Este hormigón de árido reciclado posee valores característicos mayores de permeabilidad que los de hormigón convencional. Estos valores disminuyen con la disminución de la relación agua-cemento, tanto para el hormigón de árido reciclado y como el hormigón convencional.

1.3.2 Uso de escorias negras

- **Hormigones hechos de escorias de horno de arco eléctrico (EAF) y de escorias de procesos de descarbonatación oxigenadas con argón (AOD): Propiedades mecánicas y durabilidad. [7]**

El objetivo de este estudio es investigar la posibilidad de usar las escorias EAF y la AOD en sustitución de los áridos gruesos del hormigón. En primer lugar se determinan, las propiedades físico-químicas y mineralógicas de estos áridos de escoria de acero inoxidable. En segundo lugar, el árido silico-calcáreo de los hormigones de referencia se reemplazan por cada uno de estos áridos de escoria de acero en diferentes proporciones. Los resultados muestran una ligera mejora de las propiedades mecánicas de los hormigones fabricados con áridos de escoria de acero inoxidable. El uso de la EAF y AOD como áridos pueden disminuir ligeramente las propiedades relacionadas con la durabilidad de hormigón armado y aumentar la expansión lineal. Pero estas características encajan los estándares requeridos para el uso de la construcción.

- **Durabilidad de hormigones hechos de escorias de horno de arco eléctrico (EAF) como árido grueso. [8]**

La escoria de los hornos de arco eléctrico (EAF), subproducto de la fabricación del acero recuperado después del proceso oxidante, es útil cuando se emplea como árido en el hormigón hidráulico y mezclas bituminosas. El hormigón hecho con escoria EAF como árido muestra buenas propiedades físicas y mecánicas y estudio en profundidad de su durabilidad aportará una mayor fiabilidad en su uso. Este documento detalla un estudio sistemático de la conducta del hormigón a base de escoria en condiciones de prueba severas. Las pruebas fueron diseñadas para evaluar el coeficiente de dilatación interno de la escoria, su reactividad química con algunos componentes del cemento y su resistencia a los agentes ambientales, el hielo y la humedad. Los resultados indican que la durabilidad del hormigón a base de escoria es aceptable, aunque ligeramente inferior a la del hormigón convencional. Cuando las proporciones de la mezcla son adecuados, tanto la resistencia mecánica y la durabilidad de hormigón a base de escoria son satisfactorias, aunque en mezclas inferiores la durabilidad es probable que se deteriore.

Por último, se realizaron pruebas de lixiviación para determinar el impacto ambiental del hormigón, que, en comparación con los resultados obtenidos directamente de la escoria, confirmaron un efecto de enclaustramiento importante de la matriz cementosa en los elementos contaminantes.

- **Propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones que contienen escorias de EAF como árido. [9]**

El presente estudio tiene como objetivo investigar la oportunidad de sustituir gran parte de los áridos naturales del hormigón tradicional por escorias negras u oxidantes de Horno de Arco Eléctrico (EAF). Se investigaron experimentalmente la resistencia a la compresión y tracción, el módulo de elasticidad y las características de durabilidad (envejecimiento acelerado, congelación y descongelación, humectación y secado) del hormigón a base de escorias de EAF de acuerdo a la curva de calificaciones ideales de Fuller. Este estudio tiene como objetivo mejorar la escasa base de datos de pruebas mecánicas y de durabilidad de este tipo de hormigón y darle algunas ideas para mejorar las propiedades de durabilidad del hormigón hecho con escoria EAF, no sólo usando agentes modernos y aditivos, sino también trabajando con la clasificación actual de áridos, estrechamente conectados a la durabilidad general para cualquier tipo de hormigón. El hormigón fabricado con escoria de horno de arco eléctrico como árido mostró buenas características de resistencia, ya que, en condiciones ambientales normales, las propiedades de resistencia del hormigón que contiene escorias EAF son totalmente comparables (o incluso mejores) que las observadas para el hormigón tradicional. Por el contrario, las propiedades físicas y químicas típicas de la escoria de EAF, tales como el alto contenido en óxidos de calcio y magnesio inclinados a la hidratación, pueden suponer un límite para la durabilidad del hormigón resultante: por un lado, la durabilidad se puede mejorar fuertemente incluso en condiciones críticas de congelación/descongelación ambientales con una pequeña cantidad de agente incorporador de aire, por otro lado, este conglomerado sigue siendo bastante vulnerable a los ciclos repetidos de humedecimiento y secado.

1.3.3 Reutilización de residuos en materiales acústicos

- **Estudio de las características acústicas absorbentes de un hormigón poroso basado en el contenido de árido reciclado y una porosidad abierta definida. [10]**

En este estudio se ha llevado a cabo la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y las características de absorción acústica de un hormigón poroso. El diseño se basó en la porosidad abierta marcada como objetivo y el contenido de árido reciclado. Los objetivos son reducir el ruido generado en carreteras, vías férreas, áreas residenciales, así como el uso de árido reciclado. Los resultados de

los ensayos demuestran que la diferencia entre la porosidad abierta objetivo y la que se ha medido es menor al 1,7%. La resistencia a compresión disminuye considerablemente cuando la porosidad abierta objetivo y el contenido de árido reciclado superan el 25% y el 50% respectivamente. Las características absorbentes acústicas del hormigón poroso elaborado a partir de árido reciclado de demolición muestran que el coeficiente de reducción de ruido (NRC: Noise Reduction Coefficient) es el óptimo cuando la porosidad abierta se fina en un 25%. Sin embargo, el contenido de árido reciclado influye muy poco en el valor del NRC. De este modo la porosidad abierta objetivo va a ser de un 25% y el contenido de árido reciclado del 50%.

- **Barreras acústicas de hormigón con áridos reciclados para autopistas urbanas. [11]**

El aumento en la tasa de generación de residuos de construcción y demolición (C&D) en el área metropolitana de Melbourne está teniendo un doble impacto, es decir, una desaparición rápida del espacio disponible en los vertederos y un agotamiento de los recursos naturales. Como resultado, está apareciendo presión del gobierno y de la comunidad para reducir el volumen de residuos mediante el reciclaje de los residuos y la reutilización de sus productos. Este documento se centra en la mejora de los productos de desecho de hormigones para mejorar su uso en la fabricación de nuevos productos. Este enfoque ha dado como resultado la confirmación de que los áridos de hormigón reciclado (RCAG) puede ser una sustitución adecuada para la fracción de árido grueso en la producción de hormigón premezclado. La investigación actual se centra en comprensión de dos de las propiedades de RCAG y sus impactos en la fuerza, la durabilidad y el rendimiento acústico del nuevo hormigón. En primer lugar, se examinan la presencia de las impurezas químicas y su efecto sobre el desarrollo de la microestructura, y en segundo lugar, la porosidad de la pasta de cemento y áridos y su efecto sobre el rendimiento acústico del hormigón, hecho de RCAG. El objetivo de la investigación es desarrollar en buenas condiciones estructurales hormigón de áridos reciclados (RAC) con buenas características de absorción acústica, con el fin de utilizarlos en la fabricación de barreras acústicas para autopistas urbanas. Los resultados preliminares indican claramente que la porosidad de RCAG es más que la del hormigón normal y esto tiene un impacto ventajoso sobre el coeficiente de absorción acústica de RAC, y que la fuerza de tal hormigón es más que adecuada para la aplicación prevista.

- **Paneles de hormigón reforzado con vidrio que contienen neumáticos reciclados: Evaluación de las propiedades acústicas de por su uso como barreras de sonido. [12]**

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la inclusión de los neumáticos de desecho en los paneles de hormigón con fibra de vidrio reforzada como una manera de reducir la cantidad de arena, mientras que da un segundo uso a un material reciclado alcanzando así un doble beneficio ecológica. Al mismo tiempo, estos materiales se caracterizan desde el punto de vista acústico previendo su posible uso como una barrera contra la contaminación causada por el ruido. Se consideran la influencia en la inclusión de goma en el rendimiento mecánico, así como en la microestructura y la textura. Se ha probado la durabilidad de estos paneles, sometiéndolos a diferentes tratamientos de envejecimiento que incluyen el secado/ciclos de remojo y las variaciones de temperatura a la que el material se expone en una situación real.

- **Propiedades acústicas de paneles de hormigón con polvo de neumático como un reemplazo del agregado fino. [13]**

Este artículo presenta el comportamiento acústico de los paneles de hormigón con polvo de neumático (CRC) a pequeña escala en términos de la absorbanza acústica y el aislamiento a baja (63, 125, 250 y 500 Hz) y alta (1000, 2000, 4000 y 5000 Hz) frecuencias. Se llevaron a cabo pruebas acústicas con diferentes niveles de reemplazo de agregado fino con goma (7,5 % y 15 %) con cuatro grados diferentes de congelación y calentamiento. También se realizaron análisis de la trabajabilidad, fuerza y densidad de compresión.

Los resultados mostraron que el CRC tuvo un buen comportamiento con respecto a la absorción acústica, en particular con una proporción mayor (15 %) y grados de polvo de neumático. Como aislante, el CRC era comparable al hormigón simple, sólo observando diferencias marginales. Los efectos de la congelación y el calentamiento mostraron no tener ninguna influencia significativo sobre las propiedades de aislamiento. Se encontró que el rendimiento de aislamiento para todos los hormigones era mejorar a altas frecuencias.

Los resultados demuestran que el CRC tiene potencial como revestimiento exterior de edificios para absorber el sonido de alrededor de las estructuras urbanas de gran altura, pero requiere pruebas a gran escala. Este enfoque ofrece una solución respetuosa del medio ambiente para el problema actual de los neumáticos usados.

Capítulo 2
INTRODUCCIÓN

Actualmente no existen limitaciones técnicas insuperables para la capacidad constructiva o destructiva del hombre, capaz de llegar a zonas inaccesibles del mundo. Al mismo tiempo, las reservas naturales de las materias primas se están agotando. Su extracción es cada vez más cara, no sólo desde el punto de vista económico, sino operativo, lo que está causando un gran impacto ambiental y un enorme desequilibrio social. La necesidad de tomar conciencia de la extensa degradación ambiental, de la conservación y de la protección del medio ambiente, es un componente esencial para prevenir la degradación de éste y lograr un desarrollo sostenible.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) define la economía verde como aquella que se “traduce en un mejor bienestar humano y la equidad social, reduciendo significativamente los riesgos ambientales y las escaseces ecológicas”. En su expresión más simple, una economía verde puede ser considerada como aquella que es baja en carbono, eficiente en recursos y socialmente inclusiva. En una economía verde, el crecimiento de los ingresos y el empleo debe ser impulsada por las inversiones públicas y privadas reduciendo las emisiones de carbono y la contaminación, mejoran la eficiencia energética y de recursos, y evitando la pérdida de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Estas inversiones deben ser apoyadas por el gasto público objetivo, las reformas políticas y cambios de regulación. El camino hacia el desarrollo debe mantener, mejorar y, cuando sea necesario, reconstruir el capital natural como un activo económico fundamental y como una fuente de beneficios públicos, especialmente para las personas pobres cuyos medios de vida y de seguridad dependerá de la naturaleza.

El UNEP publicó en 2011 el informe “Hacia una Economía Verde. Caminos al desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza” [14], donde se abordan la gestión de residuos y la ecologización del sector de residuos. Además de la gestión de residuos, la contaminación acústica de los sistemas de transporte, como otra preocupación ambiental sobre el impacto en el bienestar de las actividades humanas, se aborda en este capítulo.

2.1 Gestión de residuos sólidos

Los residuos son un importante problema ambiental, social y económico. El incremento del consumo y el continuo desarrollo económico han provocado que las cantidades de residuos sean cada vez mayores, requiriendo un mayor esfuerzo para reducirlos y prevenirlos. En el pasado estos residuos eran considerados como un deshecho, hoy en día son más valorados como materias primas. Este hecho se refleja en la gestión residuos, cada vez más lejos de la recuperación y del reciclado.

El marco legal español de residuos es la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados [15], basada en la Directiva 2008/98/EC sobre residuos o en la Directiva del Marco de Residuos del Parlamento Europeo [16]. La presente Directiva establece los conceptos básicos y definiciones relacionados con la gestión de residuos. En ella se establecen algunos principios básicos de gestión de residuos: exige que los residuos se gestionarán sin poner en peligro la salud humana y dañar el medio ambiente, y en particular, sin crear riesgos para el agua, el aire, el suelo, las plantas o los animales, sin provocar incomodidades por el ruido o los olores, y sin atentar contra los paisajes y los lugares de especial interés.

Según la citada Directiva europea, los objetivos de la política europea de residuos son: disociar el crecimiento económico de los impactos ambientales, la prevención de residuos, moviéndose hacia una sociedad del reciclado, la promoción de la utilización de residuos para producir energía y la mejor aplicación de la legislación sobre residuos en los estados miembros.

2.1.1 Definiciones

La gestión de residuos es el conjunto de actividades relacionadas con la recogida, transporte, valorización y eliminación de residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones y el cuidado de los vertederos después de su cierre.

De acuerdo con el marco legal de residuos, un residuo es cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse.

La clasificación de los residuos se basa en la Lista Europea de Residuos [17] y en el anexo III de la Directiva 2008/98/EC [16]. En este sentido, se define residuos

peligrosos como aquellos residuos que presenta una o más de las características peligrosas enumeradas en el anexo III mencionado.

La Directiva Europea aclara que el hecho de una sustancia u objeto aparece en la lista de residuos, no significa que sea un residuo en todas las circunstancias. Sólo sería residuo cuando se cumple la definición «cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse». La definición de residuo hace referencia a «sustancia» u «objeto», términos de la legislación sobre residuos que deben ser leídos en términos generales. Cualquier sustancia u objeto puede ser residuo o no residuo. Por ello, la legislación ha reforzado el concepto de residuo mediante la incorporación de los conceptos de subproducto y los criterios de residuos finales. Ambos conceptos introducen una distinción entre residuo y no residuo.

El concepto de subproducto se relaciona con la sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, donde el objetivo principal no es su producción y que reúne las siguientes condiciones:

- Uso futuro concreto. Esto significa que no sólo es una mera posibilidad, sino que el material será utilizado. Si no tuviese un uso concreto, no podría existir el riesgo de que el material se estuviese eliminando como residuo.
- Se puede utilizar directamente sin ninguna transformación distinta de la práctica industrial normal. La práctica industrial normal puede incluir todos los pasos que un productor tomaría para un producto, como el filtrado, lavado, secado; o adición de materiales para su posterior uso; o llevar a cabo un control de calidad.
- Se produce como una parte integral de un proceso de producción. Por lo tanto, un material que está listo para su posterior uso a través de una parte integral de un proceso de producción, puede ser considerado como un subproducto.
- Además su uso es legal, lo que significa que no generará impactos ambientales o de salud adversos.

El hecho de que un material sea un 'subproducto' o un 'residuo' se tiene que decidir caso por caso. En la Figura 2.1.1 se muestra un árbol de decisión para determinar si un material es subproducto [18].

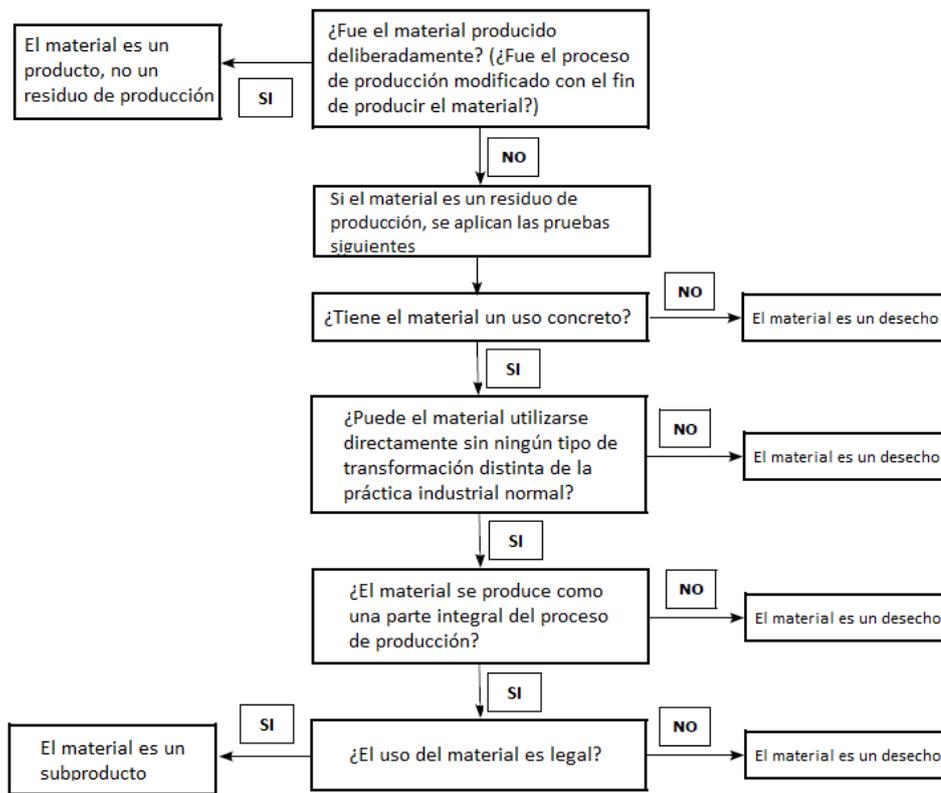


Figura 2.1.1: Árbol de decisión para la determinación de subproductos.

La Directiva Europea incorpora el concepto de residuo final mediante el establecimiento de condiciones que permitan que las sustancias u objetos que cumplen la definición de residuo puedan alcanzar, después de someterse a operaciones de recuperación (incluido el reciclado), un estatus de no-residuo y por lo tanto excluirse del ámbito de aplicación de la legislación sobre residuos. Las condiciones para alcanzar el estatus de no-residuo son las siguientes:

- La sustancia u objeto se usa comúnmente para fines específicos.
- Existe un mercado o demanda.
- La sustancia u objeto satisface los requisitos técnicos para la finalidad específica y cumple la legislación existente y las normas aplicables a los productos. El cumplimiento de este criterio puede darse tanto por el cumplimiento de las especificaciones técnicas pertinentemente establecidas o por el cumplimiento de normas técnicas que se utilizan para materiales vírgenes para el mismo propósito. El material debe estar listo para su uso final y no requerirse pasos adicionales de

tratamiento de residuos.

- El uso no generará impactos ambientales o de salud adversos globales. Este criterio deberá incluir valores límite para las sustancias contaminantes cuando sea necesario y tendrá en cuenta los posibles efectos ambientales adversos del material. El cumplimiento de este criterio se consigue mediante la comparación del uso del material bajo la legislación de productos de referencia con el uso del mismo material en virtud de la legislación de residuos.

2.1.2 Jerarquía de los residuos

La legislación sobre residuos y la política de los Estados miembros de la UE, de acuerdo con la Directiva del Marco de Residuos [16], aplicarán como un orden de prioridad la jerarquía de gestión de residuos (Figura 2.1.2). La jerarquía de la gestión de residuos especifica las mejores opciones de gestión de residuos y los clasifica por orden de su creciente impacto ambiental. Esta jerarquía ha tomado muchas formas durante la última década, pero la prevención sigue siendo la piedra angular de la mayoría de las estrategias de minimización de residuos. El objetivo de la jerarquía de residuos es extraer los máximos beneficios prácticos de los productos y generar la mínima cantidad de residuos.



Figura 2.1.2: Jerarquía de residuos.

A continuación se definen cada uno de los items de la jerarquía de residuos:

- PREVENCIÓN:

La prevención hace referencia a las medidas adoptadas antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en una pérdida, y engloba:

- La cantidad de residuos, incluyendo la reutilización de los productos o su extensión de la vida útil.
- Los impactos adversos de los residuos generados en el medio ambiente y la salud humana.
- El contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.

Técnicamente, la “prevención” no es una operación de gestión de residuos, ya que concierne a las sustancias u objetos antes de que se conviertan en residuos, mientras que a la reducción de las cantidades de residuos se la conoce como prevención cuantitativa de los residuos, y consiste en reducir el contenido de sustancias nocivas en materiales y productos se denomina prevención cualitativa de residuos.

■ PREPARACIÓN PARA LA REUTILIZACIÓN:

Comprobación, limpieza o reparación de las operaciones de recuperación mediante la cual los productos o componentes de los productos que se han convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa. Debe tenerse en cuenta que, por definición, la reutilización se relaciona con cualquier operación mediante la cual productos o componentes, que no sean residuos, se utilizan de nuevo con el mismo fin para el que fueron concebidos. La reutilización es un medio de prevención de residuos, mientras que en el caso de «preparación para la reutilización», el material en cuestión se ha convertido en un residuo en el sentido de la definición de residuos.

■ RECICLADO:

Por otro lado, el reciclaje se define como cualquier operación de recuperación mediante la cual los residuos son transformados en productos, materiales o sustancias, tanto con la finalidad original como con otro tipo de finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se van a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

La idea común detrás del reciclaje es que un material de desecho se procese con el fin de alterar sus propiedades físico-químicas permitiéndole ser utilizado de

nuevo para las mismas u otras aplicaciones. Este es el objetivo explícito de la Directiva del Marco de Residuos, donde la UE debería acercarse a una “sociedad del reciclado”, tratando de evitar la generación de residuos y el uso de residuos como un recurso.

▪ RECUPERACIÓN:

El resultado principal de una operación de recuperación de residuos es servir a un propósito útil sustituyendo a otros materiales que, de otro modo, hubiesen sido utilizados para cumplir una función particular, o residuos que hayan sido preparados para cumplir una función concreta en la instalación o en la economía en general. La recuperación, y su eliminación como término opuesto, comprenden el concepto de tratamiento de residuos. El hecho de que los residuos tienen que servir a un propósito útil “como resultado principal” de la operación de recuperación es un aspecto importante a distinguir de la recuperación de las operaciones de eliminación.

Con respecto a la incineración de residuos, estos deben ser utilizados principalmente como combustible o como otro medio de generación de energía, lo que significa que la mayor parte de los residuos deben ser consumidos durante la operación y la mayor parte de la energía generada debe ser recuperada y utilizada. La sustitución lograda puede tener lugar no sólo en la planta donde están siendo tratados los residuos, sino también “en la economía en general”. Esto tiene como objetivo facilitar la clasificación de los incineradores de residuos con generación de energía eficiente como operaciones de recuperación. La clasificación de las instalaciones de incineración de residuos destinadas al tratamiento de residuos sólidos urbanos se basa en la fórmula R1, lo que incluye a las operaciones que cumplan los requisitos de eficiencia energética especificados en el anexo II de la Directiva Marco de Residuos [18].

Cabe señalar que estas disposiciones se aplican no sólo cuando un material está sustituyendo a otros materiales, sino también cuando el proceso de preparación de un material de desecho se realiza de tal manera que ya no implica riesgos relacionados con los residuos y está listo para ser utilizado como materia prima de otros procesos.

▪ ELIMINACIÓN:

De acuerdo con la Directiva del Marco de Residuos, la eliminación es cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía. Cualquier operación de tratamiento de residuos que no cumpla con los criterios de la definición de recuperación está, por defecto, considerada como desecho. La expresión «incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía» refleja, en cambio, la idea de que cualquier operación de recuperación debe cumplir con el criterio de que “el principal resultado” debe ser el de “residuos que sirven a un propósito útil”, sustituyendo a un material que de otro modo hubiese sido utilizado para tal fin.

El anexo I de la Directiva del Marco de Residuos [16] establece una lista no exhaustiva de operaciones de eliminación; estas incluyen el depósito en vertederos, la incineración con recuperación de energía baja, y la inyección en la tierra.

2.1.3 Producción de residuos y objetivos

Alrededor de 4,8 toneladas de desechos per cápita se generaron en 2013 en la UE. Los flujos de residuos más grandes de Europa se originan a partir de la construcción y demolición, la minería y la explotación de canteras, junto con las actividades de fabricación. Todos los ciudadanos de la UE, en promedio, tiran a la basura 444 kg de residuos domésticos por año, y se espera que esta cifra aumente [19].

Mientras la Figura 2.1.3 presenta la generación total de residuos en los países europeos en 2012 [20], las figuras 2.1.4 y 2.1.5 desglosan esta generación de residuos por actividad económica, tanto en el UE27 como en España en el año 2012 [20]. Como se ha comentado anteriormente, la mayor generación de residuos procede de la construcción, las industrias extractivas y de fabricación.

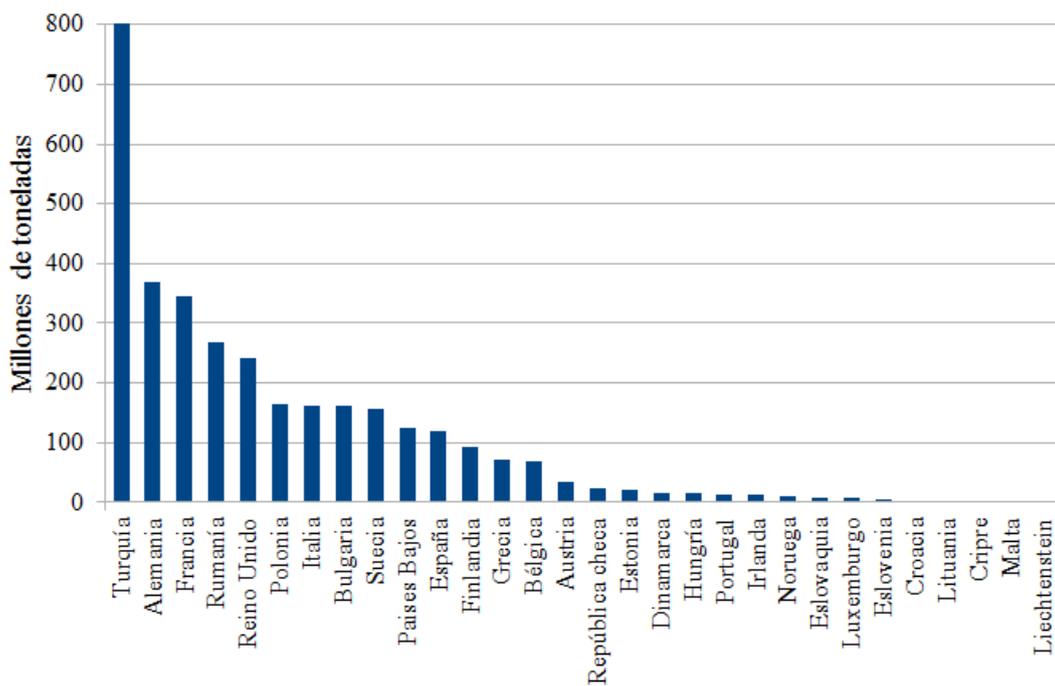


Figura 2.1.3: Generación de residuos en Europa en 2012.

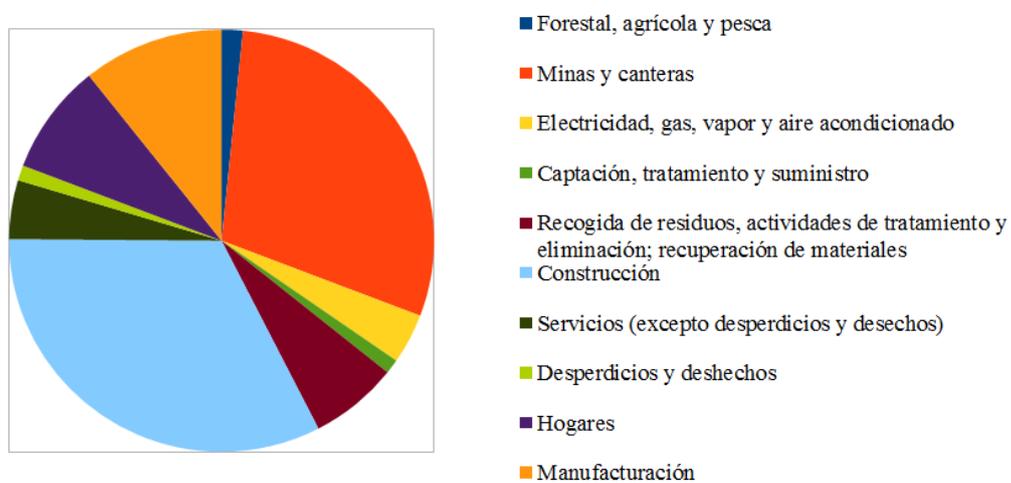


Figura 2.1.4: Generación de residuos por actividad económica en Europa en 2012.

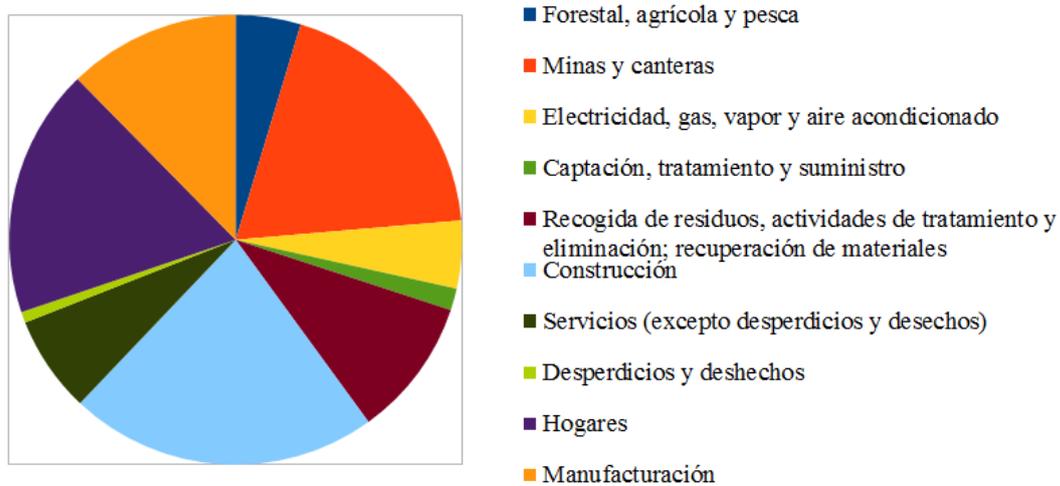


Figura 2.1.5: Generación de residuos por actividad económica en España en 2012.

La Figura 2.1.6 muestra datos de tratamiento de residuos en 32 países europeos en 2013. Como se muestra en la citada figura, Dinamarca y Noruega tenían las mayores tasas de incineración con recuperación de energía, mientras que Turquía, Serbia y Bulgaria alcanzaron casi el 100 % de eliminación de residuos [21].

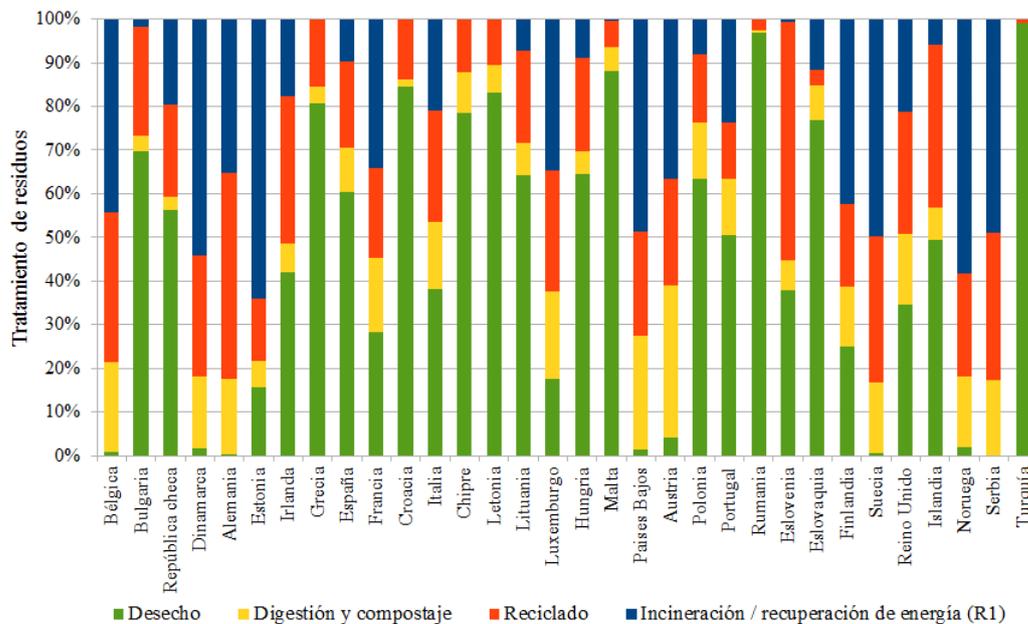


Figura 2.1.6: Tratamiento de residuos en los países europeos en 2013.

Con el fin de cumplir con los objetivos de la Directiva del Marco de Residuos (principio de jerarquía de residuos), y avanzar hacia una sociedad europea del reciclado con un alto nivel de eficiencia de los recursos, los estados miembros se comprometieron a adoptar las medidas necesarias destinadas a lograr los siguientes objetivos:

- En 2020, la reutilización y el reciclaje de materiales de desecho como papel, metal, plástico y vidrio de los hogares y, posiblemente de otras procedencias, cuyos flujos sean similares a los residuos domésticos, se deberá aumentar, al menos, un 50 % en peso de la cantidad global.
- En 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación, incluyendo operaciones que utilizan residuos para sustituir otros materiales, de desechos no peligrosos pertenecientes a la construcción y de residuos de demolición, con exclusión de material definido en la categoría 17 05 04, (siendo estos desde tierra y piedras hasta otros de origen natural) se aumentará hasta un mínimo de 70 % en peso.

2.2 Contaminación acústica

2.2.1 El ruido

Desde hace años, el ruido se ha convertido en un factor contaminante constata en la mayoría de las ciudades, suponiendo en la actualidad un grave problema con efectos fisiológicos, psicológicos, económicos y sociales. El principal causante de la contaminación acústica es la actividad humana. El ruido ha existido desde la antigüedad, pero es a partir de siglo pasado, como consecuencia de la Revolución Industrial, del desarrollo de nuevos medios de transporte y del crecimiento de las ciudades cuando comienza a aparecer el problema de la contaminación acústica urbana [22].

2.2.1.1 Diferencia entre ruido y sonido

Dentro de la corrección acústica no se habla de “sonido” sino de “ruido”. Esta diferenciación, que puede parecer no más que un juego de palabras, es de vital importancia.

- Sonido:

El sonido es una perturbación que se propaga por un medio, por ejemplo el aire. Se puede asemejar el sonido con las ondulaciones producidas en un estanque al tirar una piedra: existe un foco (lugar de la superficie del agua donde cae la piedra) y una propagación de la perturbación producida (las ondas que vemos en la superficie).

Con mayor precisión, se define sonido como la variación en la presión detectada por el oído humano. Es sabido que el oído humano sólo es capaz de percibir los sonidos cuya frecuencia está comprendida entre 20 Hz y 16 Hz aproximadamente. Por debajo de los 20 Hz se extiende la banda de los infrasonidos y por encima de los 16 Hz la banda de los ultrasonidos [22].

- Ruido:

Se puede definir como un sonido molesto o la sensación sonora no deseada. Por tanto, no existe un criterio fijo para determinar si un sonido es o no ruido; es un concepto subjetivo.

Este término está estrechamente relacionado con la contaminación acústica debido a que ésta se da cuando el ruido es considerado como un contaminante, teniendo importantes efectos nocivos sobre los seres humanos.

El ruido puede ser clasificado de forma genérica en función de la frecuencia. Así se distinguen los siguientes tipos de ruido:

- Ruido blando: Se trata de un tipo de ruido que tiene la misma energía en todas las frecuencias. Su espectro en tercios de octava es una recta de pendiente 3 dB/octava.
- Ruido rosa: El nivel de energía de este tipo de ruido decae a razón de 3 dB/octava. El espectro, en tercios de octava, es un valor constante [22].

2.2.1.2 Conceptos fundamentales, definiciones, notaciones y unidades

A continuación, se detallan las definiciones de algunos de los conceptos fundamentales que aparecen en esta investigación, ordenados de modo que se facilite su comprensión.

I. Onda acústica aérea: es una vibración del aire caracterizada por una sucesión periódica en el tiempo y en el espacio de expansiones y compresiones. Se conocen también como ondas sonoras.

Las ondas se pueden clasificar en dos tipos:

- Ondas transversales: la vibración asociada a la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación. Estas ondas sólo pueden propagarse en medios sólidos.
- Ondas longitudinales: la vibración asociada a la perturbación presenta la misma dirección que la propagación. Las ondas longitudinales representan un cambio en el volumen y se pueden propagar en cualquier medio. Dentro de este grupo quedan englobadas las ondas sonoras.

Para que la onda sonora acústica quede definida, es necesario conocer sus parámetros ondulatorios (Figura 2.2.1):

- *Periodo* (T): tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de la onda sonora. Su unidad es el segundo (s).

- *Velocidad del sonido* (c): es la velocidad a la que se propaga la onda acústica en un medio elástico, y sólo dependerá de las características de éste. Se mide en metros por segundo (m/s). La velocidad del sonido en el aire, para 0°C y 1 atmósfera, es de 331,20 m/s; para las condiciones normales de un local esta velocidad es prácticamente 340 m/s [24].

- *Longitud de onda* (λ): es la distancia entre puntos análogos en dos ondas sucesivas. Se mide en metros (m). La longitud de onda está relacionada con la velocidad del sonido, frecuencia y periodo, por la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (2.2.1)$$

- *Amplitud* (A): es el desplazamiento máximo respecto a la posición de equilibrio. La amplitud del sonido ambiental es prácticamente despreciable, del orden de 10^{-7} hasta algunos milímetros.

II. Octava: intervalo de frecuencias comprendido entre una frecuencia determinada y otra igual al doble de la anterior.

III. Presión acústica (P): diferencia que experimenta la presión atmosférica alrededor del valor estático en un punto que se produce cuando se propaga una onda. La unidad es el pascal ($1 \text{ atm} = 1 \text{ N/m}^2$).

IV. Impedancia acústica específica (Z): se define como la relación, real o compleja, entre la presión acústica de la onda y la velocidad propia del movimiento vibratorio (velocidad del sonido):

$$Z = \frac{P}{c} \quad (2.2.2)$$

V. Valor pico, valor medio y valor cuadrático medio: estas son una serie de medidas, que varían con el tiempo, de interés en el ámbito acústico.

- Valor pico (A_{pico}): es el valor de la amplitud máxima de la onda en un periodo considerado.

- Valor medio (A_{medio}): es el valor medio de la señal que viene dado por la expresión:

$$A_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T |a| dt \quad (2.2.3)$$

- Valor cuadrático medio (A_{RMS}): esta es la magnitud más común y está directamente relacionada con la energía contenida en la señal. La expresión que define este valor es la que sigue:

$$A_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T |a|^2 dt \quad (2.2.4)$$

VI. Potencia acústica (W): es la energía emitida en la unidad de tiempo por una fuente determinada. Su unidad de medida es el vatio (W).

VII. Intensidad acústica (I): es la energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de ondas. La unidad de medida es el vatio por metro cuadrado (W/m^2).

VIII. Relación entre potencia, intensidad y presión acústica: las expresiones que relacionan estas tres magnitudes son las que se muestran a continuación:

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \quad W = I \cdot 4\pi r^2 \quad P_{RMS} = \sqrt{\frac{W \cdot \rho \cdot c}{4\pi r^2}} = \sqrt{I \cdot \rho \cdot c} \quad (2.2.5)$$

Siendo:

I = intensidad sonora (W/m^2)

P_{RMS} = presión cuadrática media (Pa)

ρ = densidad del aire (kg/m^3)

c = velocidad del sonido (m/s)

W = potencia acústica (W)

r = distancia de la fuente (m)

IX. Nivel de presión acústica (L_p): se define mediante la expresión $L_p = 20 \log \frac{P}{P_o}$, donde P es la presión acústica considerada (en Pa) y P_o es la presión acústica de referencia que se establece en $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Este parámetro se mide en decibelios (dB).

X. Nivel de intensidad acústica (L_I): se define mediante la expresión:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_o} \quad (2.2.6)$$

Donde I es la intensidad acústica considerada (W/m^2) e I_o es la intensidad acústica de referencia que se establece en 10^{-12} W/m^2 . La unidad de medida de este parámetro es el decibelio (dB).

XI. Nivel de potencia acústica (L_W): se define mediante la expresión:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_o} \quad (2.2.7)$$

Donde W es la potencia acústica considerada (W) y W_o es la potencia acústica de referencia establecida en 10^{-12} W. La unidad de medida es el decibelio (dB).

XII. Decibelio (dB): es una unidad logarítmica relativa empleada en acústica para expresar la relación entre una magnitud acústica y una magnitud de referencia.

Al ser una unidad relativa, para las aplicaciones acústicas, se toma como convención, un umbral de audición de 0 dB equivalente a un sonido con una presión de 20 μ Pa. El umbral del dolor se produce a partir de los 140 dB (200 Pa).

Se utiliza una escala logarítmica porque la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala aproximadamente logarítmica, no lineal. Por ello el decibelio (dB), resulta adecuado para valorar la percepción de los sonidos de un oyente.

XIII. Escala ponderada A de niveles, decibelio A: esta escala se emplea para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro de un campo auditivo y se establece mediante el empleo de la

curva de ponderación A. Se aplica para los sonidos de bajo nivel y se utiliza como unidad el decibelio A (dBA). Existen además otras escalas ponderadas como la B (para los sonidos de nivel medio) y la C (aplicadas en caso de sonidos de alto nivel), como puede observarse en la Figura 2.2.2.

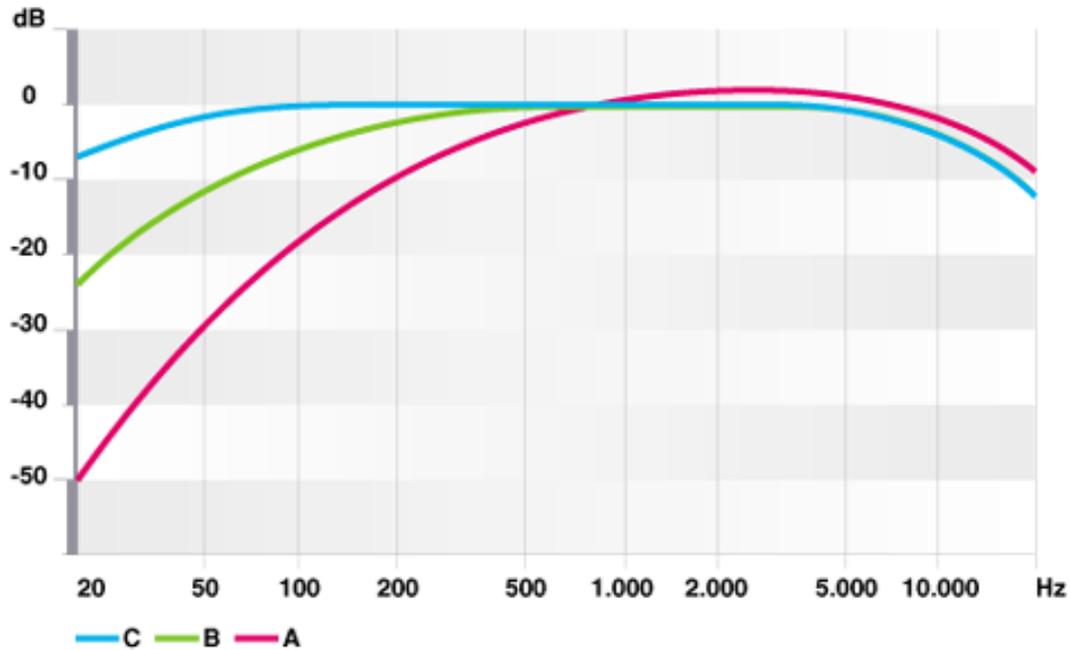


Figura 2.2.2: Curvas de ponderación.

XIII. Tiempo de reverberación (T_R): es el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido disminuya a la millonésima parte de su valor inicial o, lo que es lo mismo, para que el nivel de intensidad acústica disminuya 60 dB por debajo del valor inicial.

2.2.2 Distribución espacial del ruido

Cuando una onda sonora choca contra un material o una superficie, parte de ella se absorbe, parte se refleja y el resto se transmite. Existe, por tanto, una relación inminente entre la energía incidente y la energía absorbida, reflejada y transmitida (Figura 2.2.3).

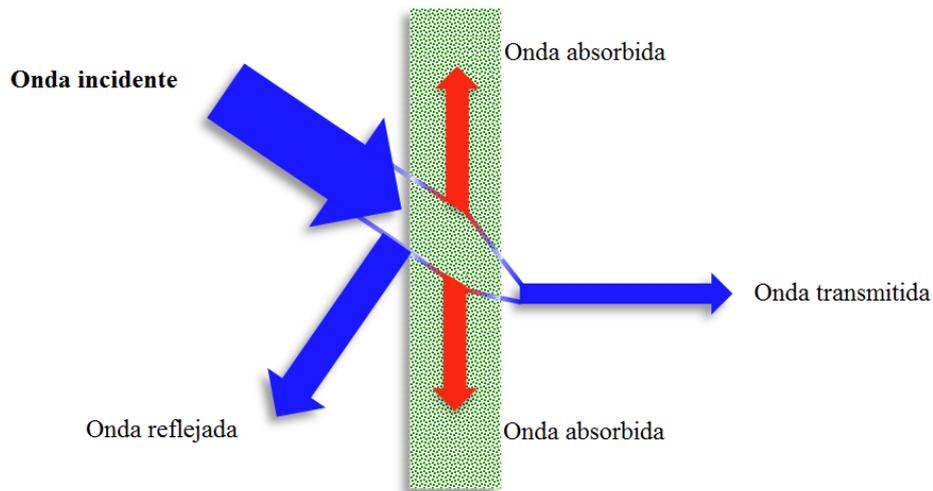


Figura 2.2.3: Distribución espacial del sonido.

De aquí, surge la siguiente expresión referente a la conservación de energía:

$$E_{incidente} = E_{absorbida} + E_{reflejada} + E_{transmitida} \quad (2.2.8)$$

Si los dos miembros de la ecuación se dividen por la energía incidente, la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$1 = \alpha + |r|^2 + |t|^2 \quad (2.2.9)$$

Donde,

α = Coeficiente de absorción

$|r|^2$ = Coeficiente de reflexión de energía

$|t|^2$ = Coeficiente de transmisión de energía

Si el fragmento de energía que traspasa la muestra es muy pequeño (despreciable) comparada con la absorbida, entonces el coeficiente de absorción de energía es obviamente representado por la ecuación (1.2.3) [25].

Por tanto se centrará la atención en los fenómenos de absorción y reflexión acústica.

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.2.10)$$

2.2.2.1 Absorción acústica

Se denomina absorción acústica al fenómeno por el cual una parte de la energía sonora que incide sobre una superficie es absorbida transformándose en otra forma de energía, generalmente calorífica.

La característica fundamental de los materiales absorbentes es transformar gran parte de la energía sonora que los atraviesa reflejando la mínima cantidad de sonido, de modo que la mayor energía sonora posible sea susceptible de ser transformada en calor por el efecto Joule.

No hay reglas fáciles para definir su comportamiento, lo que si se puede afirmar es que todo material absorbente debe ser poroso. Esto quiere decir que debe permitir el paso de aire para que el material pueda disipar las ondas sonoras en sus choques contra las paredes de las cavidades. Los materiales con celdas interiores de superficie cerrada no pueden ser buenos absorbentes en ningún caso.

Todos los materiales absorben parte de la energía contenida por la onda sonora que incide sobre ellos; esta absorción de energía sonora por un material está expresada por un factor de absorción o coeficiente de absorción (α). Este coeficiente se define como la relación existente entre la energía acústica absorbida y la incidente. De esta forma:

$$\alpha_i = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.2.11)$$

Por definición una abertura absorbe la totalidad de la energía incidente, siendo $\alpha_i = 1$.

La unidad de absorción es el Sabino, que expresa la capacidad absorbente de una superficie en unidades de absorción por unidad de m^2 o ft^2 . Así como una superficie de $100 m^2$ con un coeficiente de absorción de 0,8 presentará una absorción de 80 sabinos m^2 , al igual que una abertura de $0,8 m^2$.

También cabe destacar que el coeficiente de absorción de un material depende de:

- El espectro sonoro de la onda incidente.
- La naturaleza del material (tipo, forma, espesor, características constructivas, etc.)
- Las condiciones termohidrométricas del ambiente.

2.2.2.2 Reflexión acústica

Cuando la onda acústica incide sobre el material, parte de ella rebota y se refleja cambiando de dirección. Esta reflexión del sonido se representa como el porcentaje de energía acústica incidente que refleja la superficie.

Según esto, el coeficiente de reflexión se define como la relación existente entre la energía acústica reflejada y la incidente. Así, la ecuación que representa dicha reflexión queda de la siguiente forma:

$$r = \frac{E_{reflejada}}{E_{incidente}} \quad (2.2.12)$$

Este fenómeno tiene lugar cuando la superficie del material es dura y lisa, como por ejemplo: el hormigón, el ladrillo, etc. En acústica este tipo de materiales que presentan elevada reflexión se emplean como aislantes del ruido aéreo.

2.2.3 Contaminación atmosférica

Incluida en los problemas medioambientales, la contaminación acústica constituye un elemento más de la degradación medioambiental. Aunque hasta hace poco tiempo este tipo de contaminación ha estado en un segundo plano, sin que se le otorgase la importancia que le corresponde, en la actualidad el ruido es una de las principales causas de preocupación entre la población de las ciudades por ser considerado como uno de los mayores responsables del deterioro del nivel de calidad de vida y por los efectos nocivos que éste provoca en la salud, comportamiento y actividades humanas. Esta falta de atención hacia la contaminación acústica se debe a tres factores fundamentales:

- Se trata de una contaminación localizada, por lo tanto afecta a un entorno limitado a la proximidad de la fuente sonora.
- Los efectos perjudiciales, en general, no aparecen hasta pasado un tiempo largo, es decir, sus efectos no son inmediatos.
- A diferencia de otros contaminantes es frecuente considerar el ruido como un mal inevitable y como el desarrollo y del progreso.

En un conocido informe de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) se señala que en las décadas de los años sesenta y setenta se produjo un desarrollo muy notable de los modernos medios de transporte y de sus índices de utilización, originándose un aumento considerable en los niveles de ruido ambiental. Se afirma, además, que unos 130 millones de habitantes de países de la unión europea están expuestos a niveles de ruido inaceptables, por encima de los 65 dB, y unos 300 millones a niveles comprendidos entre 55-65 dB. De acuerdo con este informe, España ocupa el segundo lugar por detrás de Japón, en el ranking mundial de los países en los que la contaminación sonora es más elevada, entendiéndose que alrededor de un 23 % de la población se ven expuestos a niveles de ruido superiores a 65 dB [26].

Para una correcta interpretación de estos datos es importante saber que por debajo de 45 dB no se perciben molestias; con sonidos de 55 dB un 10 % de la población se ve afectada y con 85 dB todos los seres humanos se sienten alterados [22].

Así, aunque la presencia del sonido es consustancial en el entorno y forma parte de los elementos cotidianos, éste se puede convertir en un agente agresor en forma de ruido, ya que es un contaminante de primer orden y puede generar patologías específicas.

2.2.3.1 Fuentes de contaminación acústica

Existen dos importantes grupos de fuentes productoras de ruido:

- Fuentes naturales (viento, sonido del mar, etc.)

- Fuentes antropogénicas: ruidos que aparecen en el medio causados por la actividad humana.

Son los ruidos englobados en el segundo grupo los de mayor repercusión y los principales causantes de la contaminación acústica.

Así, los elementos que causan esta contaminación se asocian con los procesos derivados principalmente del transporte por carretera, tráfico ferroviario, tráfico aéreo, industria, obras de construcción y civiles y actividades recreativas entre otros. Los vehículos de motor suponen casi el 80 % de las fuentes productoras de contaminación acústica, el 10 % corresponde a las industrias, el 6 % a ferrocarriles y el 4 % a bares, locales públicos, talleres industriales, etc [22].

2.2.3.2 Efectos sobre la salud

Las diferentes investigaciones realizadas a lo largo de las últimas décadas por numerosos autores en todo el mundo han demostrado que la contaminación sonora afecta claramente a la salud de las personas, produciendo una serie de efectos fisiológicos y psicológicos de naturaleza muy diversa. A continuación se citan algunos de los efectos nocivos provocados por el ruido:

A. Malestar: es el efecto más común del ruido sobre las personas. La sensación de malestar procede de la interferencia con la actividad en curso o con el reposo y de otras sensaciones, menos definidas pero a veces muy intensas, de estar siendo perturbado como son: intranquilidad, inquietud, desasosiego, depresión, desamparo, ansiedad o rabia. Todo ello contrasta con la definición de “salud” dada por la Organización Mundial de la Salud: “Un estado de complejo bienestar físico, mental y social, no la mera ausencia de enfermedad”.

Durante el día se suele experimentar malestar moderado a partir de los 50 dB, y fuerte a partir de los 55 dB.

B. Interferencia con la comunicación: el nivel del sonido de una conversación en tono normal oscila entre los 50 y 55 dB. Hablando a gritos se puede llegar a 75 u 80 dB. Por otra parte, para que la palabra sea perfectamente inteligible es necesario que su intensidad supere en alrededor de 15 dB al ruido de fondo.

Por tanto, un ruido superior a 35 ó 40 dB provocará dificultades en la comunicación oral que sólo podrán resolverse, parcialmente, elevando el tono de voz. A partir de los 65 dB de ruido, la conversación se torna extremadamente difícil.

Situaciones parecidas se dan cuando el sujeto ésta intentando escuchar otras fuentes de sonido (televisión, música, etc.). Ante la interferencia de un ruido, se reacciona elevando el volumen de la fuente creándose así una mayor contaminación sonora sin lograr totalmente el efecto deseado.

C. Pérdida de atención, de concentración y de rendimiento: cuando la realización de una tarea necesita la utilización de señales acústicas, el ruido de fondo puede enmascarar estas señales o interferir con su percepción. Por otra parte, un ruido repentino producirá distracciones que reducirán el rendimiento en muchos tipos de trabajos, especialmente en aquellos que exijan un cierto nivel de concentración. En ambos casos la realización de la tarea se ve afectada, apareciendo errores y disminuyendo la calidad y cantidad de la misma. Además, algunos accidentes, tanto laborales como de circulación, pueden ser debidos a este efecto.

D. Trastornos del sueño: el ruido influye negativamente sobre el sueño de tres formas diferentes que se dan, en mayor o menor grado según peculiaridades individuales, a partir de los 30 dB:

- Dificultad o imposibilidad de dormirse.
- Puede causar interrupciones del sueño que, si son repetidas, pueden llevar al insomnio. La probabilidad de despertar depende de la intensidad del ruido y de la diferencia entre ésta y el nivel previo de ruido estable. A partir de los 45 dBA la probabilidad de despertar es grande.
- Disminuye la calidad del sueño, acortándose sus fases más profundas y volviéndose éste menos tranquilo. Aumentan la presión arterial y el ritmo cardiaco, hay vasoconstricción y cambios en la respiración.

Consecuencia de todo ello, el descanso no es apropiado. Si la situación se prolonga, el equilibrio físico y psicológico se ven seriamente afectados.

E. Daños al oído: se trata de un efecto físico que depende únicamente de la intensidad del sonido, aunque sujeto a variaciones individuales. En la sordera transitoria o fatiga auditiva no existe aún lesión. La recuperación es normalmente casi completa al cabo de dos horas y completa a las 16 horas de cesar el ruido, si se permanece en un estado de confort acústico (menos de 50 dB en vigilia o de 30 durante el sueño). La sordera permanente ésta producida por: exposiciones prolongadas a niveles superiores a 75 dBA, sonidos de corta duración de más de 110 dBA, o bien por acumulación de fatiga auditiva sin tiempo suficiente de recuperación. Hay lesión del oído interno.

F. Estrés: las personas sometidas de forma prolongada a situaciones como las anteriormente descritas (ruidos que hayan perturbado y frustrado sus esfuerzos de atención, concentración o comunicación, o que hayan afectado a su tranquilidad, su descanso o su sueño) suelen desarrollar algunos de los síndromes siguientes [22]:

- Cansancio crónico.

- Tendencia al insomnio.

- Enfermedades cardiovasculares: hipertensión, cambios en la composición química de la sangre, isquemias cardíacas, etc. Se han mencionado aumentos de hasta el 20-30 % en el riesgo de ataques al corazón en personas sometidas a más de 65 dB en periodo diurno.

- Trastornos del sistema inmune responsable de la respuesta a las infecciones y a los tumores.

- Trastornos psicofísicos tales como ansiedad, depresión, irritabilidad, náuseas, jaquecas, y neurosis o psicosis en personas predispuestas a ello.

- Cambios conductuales, especialmente comportamientos antisociales tales como la hostilidad, intolerancia, agresividad y aislamiento social.

Para evitar estos efectos las legislaciones europeas marcan como límite aceptable 65 dB durante el día y 55 dB durante la noche, ya que la capacidad auditiva

se deteriora en la banda comprendida entre 75 dB y 125 dB y pasa a un nivel doloroso cuando supera los 125 dB; alcanzándose el umbral del dolor a los 140 dB.

A continuación, se muestra la Tabla 2.2.2, en la que se indica en la primera columna los valores a partir de los cuales se empezarán a sentir, dependiendo de la sensibilidad individual, los efectos que se señalan en la segunda columna.

dB	EFFECTOS
30	Dificultad en conciliar el sueño y pérdida de la calidad del mismo
40	Dificultad en la comunicación verbal
45	Probable interrupción del sueño
50	Malestar diurno moderado
55	Malestar diurno fuerte
65	Comunicación verbal extremadamente difícil
75	Pérdida del oído a largo plazo
110-140	Pérdida del oído a corto plazo

Tabla 2.2.2: Efectos del ruido.

2.2.3.3 Índice de valoración de ruidos

En este apartado se definen algunos de los parámetros acústicos que se utilizan para evaluar el nivel de ruido.

- Índice de presión sonora (L_p): también conocido como nivel de presión acústica, ya se ha definido anteriormente en el apartado 1.2.1.2 mediante la expresión:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_o} \quad (2.2.13)$$

- Nivel de presión sonora equivalente (L_{eq}): conocido como nivel equivalente continuo, es el nivel de ruido continuo que contiene la misma energía que el ruido medido en un periodo de tiempo determinado, T. Viene dado por la expresión:

$$L_{eq} = 10 \log\left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_o^2} dt\right] = 10 \log\left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L_p} dt\right] \quad (2.2.14)$$

Para medidas discretas la expresión anterior se transforma en un sumatorio.

$$L_{eq} = 10 \log\left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_p} \Delta t_i\right] \quad (2.2.15)$$

Este parámetro permite comparar el riesgo de daño auditivo ante la exposición a diferentes tipos de ruido.

- Nivel percentil N (L_N): nivel de ruido que es alcanzado o superado el N % del tiempo de observación. Uno de los más utilizados es el L_{90} , indicativo del ruido de fondo de la señal.

2.2.3.4 Control de contaminación acústica

El control del ruido ambiental está basando en una amplia diversidad de estrategias. Para que se dé el problema de contaminación acústica se necesitan al menos tres factores: una fuente sonora, un medio de propagación y un receptor. Así, la actuación debe dirigirse hacia cada uno de estos factores de una manera eficaz.

A. Fuente sonora: la acción más directa y eficiente contra los niveles de ruido excesivo es la reducción del ruido en la propia fuente. En este sentido, en muchos países desarrollados existen regulaciones sobre los niveles máximos permitidos para la emisión sonora por parte de diversas fuentes como vehículos de motor, aviones, vehículos empleados en la construcción y obras públicas, etc. En términos generales, las estrategias más efectivas para reducir su impacto sobre las personas, consisten en rediseñar o reemplazar los vehículos o equipos ruidosos por otros más silenciosos [26].

B. Medio de propagación: otra posibilidad es actuar sobre el medio de propagación. En este caso hay que destacar la importancia de una adecuada planificación urbanística. Así, una reducción adicional en los niveles de ruido puede obtenerse aumentando simplemente la distancia existente entre el receptor y la fuente de ruido. Por ejemplo, el impacto sonoro producido por un aeropuerto proyectado

sobre los residentes en una zona urbana puede reducirse mucho si el aeropuerto se construye lejos de esta zona. Los niveles de contaminación sonora producidos por una autopista sobre una zona residencial se pueden reducir sustancialmente planificando adecuadamente esa vía de tráfico y mediante un diseño urbanístico muy cuidadoso de dicha zona. La transmisión del sonido se puede controlar también usando pantallas o barreras acústicas.

C. Receptor: en este caso, el mejor ejemplo de control de ruido mediante esta estrategia se encuentra en la utilización de dispositivos de protección personal. En este sentido amplio se incluye también el aislamiento acústico de edificios.

Una política efectiva destinada a controlar con éxito el ruido ambiental exige la aplicación de una larga serie de acciones específicas tomadas en orden secuencial.

La primera fase consiste en una cuidadosa evaluación de los problemas planteados: identificación de las principales fuentes de ruido, análisis de sus características, medida de los niveles sonoros, etc. Esta tarea se basa en la elaboración de un mapa sonoro de la zona considerada. En la segunda fase se realiza una formulación realista de los objetivos a alcanzar. En la tercera fase, se aplican los primeros técnicos y administrativos más efectivos para alcanzar los objetivos señalados. En el diseño de las iniciativas destinadas a controlar un problema de contaminación sonora debe tenerse en cuenta que todos los problemas consisten en una cadena con tres eslabones diferentes: la fuente de ruido, el camino de transmisión sonora y el receptor. En consecuencia, las medidas o actuaciones para controlar el ruido pueden ser aplicadas únicamente a algunos de estos tres elementos o a todos ellos en su conjunto. La cuarta y última fase consiste en comprobar la efectividad de las medidas adoptadas. En caso de no alcanzar los objetivos propuestos inicialmente, habrá que repetir todas las actuaciones desde su fase inicial.

2.2.4 Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras

El tráfico rodado es, con diferencia, la fuente de ruido más importante en los países desarrollados. Según fuentes de la Dirección General de Tráfico, en el año 2010 el parque automovilístico español contaba con más de 31 millones de vehículos, viéndose esta cifra incrementada desde la fecha.

Existen tres formas principales de controlar el impacto del ruido de tráfico, de acuerdo con los factores del ruido comentados en el apartado anterior:

- La primera posibilidad consiste en intentar reducir la emisión de ruido en la propia fuente, diseñando vehículos más silenciosos.
- Diseño de estrategias que limiten la transmisión de ruido una vez que ha sido generado. Se incluyen en este caso iniciativas como la construcción de barreras acústicas o la realización de una planificación adecuada del uso del suelo.
- Por último, la utilización de medidas de protección del receptor contra la inmisión de ruido.

En este caso, se va a centrar la atención en las barreras o pantallas acústicas, pues el estudio de investigación llevado a cabo tiene por objeto la elaboración de un material reciclado absorbente acústico para emplearlo posteriormente en la construcción de este tipo de dispositivos.

La construcción de pantallas o barreras acústicas en los bordes de las carreteras y autopistas se ha convertido en el procedimiento más generalizado de lucha contra el ruido de tráfico en los espacios abiertos [26].

Una pantalla acústica consiste básicamente en alguna forma de muro vertical. Como requisitos básicos, toda pantalla acústica debe poseer una masa suficiente para atenuar adecuadamente el ruido, debe estar prácticamente exenta de mantenimiento una vez instalada y no debe suponer un aumento de los riesgos de accidente; además se debe tener en cuenta el coste económico y el aspecto visual y estético.

Con el fin de proporcionar un grado de protección óptimo, la pantalla debe ser levantada lo más cerca posible de la fuente de ruido o de la zona que se desea proteger y, en particular, siempre que sea posible, debe ocultar por completo la vista de la carretera desde la zona a proteger. Las Figuras 2.2.5 y 2.2.6 muestran como el nivel de apantallamiento que proporciona una determinada barrera acústica depende de la diferencia entre las distancias más cortas entre la fuente

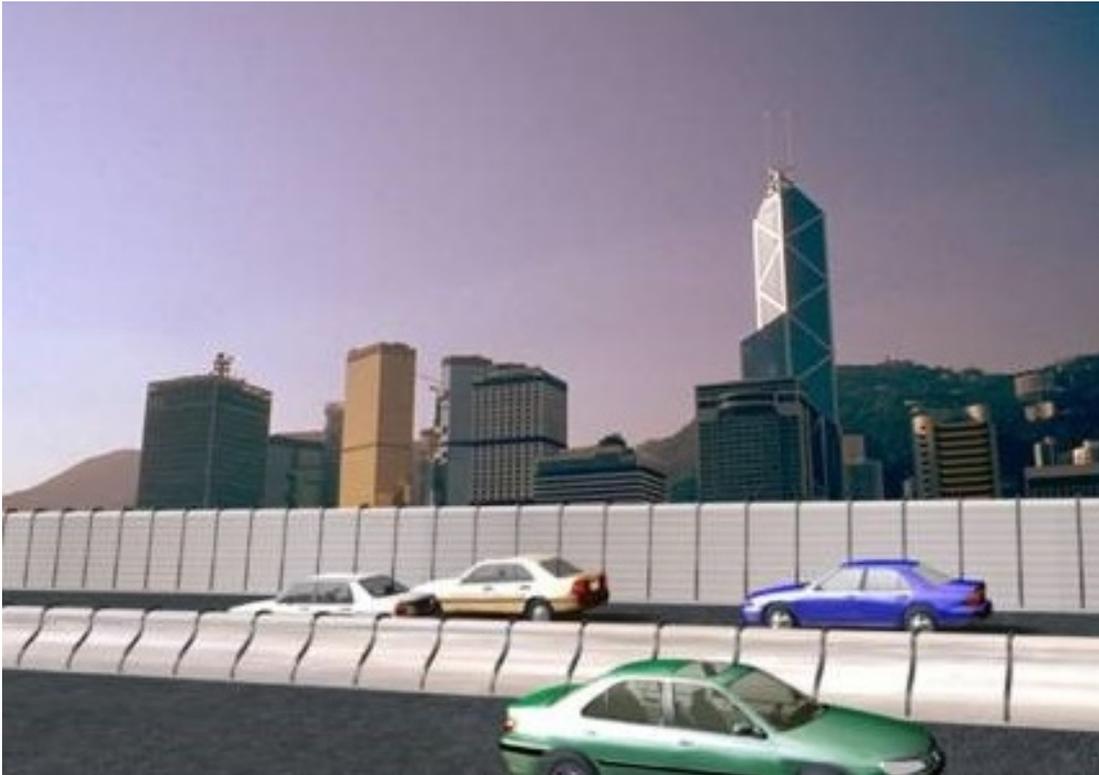


Figura 2.2.4: Barreras acústicas.

de ruido, la pantalla y el receptor, así como de la distancia que separa estos dos últimos en línea recta [22]. Así, mediante estas figuras es posible el cálculo de la atenuación sonora producida por una pantalla acústica.

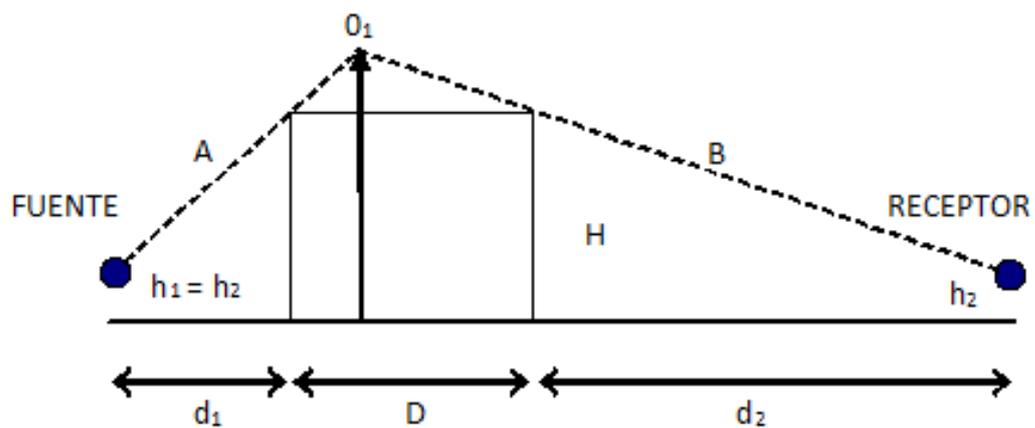


Figura 2.2.5: Condiciones geométricas en la evaluación del apantallamiento.

El significado de las variables que aparecen en la Figura 2.2.5 es el siguiente:

h_1 = Altura a la que está situada la fuente

h_2 = Altura a la que está situado el receptor

H = Altura de la barrera

d_1 = Distancia horizontal entre fuente y pantalla acústica

d_2 = Distancia horizontal entre pantalla acústica y receptor

D = Espesor de la pantalla acústica

$A + B$ = Distancia más corta entre la fuente de ruido, la pantalla y el receptor

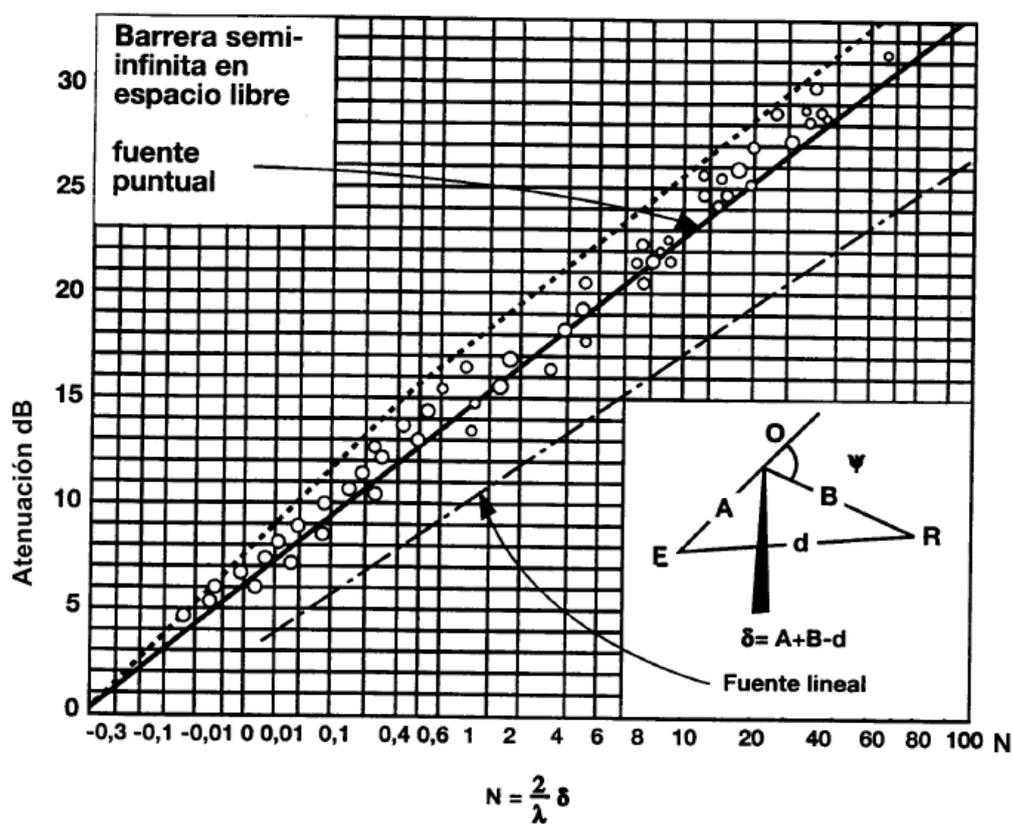


Figura 2.2.6: Atenuación sonora de pantallas.

Con gráfica ilustrada en la Figura 2.2.6 se determina directamente la atenuación sonora de la pantalla en decibelios a partir del número de Fresnel (N):

$$N = \frac{2}{\lambda} \delta \quad (2.2.16)$$

Donde,

λ = Longitud de onda

$\delta = A + B - d$

$d = d_1 + D + d_2$

En el Reino Unido la altura de las barreras acústicas utilizadas en las carreteras se ha limitado a 3 metros; en otros países como Estados Unidos y Canadá se permiten alturas algo mayores. En cualquier caso, se considera que las barreras con alturas superiores a los 4 metros son visualmente inaceptables [22].

En el diseño de una pantalla acústica también se debería tener en cuenta que las ondas sonoras generadas por el tráfico rodado son susceptibles de ser reflejadas por dicha pantalla; esto afectaría negativamente a los receptores situados en el lado de la fuente de la pantalla. La Figura 2.2.7 recoge el espectro normalizado correspondiente al ruido producido por el tráfico.

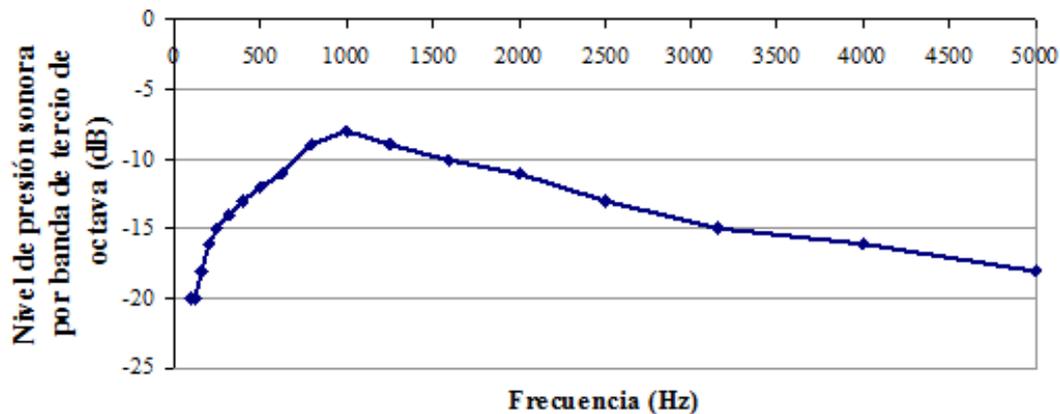


Figura 2.2.7: Espectro normalizado del ruido de tráfico.

En el caso de que existan pantallas en ambos lados de una vía de tráfico pueden producirse reflexiones sonoras múltiples, incidiendo negativamente en el espacio situado entre ellas. Así, con estas configuraciones el apantallamiento esperado de cada una de las barreras puede verse reducido sustancialmente como consecuencia del ruido difractado sobre las mismas.

Al igual que puede suceder con otros obstáculos, en presencia de viento, una pantalla acústica produce un importante gradiente de velocidad de éste, como resultado del contraste que supone la existencia de una región sin viento situada

justo detrás de la barrera con las zonas de la parte superior de la barrera, en las que las líneas de corriente se acumulan. Al otro lado de la barrera, estas líneas de corriente se curvan hacia el suelo produciendo una importante refracción del sonido. Como consecuencia de esto, el tamaño de la zona de sombra sonora situada tras la barrera disminuye, haciéndolo también la eficacia de la pantalla. Además, también pueden originarse turbulencias más o menos fuertes que afectan a la propagación del sonido que se trata de reducir. Con el fin de reducir los efectos negativos que el viento produce sobre el comportamiento de las pantallas acústicas se utilizan pantallas con perfiles aerodinámicos especiales.

En cuanto a la acumulación de nieve y a la posible formación de hielo a los pies de la pantalla, son factores a tener en cuenta desde el punto de vista de la seguridad vial. Además las pantallas acústicas deben ser suficientemente resistentes para evitar su deterioro consecuencia de la acción de los diversos agentes meteorológicos.

Los materiales que se han utilizado en la construcción de este tipo de dispositivos son muy diversos. Desde un punto de vista general, las pantallas acústicas se pueden clasificar en reflectoras o absorbentes.

- Pantallas acústicas reflectoras: son las más frecuentes y suelen estar construidas con paneles prefabricados de diversos materiales; el más común es el hormigón, aunque también existen paneles de madera, plástico de vinilo o aluminio.

- Pantallas acústicas absorbentes: el uso de este tipo de pantallas está justificado por su capacidad de reducir la intensidad del sonido reflejado en la superficie de la barrera. Al igual que en el caso de las pantallas reflectoras, el número de diseños propuestos y utilizados es muy elevado. Una configuración muy típica consiste en el empleo de paneles huecos que muestran una superficie de acero u otro material que está perforada o abierta en el lado dirigido hacia la fuente sonora; y rellenos en su interior con material acústico absorbente como lana mineral.

2.2.4.1 Normativa

La normativa europea aplicable incluye las normas EN 1793 (partes 1, 2 y 3), EN 1794 (partes 1 y 2), EN 14388 y EN 14389 (partes 1 y 2). A continuación se detallan cada una de ellas.

EN 1793 “Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico”

- *Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora [27]*

Cuando haya que instalar una superficie reflectante del sonido a lo largo de una carretera, puede resultar eficaz emplear unos dispositivos de absorción acústica del lado del tráfico, con el objetivo de reducir el ruido ambiental añadido como consecuencia del sonido reflejado. Las circunstancias en las que este tratamiento puede llegar a ser necesario son las siguientes: pantallas antirruído, paredes o muros de contención susceptibles de reflejar las ondas sonoras hacia zonas no protegidas; trincheras verticales o superficies reflectantes paralelas; túneles y sus accesos; cuando el tráfico rodado pasa cerca de una pantalla donde existan reflexiones entre los vehículos y la pantalla que pueden reducir la eficacia de esta.

Esta norma especifica un método de ensayo para evaluar las prestaciones de absorción acústica de los dispositivos reductores de ruido diseñados para las carreteras (medición de las características intrínsecas), que dependen además de factores que no están relacionados con el producto en sí mismo, como, por ejemplo, las dimensiones de la pantalla, la calidad de su instalación y los factores relacionados con el emplazamiento, tales como la impedancia del terreno, la geometría del lugar, etc. Se ha diseñado este ensayo para establecer la medición del comportamiento de absorción acústica intrínseco del dispositivo y la clasificación resultante debería facilitar la selección de los dispositivos a emplear en aplicaciones específicas a lo largo de las vías.

Se debe determinar el índice de evaluación de la absorción acústica, DL_α , en decibelios, para indicar el comportamiento del producto. Además de especificar el valor de DL_α es necesario clasificar el comportamiento de absorción, se debe utilizar entonces las categorías dadas a continuación en la Tabla 2.2.3.

CATEGORÍA	DL_α (dB)
A0	No determinado
A1	< 4
A2	4 a 7
A3	8 a 11
A4	> 11

Tabla 2.2.3: Categoría de comportamiento de absorción.

- *Parte 2: Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo [28]*

Las pantallas antirruido dispuestas a lo largo de las carreteras deben proporcionar un aislamiento acústico adecuado, de forma que el sonido transmitido directamente a través del dispositivo sea irrelevante en relación con el sonido difractado por la parte superior. Esta norma especifica un método de ensayo para la evaluación del comportamiento de aislamiento a ruido aéreo de los dispositivos reductores de ruido diseñados para las carreteras (medición de las características intrínsecas). Esta norma no se refiere a la determinación de las prestaciones in situ (características extrínsecas), que dependen además de factores que no están relacionados con el producto en sí mismo, como por ejemplo, las dimensiones de la pantalla, la calidad de su instalación y los factores relacionados con el emplazamiento, tales como la impedancia del terreno, geometría del lugar, etc. Se ha establecido este ensayo para permitir la medición del comportamiento de aislamiento al ruido aéreo intrínseco del dispositivo y la clasificación resultante debería facilitar la selección de dispositivos destinados a aplicaciones específicas a lo largo de las vías.

Se debe determinar el índice de evaluación del aislamiento al ruido aéreo, DL_R , en decibelios, para indicar el comportamiento del producto. Además de especificar el valor de DL_R , es necesario clasificar el comportamiento de aislamiento, se debe utilizar entonces las categorías dadas a continuación en la Tabla 2.2.4.

CATEGORÍA	DL_R (dB)
B0	No determinado
B1	< 15
B2	15 a 24
B3	> 24

Tabla 2.2.4: Categorías de comportamiento de aislamiento.

- *Parte 3: Espectro normalizado de ruido de tráfico [29]*

Dado que las principales propiedades acústicas de los dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras, pérdida por transmisión y absorción, dependen de la frecuencia, es necesario definir un espectro de ruido de tráfico para calcular los índices de evaluación en los ensayos. Esta norma define las propiedades fundamentales del ruido de tráfico rodado medido junto a la carretera mediante un espectro sonoro normalizado característico del tráfico, que es necesario para determinar los índices de evaluación de los dispositivos reductores de ruido, excep-

to cuando se emplean en condiciones reverberantes, como por ejemplo, en túneles.

El espectro normalizado de ruido de tráfico que se da en la Tabla 2.2.5 debe utilizarse como espectro de referencia para la evaluación del comportamiento acústico de los dispositivos reductores de ruido de tráfico.

F_i [Hz]	L_i [dB]
100	-20
125	-20
160	-18
200	-16
250	-15
315	-14
400	-13
500	-12
630	-11
800	-9
1000	-8
1250	-9
1600	-10
2000	-11
2500	-13
3150	-15
4000	-16
5000	-18

Tabla 2.2.5: Espectro normalizado de ruido de tráfico.

EN 1794 “Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Comportamiento no acústico”

- *Parte 1: Comportamiento mecánico y requisitos de estabilidad [30]*

Mientras desempeñan su función primaria, los dispositivos para reducir el ruido de tráfico por carretera, están sometidos a una serie de fuerzas debidas al viento, presión dinámica del aire causada por el paso del tráfico y al peso propio de los elementos. Así mismo pueden estar también sometidos a impactos causados por piedras u otros desechos proyectados por los neumáticos de los vehículos y en algunos países, a la fuerza dinámica de la nieve lanzada por la maquinaria utilizada para la limpieza de las carreteras durante el invierno. Las deformaciones de un dispositivo de reducción de ruido bajo estas cargas durante su vida útil de diseño

no deberían reducir su eficacia.

- *Parte 2: Requisitos en relación con la seguridad general y el medio ambiente [31]*

Mientras desempeñan su función principal, los dispositivos para reducir el ruido de tráfico por carretera no deberían generar ningún riesgo para los usuarios de la carretera y para las demás personas que pudieran estar cerca, o para el medio ambiente en general. Estos dispositivos no deberían facilitar la propagación de un incendio desde el arcén o los terrenos colindantes. Puede ser exigible, además, una resistencia al fuego que cumpla con normas particulares para reducir el riesgo de propagación hacia los locales contiguos o para los usuarios de la carretera en corredores estrechos. Los dispositivos reductores de ruido de tráfico por carretera no deberían reflejar la luz hasta el punto de perjudicar la seguridad vial. Los materiales que constituyen estos dispositivos no deberían, bajo ningún concepto, emitir humos o líquidos nocivos procedentes de procesos naturales o industriales, o bien provocados por un incendio. Normalmente, estos dispositivos deberían permitir que los usuarios de la carretera puedan salir rápidamente y facilitar así mismo el acceso del personal de seguridad en caso de emergencia.

No se pretende en general, que los dispositivos reductores de ruido resistan los impactos de los vehículos, sin embargo, los proyectistas pueden necesitar información sobre las consecuencias de las cargas derivadas de dichos impactos para poder establecer los requisitos necesarios de protección tanto para los usuarios de la carretera como para los transeúntes.

EN 14388 “Dispositivos de ruido de tráfico en carreteras. Especificaciones”

Esta norma [32] especifica los requisitos de comportamiento y los métodos de evaluación de los dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Estos requisitos son: absorción sonora, aislamiento al ruido aéreo, carga eólica y estática, peso propio, impacto de piedras, seguridad en caso de colisión (seguridad de los ocupantes del vehículo), seguridad en caso de colisión (barrera combinada de seguridad y anti-ruido), carga dinámica por retirada de la nieve, resistencia al fuego causado por incendio de la maleza, peligro de caída de trozos desprendidos, protección del medio ambiente, salidas de emergencia, reflexión de la luz, transparencia, mejora del índice de difracción.

EN 14389 “Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Métodos de evaluación del comportamiento a largo plazo”

- Parte 1: Características acústicas [33]

Los dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras que se instalan a lo largo de las carreteras no sólo deben cumplir con su función acústica y los requisitos de diseño estructural de acuerdo a las normas europeas correspondientes, sino que también deben mantener su comportamiento a lo largo de su vida útil.

Los elementos acústicos tienen que resistir las acciones de los agentes del entorno de las carreteras que puedan degradar su comportamiento.

Las características acústicas de un dispositivo reductor de ruido de tráfico en una carretera pueden deteriorarse significativamente a lo largo de su vida útil, si éste no se instala o mantiene de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, o si los materiales no son los apropiados para el entorno de la carretera.

- Parte 2: Características no acústicas [34]

No sólo conviene que los dispositivos reductores de ruido situados a lo largo de las carreteras desempeñen su función acústica y cumplan los requisitos en materia de diseño estructural de conformidad con las normas europeas correspondientes, sino también que conserven sus prestaciones durante la vida útil requerida. Es necesario que los elementos estructurales conserven coeficientes de seguridad mínimos aceptables al final de su vida útil prevista y que los elementos acústicos no sólo permanezcan estructuralmente eficaces sino también que presenten el comportamiento acústico especificado.

Conviene que todos los elementos de los dispositivos reductores de ruido resistan a la corrosión y a la fragilización, que sus dimensiones sean estables y que, de manera general, tengan una elevada resistencia al envejecimiento en condiciones muy variadas.

2.2.4.2 Propiedades de los materiales empleados tradicionalmente

A continuación se enumeran las características técnicas de una serie de materiales acústicos absorbentes utilizados tradicionalmente en aplicaciones acústicas.

A. Bloques de hormigón acústicos del modelo Soundblox® comercializados por la empresa “Acústica Integral”

Las características de estos bloques se citan a continuación:

- Dimensiones normalizadas: 490 x 190 x 190 mm
- Peso: 16 kg/unidad.
- Resistencia al fuego: RF-180 según DIN EN 1364-1:1999
- Temperatura máxima: 120°C
- Resistencia mecánica: 43 kg/cm²
- Coeficiente de absorción: 0,72 NRC



Figura 2.2.8: Bloques de hormigón Soundblox.

B. Pantallas acústicas de hormigón Climablok, empresa “R. Pan Rodo S.L.”

Estas pantallas se componen de una estructura de hormigón armado de 6 cm de espesor revestida por dos capas (una lisa de 2 cm, y la expuesta al ruido de 15 cm y con textura acanalada vertical) de conglomerado de madera mineralizada y cemento.

En lo referente a la absorción acústica, estas pantallas están disponibles en categoría A2, A3 y A4 según la norma UNE EN-1793-1 [27]. En cuanto a aislamiento



Figura 2.2.9: Pantallas hormigón Climablok.

a ruido aéreo las pantallas se encuadran dentro de la categoría B3 según la clasificación de la norma UNE EN-1793-2 [28].

C. Pantalla Antirruído Hormigón de “Grupo Postigo”

Las características de estas pantallas son:

- Material estructural: hormigón armado, espesor mínimo 80 mm
- Hormigón: HA-25 B122A
- \varnothing máx. 12 mm
- Dimensiones del mallazo: 150 x 150 x 6 mm
- Acero: B500 S
- Superficie absorbente hormigón poroso con gravilla \varnothing 3 – 6 mm, de espesor mínimo de 80 mm y máximo 120 mm.
- Posibilidad de aplicar colorantes al hormigón.
- Posibilidad de aplicar grabados o figuras superficiales.
- Disponemos de otros paneles con geometría estructural y porosa diversa.
- Índice absorción: 5,14 dB (A2) UNE-EN 1793-1 [27].
- Índice aislamiento: 46,00 dB (B3) UNE-EN 1793-2 [28].



Figura 2.2.10: Pantalla acústica hormigón Grupo Postigo.

D. Pantalla Antirruído Metálica de “Grupo Postigo”

Las características de estas pantallas son:

- Materiales: Acero galvanizado y Aluminio (material standard en acero del mm)
- Espesor acero: de 1 a 1,5 mm
- Espesor de recubrimiento del galvanizado en acero: $[275 - 600] \text{gr}/\text{m}^2$
- Relleno fono-absorbente: Lana de roca, densidad $100 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Altura de módulo: 500 mm
- Anchura de módulo: 110 mm
- Longitud de módulo: de 1 m hasta 5 m (long. estándar de 4 m)
- Pintura al horno según color RAL solicitado. Espesor de recubrimiento total sobre el metal, incluida pintura: $e = 80 \mu\text{m}$
- Posibilidad de aplicar tratamiento anti-graffiti
- Superficie perforada $> 32\%$
- Índice absorción: 12 dB (A4) EN 1793-1 [27].
- Índice aislamiento: 27 dB (B3) EN 1793-2 [28].



Figura 2.2.11: Pantalla acústica metálica Grupo Postigo.

E. Pantallas antirruído Pantabel de “Norten PH”

Estas pantallas constan de una placa matriz de hormigón estructural y otra de hormigón poroso de alta calidad absorbente.

Se pueden fabricar en diferentes medidas y colores, adaptándose a las necesidades paisajísticas de cada zona, aunque la medida estándar es de longitud 3,96 m y 2,40 m de altura.



Figura 2.2.12: Pantalla antirruído Pantabel.

Se pueden englobar dentro de la categoría A2 en lo referente a índice global de absorción acústica y dentro de la categoría B3 según el índice global de aislamiento

acústico a ruido aéreo. A continuación se detallan los datos más relevantes:

- Índice de aislamiento acústica (180 mm): 37 dB(A)
- Absorción acústica: 5 dB
- Densidad superficial: 320 kg/m²

F. Pantallas acústicas de hormigón comercializadas por “aistec”

Constan de un panel fonoabsorbente de hormigón tipo AISTEC, compuesto por 11-12 cm de hormigón armado HA-30 con doble mallazo y 8-9 cm de hormigón poroso grecado formado por árido de machaqueo de granulometría 3/6 mm. Peso aproximado 500 Kg/m². En el ámbito acústico quedan clasificadas dentro de las categorías A3 y B2.

Capítulo 3

OBJETIVOS Y ALCANCE

Los objetivos principales de esta investigación son la identificación del potencial de aplicación de escorias negras de horno de arco eléctrico de procesos siderúrgicos como constituyente de materiales acústicos absorbentes aplicables en dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras, así como el reciclado y la reutilización de dichas escorias. Es por este segundo objetivo por el que se intentará utilizar el mayor porcentaje de material posible.

Además, se deben destacar otros objetivos específicos, que son los siguientes:

- Determinar la relación óptima de los constituyentes del hormigón de referencia con el que se comparará el nuevo material desarrollado, equilibrando las propiedades mecánicas con la absorción acústica.
- Analizar y optimizar la proporción de los constituyentes que componen el material de modo que se equilibre la absorción acústica con las propiedades mecánicas.
- Analizar las propiedades físicas, químicas, mecánicas, acústicas y de durabilidad tanto del material de referencia como del nuevo hormigón.
- Determinar el efecto del espesor de la placa en el coeficiente de absorción acústica.
- Exponer posibles soluciones constructivas con el nuevo material de cara al desarrollo de pantallas acústicas.

Finalmente se analizarán los resultados y se extraerán conclusiones sobre la aplicabilidad industrial y viabilidad técnica de los materiales desarrollados, de cara a su uso potencial en dispositivos reductores de ruidos en carreteras.

Capítulo 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

4.1.1 Escorias

Escorias negras procedentes de hornos de arco eléctrico del proceso de producción de materiales férreos. Estas escorias han sido cedidas por la empresa Siderúrgica Sevillana, S.A.



Figura 4.1.1: Escoria negra de acería de horno de arco eléctrico.

4.1.2 Áridos

Es el material granular inerte que se añade al cemento para formar hormigón o mortero.

- Árido fino: árido que pasa por un tamiz de 4,76 mm. Para esta investigación se ha usado arena normalizada [35] (Figura 4.1.2).



Figura 4.1.2: Árido fino empleado.

- Árido grueso: Conocido como grava, es el árido que queda retenido por un tamiz de 4,76 mm (Figura 4.1.3).



Figura 4.1.3: Árido grueso empleado.

4.1.3 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua [36].

Desde el punto de vista químico, el cemento es una mezcla de arcilla, arena y silicatos y aluminatos de calcio obtenidos a través del cocido calcáreo.

Conforme a la norma EN-197-1 [36] el cemento es capaz, cuando se dosifica y mezcla apropiadamente con agua y áridos, de producir un hormigón o un mortero que conserve su trabajabilidad tiempo suficiente y que alcance, al cabo de periodos definidos, los niveles específicos de resistencia y presentar estabilidad a volumen a largo plazo.

En este estudio, para la fabricación de las muestras, se ha empleado cemento Pórtland tipo II, CEM II/B-L 32,5 N de acuerdo con la norma EN 197-1 [36]: 65-79 % clinker, 31-35 % CaCO_3 , 0-0,5 % otros componentes minoritarios. (Figura 4.1.4).



Figura 4.1.4: Cemento tipo II.

4.2 Métodos de caracterización

4.2.1 Caracterización física-química

4.2.1.1 Composición química

Para la determinación de la composición química elemental (elementos mayoritarios y minoritarios) de los materiales se ha utilizado el método descrito en la norma ASTM 3682-78 [37].

Los principales equipos empleados para la realización de estos análisis han sido los siguientes:

- Espectrofotómetro UV/V, GBC, 911.
- Espectrofotómetro de absorción atómica (EAA), Perkin-Elmer 3100.
- pH-metro, Crison micro-pH 2002.
- Horno de mufla.
- Crisoles de platino.
- Agitador magnético en placa calefactora.

El método de ataque por disgregación con tetraborato de litio, y el análisis químico posterior mediante EEA, se muestran en la Figura 4.2.1 en un diagrama esquemático del mismo.

4.2.1.2 Densidad aparente

La densidad es una propiedad básica de los productos absorbentes acústicos, ya que puede afectar a propiedades como la propia absorción acústica o la resistencia a compresión. Esta propiedad se han medido según indica la norma ASTM E 605-77 [38], en la que se han introducido pequeñas variaciones con objeto de que la realización de la misma sea más sencilla.

Los materiales necesarios para la determinación de la densidad son los siguientes:

- Pie de rey;
- Balanza con la suficiente capacidad y sensibilidad para pesar la muestra con una precisión de al menos un 1 % del peso de la muestra.

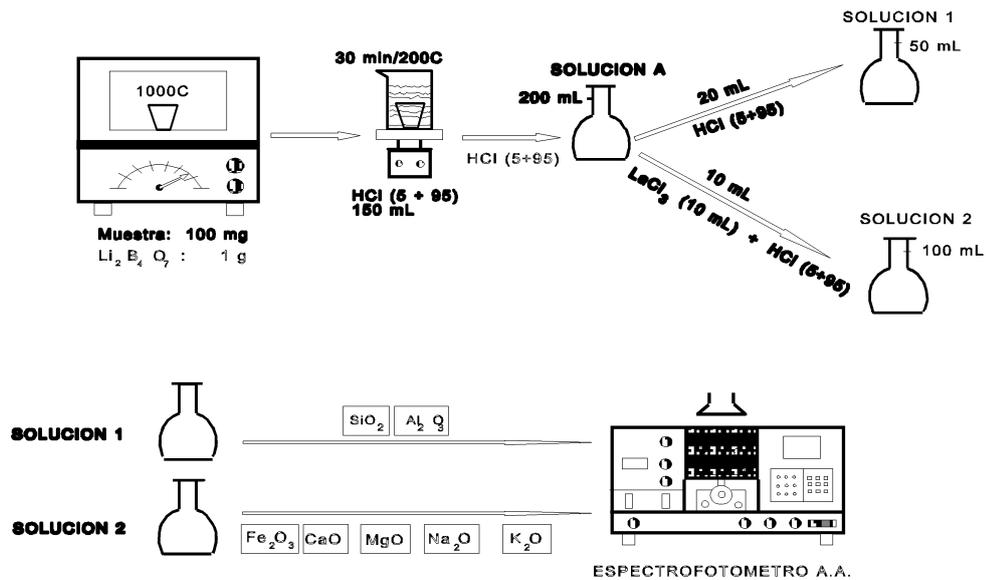


Figura 4.2.1: Diagrama esquemático del método de disgregación basado en la norma ASTM 3682-78.

Las medidas se han realizado siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

1. En primer lugar, con el pie de rey, se realizarán varias medidas del diámetro de la probeta. Nos quedaremos con el valor medio.
2. A continuación repetimos el proceso pero con la altura de la probeta (esta tiene forma cilíndrica). Tomaremos el valor medio.
3. Finalmente se pesará la probeta en la balanza.

La densidad se calculará con la fórmula que se detalla a continuación:

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (4.2.1)$$

Siendo,

- ρ la densidad aparente (kg/m^3)
- W el peso del material seco (kg)
- V el volumen aparente de la muestra (m^3)

4.2.1.3 Porosidad abierta

La porosidad abierta es un parámetro de suma importancia ya que está íntimamente ligado a la absorción acústica del material. Para la determinación de la porosidad abierta se ha seguido el método descrito en la normativa EN 1936 [39].

Los equipos necesarios para la determinación de la porosidad abierta son:

- Un recipiente de vacío que pueda mantener una presión de $(2,0 \pm 0,7)$ kPa = (15 ± 5) mmHg y que permita una inmersión gradual de las probetas contenidas.
- Una balanza con una precisión mínima de 0,01 % de la masa a pesar.

El procedimiento utilizado para la realización de esta medida es el siguiente:

1. Se pesa cada probeta (m_s) y, a continuación, se colocan en un recipiente de vacío y se disminuye gradualmente la presión hasta $(2,0 \pm 0,7)$ kPa = (15 ± 5) mmHg.
2. Se mantiene esta presión durante $(2 \pm 0,2)$ h para eliminar el aire contenido en los poros abiertos de las probetas.
3. Introducir lentamente agua desmineralizada a $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ en el recipiente de vacío (la velocidad a la que el agua sube debe ser tal que las probetas queden completamente sumergidas, como mínimo en 15 min).
4. Se mantiene la presión de $(2,0 \pm 0,7)$ kPa durante la introducción del agua.
5. Cuando todas las probetas estén sumergidas, se restablece la presión atmosférica en el recipiente de presión y se dejan las probetas bajo el agua otras (24 ± 2) h a presión atmosférica.
6. A continuación se seca rápidamente la probeta con un trapo húmedo y se determina la masa de la probeta saturada con agua (m_h).

La porosidad abierta se calcula por medio de la relación (en porcentaje) entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente de la probeta, con la ecuación:

$$\varepsilon_o = \frac{(m_h - m_s)/\rho}{V} \quad (4.2.2)$$

Siendo ρ (kg/m³) la densidad del agua a la temperatura de operación y V (m³) el volumen aparente de la probeta.

4.2.1.4 Humedad

La humedad se ha determinado de acuerdo con norma estándar Europea EN 12859 (2011) [40]. En primer lugar se mide la masa de la probeta en las condiciones ambientales (M1), a continuación se mide la masa de la probeta después de secarse a 105 °C y alcanzarse masa constante (M2). El valor de humedad (H) se calcula como:

$$H(\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \cdot 100 \quad (4.2.3)$$

4.2.1.5 Gravedad específica

La medida de la gravedad específica se ha realizado según el estándar Europeo EN 1097-7 (2009) [41] de determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los áridos. Se ha seguido el procedimiento del picnómetro.

4.2.1.6 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica se ha obtenido con una torre de tamices de luz: 15 mm, 9 mm, 7,1 mm, 5 mm, 4 mm, 2,5 mm, 1,25 mm y 0,25 mm. Se procede pesando en primer lugar el tamiz vacío (m_{tv}) y volviendo a pesarlo una vez se haya tamizado el material (m_f). Por diferencia de pesada se obtiene el porcentaje del material retenido por cada luz de malla ($\%_{RETENIDO_i}$):

$$\%_{RETENIDO_i} = \frac{(m_f - m_{tv})}{m_t} \cdot 100 \quad (4.2.4)$$

Donde m_t es la masa total del material tamizado.

4.2.1.7 Estabilidad volumétrica

La estabilidad a volumen se ha medido siguiendo la norma estándar Europea EN 196-3 (2009) [42], usando el equipo de Le Chatelier descrito en la norma.

4.2.2 Propiedades mecánicas

4.2.2.1 Resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión (R_C) de las muestras se han realizado con cilindros de 40 mm de altura y 35 mm de diámetro. La máquina de compresión usada, marca Suzpecar, modelo MEM-102/50t (Figura 4.2.2), es capaz de ejercer una fuerza proporcional a las resistencias que se van a medir, disponiendo de dos células de carga: una de 5000 kg para cargas pequeñas y otra de 50000 kg para cargas más grandes. Para la célula de carga de 5000 kg la carga mínima es de 10 kg. El equipo posee, además, un dispositivo automático para la regulación de la velocidad de carga y desplazamiento.

La resistencia a la compresión se ha medido, en la medida que ha sido posible, según el procedimiento indicado en la norma ASTM E 761-86 [43]. Esta norma establece que la resistencia a la compresión se determinará mediante la aplicación de una fuerza de compresión normal a la superficie de la muestra, midiendo la tensión aplicada al 10 % de deformación, o cuando ocurra la rotura del material, si esta tiene lugar antes de alcanzar dicha deformación.

La medida se ha realizado según el procedimiento siguiente:

1. El espesor inicial de la muestra para medir la deformación será la distancia entre la cabeza de la máquina y la placa de acero después de aplicar una carga inicial de 0,7 kPa.
2. A continuación se comprime la muestra hasta un 10 % de deformación, o hasta que se alcance la carga final. La velocidad de movimiento de la cabeza de la



Figura 4.2.2: Equipo usado en la determinación de la resistencia a compresión.

máquina no ha de ser mayor de $1,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

3. Una vez finalizado el ensayo se anotará la fuerza de compresión y el modo de fallo, en caso de que este ocurra.

La resistencia a compresión se mide de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_C = \frac{F}{S} \cdot 10^{-6} \quad (4.2.5)$$

Siendo,

- R_C = Resistencia a compresión [MPa]
- F = Carga aplicada [kg]
- S = Superficie de la probeta [m^2]

4.2.3 Propiedades acústicas

4.2.3.1 Coeficiente de absorción acústica

El coeficiente de absorción acústica (α_n) expresa la energía acústica absorbida por la superficie de un material respecto a la energía acústica incidente.

Para la obtención del coeficiente de absorción acústica se ha empleado el método del tubo de impedancia, siguiendo las especificaciones que se indican en las normas EN 10534-2 [44] y ASTM E1050 [45]. Para ello se ha empleado el sistema ACUPRO implementado por “Spectronics Inc.”, con dos micrófonos y un equipo amplificador de señal SAMSON. En la Figura 4.2.3 se muestra un esquema del dispositivo utilizado.

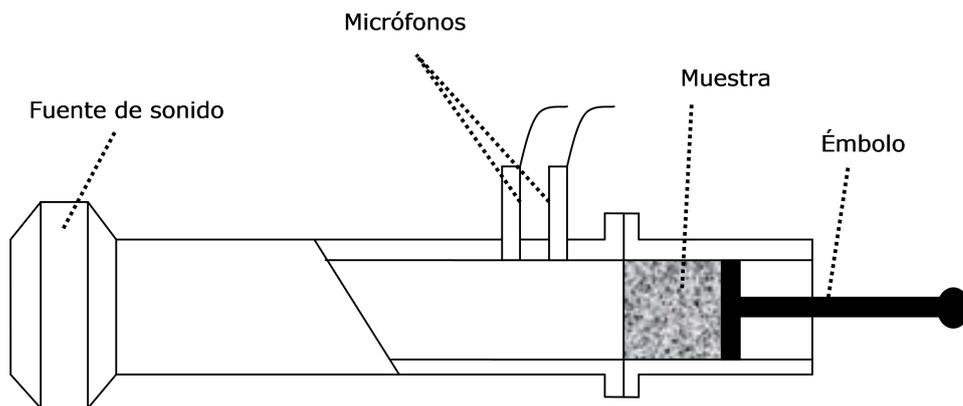


Figura 4.2.3: Esquema tubo Kundt.

A. Fundamentos teóricos del tubo Kundt

La muestra de ensayo se monta en uno de los extremos del tubo de impedancia, que debe ser recto, rígido y estanco. Mediante una fuente sonora, se generan ondas planas en su interior y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra. Posteriormente se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa después para calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal, y la impedancia normalizada del material ensayado.

Las magnitudes determinadas son función de la frecuencia, con una resolución en frecuencia condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de la señal

del sistema digital de análisis de frecuencia usado para las mediciones. El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones de los micrófonos.

Existen dos técnicas para la realización de las mediciones:

- Método de los dos micrófonos: se usan dos micrófonos en posiciones fijas.
- Método de un micrófono: un único micrófono en dos posiciones distintas.

El método de medición se basa en el hecho de que el coeficiente de reflexión acústica para incidencia normal puede ser determinado a partir de la función de transferencia H_{12} entre dos posiciones de micrófono frente al material ensayado.

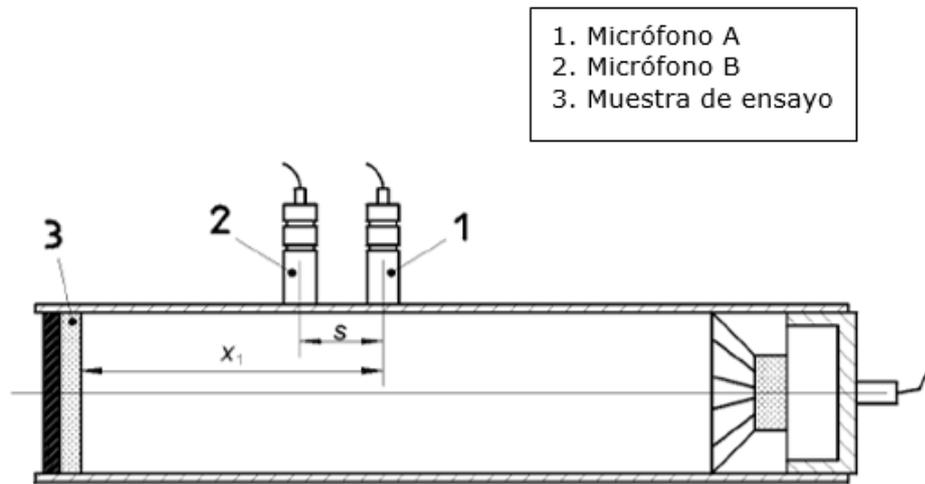


Figura 4.2.4: Posiciones de micrófonos y distancias en el tubo de impedancia.

Las presiones acústicas de la onda incidente (p_I) y reflejada (p_R) son, respectivamente:

$$p_I = p_I e^{jk_0 x} \qquad p_R = p_R e^{-jk_0 x} \qquad (4.2.6)$$

Donde,

p_I y p_R son los módulos de p_I y p_R en el plano de referencia ($x=0$, normalmente la superficie de las muestras planas de ensayo).

$k_o = k'_o - jk''_o$, es el número de onda complejo.

$k'_o = 2\pi/\lambda_o$, es la componente real.

λ_o , longitud de onda.

k''_o es la componente imaginaria, que es la constante de atenuación lineal en nepers por metro.

Las presiones acústicas p_1 y p_2 en las dos posiciones de micrófono son:

$$p_1 = p_I e^{jk_o x_1} + p_R e^{-jk_o x_1} \qquad p_2 = p_I e^{jk_o x_2} + p_R e^{-jk_o x_2} \qquad (4.2.7)$$

La función de transferencia para la onda incidente H_I es:

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_o(x_1-x_2)} = e^{-jk_o s} \qquad (4.2.8)$$

Donde s es la separación entre los micrófonos.

Del mismo modo la función de transferencia para la onda reflejada H_R es:

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_o(x_1-x_2)} = e^{jk_o s} \qquad (4.2.9)$$

La función de transferencia desde la posición del micrófono uno a la dos, H_{12} , para el campo acústico total se puede obtener a partir de las ecuaciones (4.2.6), teniendo en cuenta que $\hat{p}_R = r\hat{p}_I$ (donde r es el coeficiente de reflexión acústica para incidencia normal):

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_o x_2} + r e^{-jk_o x_2}}{e^{jk_o x_1} + r e^{-jk_o x_1}} \quad (4.2.10)$$

Despejando r de la ecuación (4.2.9) y usando las ecuaciones (4.2.7) y (4.2.8) se obtiene:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_o x_1} \quad (4.2.11)$$

Así, el coeficiente de reflexión r en el plano de referencia ($x=0$) puede determinarse a partir de las funciones de transferencia, de la distancia x_1 y del número de onda k_o que debe incluir la constante de atenuación del tubo k_o'' .

Una vez conocido el coeficiente de reflexión se puede determinar el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal (α) y la impedancia acústica específica ($Z/\rho c_o$):

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (4.2.12)$$

$$\frac{Z}{\rho c_o} = \frac{1 + r}{1 - r} \quad (4.2.13)$$

B. Fundamentos operacionales

Las muestras utilizadas para la determinación del coeficiente de absorción acústica de un material son probetas cilíndricas de 35 mm de diámetro y 40 mm de altura. El rango de frecuencias de medida ha sido 50-5000 Hz. El montaje de la muestra se ha realizado de modo que el ajuste es perfecto entre la probeta y el tubo.

El procedimiento de medida seguido se muestra a continuación:

1. En primer lugar, tras encender el equipo, se procede a la estabilización del mismo durante aproximadamente 15-20 min.

2. Se introduce la probeta en el porta-muestras de tubo, de forma que la probeta no sobresalga del mismo y que el ajuste entre ambos sea perfecto.
3. Una vez insertada la probeta, se une el porta-muestras al tubo de impedancia.
4. Se procede al inicio del ensayo a través del software habilitado en el soporte informático.
5. Realizado el ensayo se obtienen los valores del coeficiente de absorción del material para el rango de frecuencias características del tubo (50-5000 Hz).

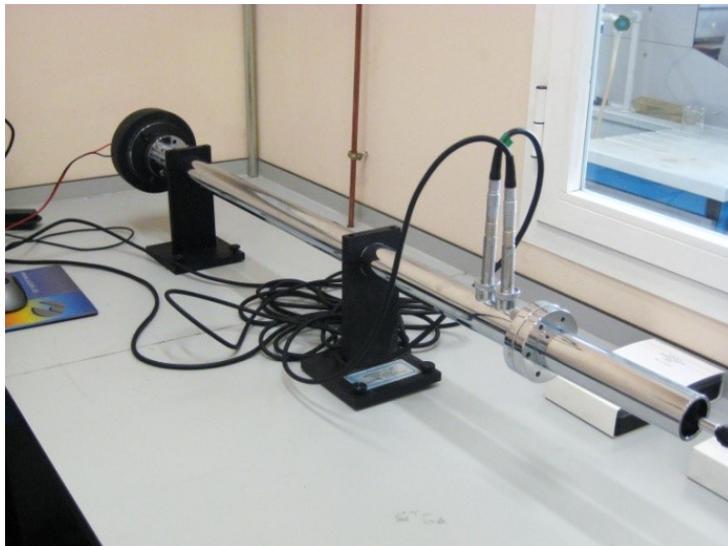


Figura 4.2.5: Tubo de impedancia acústica.

4.2.3.2 Coeficiente de reducción de ruido (NRC)

El coeficiente de reducción de ruido (NRC) es un descriptor de un solo número para los coeficientes de absorción acústica de incidencia aleatoria. Se define en la norma ASTM C 423-90 [?] como la media aritmética redondeada al múltiplo más próximo de 0,05 de los coeficientes de absorción acústica, medidos en las cuatro frecuencias de centro de banda de un tercio de octava de 250, 500, 1000 y 2000 Hz.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (4.2.14)$$

4.2.4 Ensayos de durabilidad

4.2.4.1 Absorción de agua por inmersión total

La absorción de agua por inmersión total (W_{IT}) se ha determinado siguiendo el procedimiento sugerido en la norma EN 12087 (1997) [46]. Se ha calculado como la ganancia de peso de una muestra que ha sido sumergida completamente en agua durante 28 días.

$$W_{IT}(\%) = \frac{m_{28} - m_o}{V} \cdot \frac{100}{\rho_w} \quad (4.2.15)$$

Donde m_o es el peso inicial de la probeta, m_{28} es el peso después de 28 días de inmersión, V es el volumen de la muestra y ρ_w es la densidad del agua.

4.2.4.2 Ataque ácido

La resistencia al ataque ácido (R_A) se ha determinado siguiendo el procedimiento detallado en Cerulli et Al., 2003 [47]. Después de curar las muestras durante 28 días, algunas se sumergen en agua (muestras de referencia) y otras en una solución de ácido sulfúrico 1 N. Después de 14 días, se mide la resistencia a compresión residual de las muestras corroídas, comparándolas con la resistencia de las muestras de referencia, como indica la expresión:

$$R_A = \frac{CS_{ACID}}{CS_{WATER}} \quad (4.2.16)$$

Donde CS_{ACID} es la resistencia a compresión de la muestra sumergida en ácido y CS_{WATER} , la resistencia a compresión de la muestra sumergida en agua.

4.2.4.3 Resistencia al agua de mar

La metodología elegida ha sido la seguida en la Tesis Doctoral desarrollada por L. A. de Lima (1999) [48]. Las probetas se han sumergido completamente en agua de mar durante 56 días, después de 28 días de curación. Se ha observado la evolución de su resistencia a compresión midiéndola a los 7, 14, 28 y 56 días.

4.2.4.4 Ciclos de hielo/deshielo

La resistencia a ciclos de hielo/deshielo se ha determinado de acuerdo a UNE-CEN/TS 12390-9 EX (2008) [49]. Cada ciclo de 48 horas varía entre -18 ± 3 °C(24 h) y 20 ± 2 °C(24 h).

4.2.4.5 Resistencia a ciclos térmicos

La resistencia a ciclos térmicos entre 105 °C y temperatura ambiente (22 °C) como muestra la Figura 4.2.6. Cada ciclo consta de 48 horas, 24 horas a alta temperatura y 24 en las condiciones del laboratorio. La degradación de las probetas se mide mediante su resistencia a compresión.

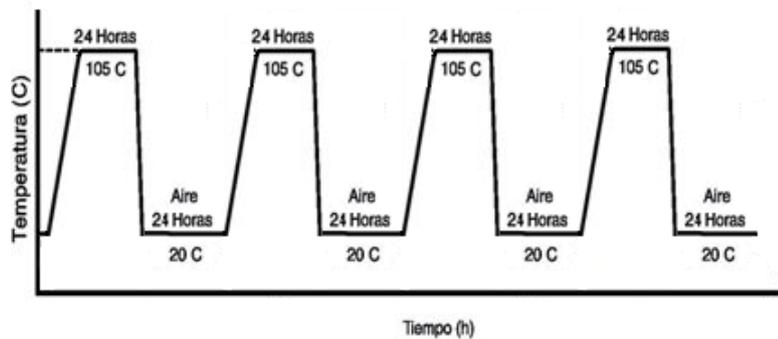


Figura 4.2.6: Esquema ciclos térmicos.

4.3 Fabricación de probetas

La elaboración de los productos descritos en este proyecto requiere que los materiales que los conforman sean dosificados, mezclados, amasados y conformados.

Los materiales empleados no han necesitado un acondicionamiento específico, ya que las distintas partidas se pudieron utilizar en el proceso de fabricación tal y como se recibieron, al no presentar ni objetos ni otros materiales extraños. Simplemente se sometieron a un proceso previo de tamizado para eliminar aquellas partículas mayores de 9 mm, ya que estas suponían un problema a la hora de rellenar los moldes descritos a continuación. En el caso de querer llevar este proyecto a una mayor escala no sería necesario eliminar los materiales de escoria de mayor tamaño. De igual modo, el material recibido se subdividió en dos conjuntos: aquellas partículas mayores de 2,5 mm, parte gruesa del material, y aquellas menores de 2,5 mm, parte fina del material. Los pasos seguidos con ambos conjuntos han sido los mismo.

Para llevar a cabo este estudio se han fabricado probetas cilíndricas ($d=3,33$ cm; $h=4$ cm) y cúbicas ($l=10$ cm), según los requerimientos de los diferentes ensayos realizados. Los procesos de fabricación de las distintas probetas presentan numerosas similitudes, será la preparación del molde en los que difieran las metodologías. A continuación se describe el proceso de fabricación general:

1. En primer lugar, se pesan los componentes para obtener las proporciones fijadas de cada uno de ellos en el producto final a elaborar.
2. Es importante que el molde donde va a ser vertida la masa sea impregnada con un material desencofrante.
3. El molde debe colocarse en una superficie plana y fija, y a la que se tenga fácil acceso como mesa de trabajo.
4. La proporción de agua a añadir a la masa sólida seca será variable según los componentes del producto que se estén tratando, dado que existen diferencias con respecto a la cantidad de agua requerida para que la pasta alcance su consistencia óptima.

4. Materiales y métodos

5. El proceso de mezclado de sólido y agua se realiza durante un tiempo suficiente para que todos los componentes se mezclen perfectamente, alcanzándose finalmente una pasta homogénea.
6. A continuación se procede al vertido de la pasta en los moldes, de modo que se consiga una distribución uniforme.
7. La cara de la pieza expuesta al ambiente es necesario alisarla con ayuda de un palaustre.
8. El desmoldado se realiza 48 h después, prestando atención a que el producto no endurezca demasiado, ya que podría provocar dificultades en el momento del desmolde.
9. Una vez desmoldadas las probetas se necesitan 28 días de fraguado para que estén listas para someterlas a los distintos ensayos. Durante este tiempo de fraguado, las probetas deben mantenerse hidratadas, con el fin de que adquieran mejores propiedades mecánicas. Para ello se introducen en una cámara de saturación durante 21 días, y luego se sacan para que estabilicen su peso y humedad.

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de los materiales de partida

Para el desarrollo de esta investigación se han utilizado escorias negras de hornos de arco eléctrico procedentes de Siderúrgica Sevillana S.A. (Alcalá de Guadaíra, Sevilla), cemento Pórtland tipo II y, además, para la fabricación de un hormigón poroso estándar se ha empleado grava.

La composición química de la escoria negra utilizada en este proyecto se muestra a continuación (Tablas 5.1.1 y 5.1.2):

(%)	Al	Ba	Ca	Cl	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn
	6,48	0,16	21,09	0,03	1,06	0,05	15,20	0,02	1,01	4,90
(%)	Na	Nb	O	P	S	Si	Sr	Ti	Zn	TOTAL
	0,09	0,03	41,48	0,18	0,09	7,60	0,07	0,43	0,02	100,00

Tabla 5.1.1: Composición química por elementos.

Componentes Mayoritarios (%)		Elementos trazas (%)	
Al_2O_3	13,42	Ba	0,14
CaO	32,36	Cl	0,03
Cr_2O_3	1,67	Cu	0,05
Fe_2O_3	23,86	K_2O	0,03
MgO	1,84	Na_2O	0,26
MnO	6,94	Nb	0,03
P_2O_6	0,50	S	0,10
SiO_2	17,85	Sr	0,08
TiO_2	0,79	Zn	0,02

Tabla 5.1.2: Composición química por compuestos.

Los óxidos CaO , Fe_2O_3 y SiO_2 son los componentes mayoritarios en esta escoria, suponiendo más del 70 % de la composición química total.

El contenido de CaO en escorias analizadas en nuestro país oscila en general entre el 23 % y 32 %. En la bibliografía internacional se han referido contenidos típicos de CaO sensiblemente mayores [50]. Como refleja la Tabla 5.1.2, el contenido de CaO se encuentra dentro de los valores esperados.

Debido a la presencia de óxidos de cal y magnesio (limitado al 4 %) en su composición, las escorias negras de acería tienen naturaleza expansiva. La cal libre

se hidrata rápidamente y puede originar grandes cambios de volumen en pocas semanas, mientras que la hidratación del magnesio se produce mucho más lentamente.

Por ello, antes de su utilización, es aconsejable realizar un ensayo de expansión volumétrica, con el fin de comprobar que las escorias no van a sufrir ningún problema técnico debido a la presencia de cal libre y/o magnesia libre. El ensayo propuesto para determinar la estabilidad volumétrica es el descrito en el Apartado 4.2.1.7.

Además, los álcalis, representados por Na_2O , tienen un límite superior por su tendencia a la formación de grumos. El contenido de Na_2O debe ser menor al 5 % y las escorias cumplen con la restricción [22].

Por otro lado, el contenido en azufre máximo según la Norma EN 12620 [51] debe ser inferior a un 2 % para escorias no de alto horno enfriadas por aire. El contenido de azufre de la escoria objeto de este estudio está muy por debajo del 2 % como se refleja en la Tabla 5.1.2. Esto limita el riesgo de expansión por sulfato [7].

Para cloruros solubles en agua, no existe un valor máximo para los áridos [7]. Todos los valores de medición cumplen los requisitos de la norma EN 12620 [51] estándar para el uso como áridos para hormigones. Además el contenido en cloruros solubles en agua es muy bajo, lo que reduce el riesgo de daños debido a un hormigón en mal estado y la corrosión de aceros.

A continuación se presenta la gravedad específica de los materiales usados en este estudio (Tabla 5.1.3). Respecto a esta, es la escoria la que mayor valor alcanza. Para la elaboración del material acústico absorbente, se procede a sustituir la grava del hormigón poroso estándar por escoria, de mayor gravedad específica que la grava.

Gravedad específica (g/cm^3)			
Árido Fino	Árido Grueso	Escoria Negra	Cemento
2,69	2,48	3,50	3,18

Tabla 5.1.3: Gravedad específica de los materiales.

Por otro lado, se ha determinado la distribución granulométrica de los áridos gruesos con los que se van a elaborar tanto el hormigón poroso estándar como el material acústico absorbente. En la Figura 5.1.1 se presentan las distribuciones granulométricas acumuladas:

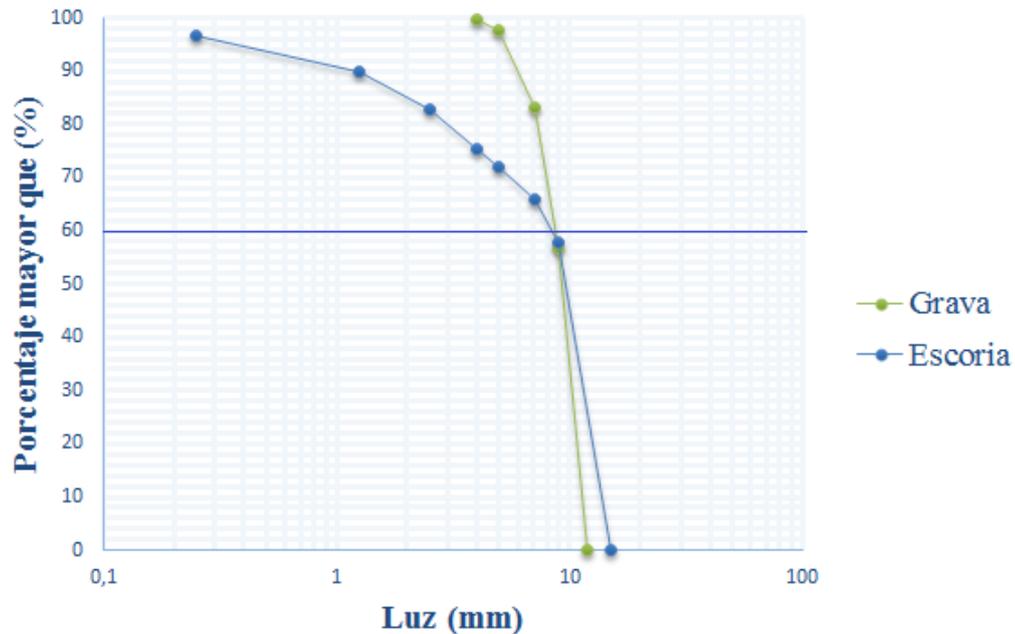


Figura 5.1.1: Distribución granulométrica de la grava y la escoria empleadas.

Tras el análisis de la Figura 5.1.1, se puede comprobar cómo el contenido en partículas de menor tamaño es mayor en el caso de las escorias, y en general, la grava presenta una mayor proporción de partículas de mayor tamaño que las escorias.

En la Figura 5.1.1 se presenta, además, el D60, definido como la luz de malla en la cual queda retenido el 60% del material una vez se han retirado aquellas partículas que causan un problema tecnológico a la hora de elaborar las probetas de ensayo (material que no pasa por un tamiz de luz 9 mm). El D60 alcanza un valor de **7,1 mm** para el caso de la grava y **2,5 mm** para la escoria. Éste D60 marcará la frontera entre lo que se considerará en el resto de la investigación como gruesos ($dp > 2,5$ mm) y finos ($dp < 2,5$ mm) de las escorias.

El motivo por el que se ha tomado la luz de malla en el que queda retenido el 60 % del material y no cualquier otro porcentaje tiene que ver con el espesor de la barrera acústica donde se produce la mayor absorción de las ondas acústicas de menor frecuencia. De acuerdo con la literatura [52], a frecuencias bajas y en el último tercio de espesor del producto, la velocidad de la onda de sonido dentro de la capa porosa es muy baja. Como resultado, la pérdida de energía por la fricción es mínima tanto si tiene capa reflectante o como si no. Por este motivo, la solución constructiva ha sido elaborar pantallas acústicas que por cada 2/3 de parte absorbente (parte gruesa del material) se disponga de 1/3 que mejoren sus propiedades mecánicas (árido fino).

5.2 Estudio de un hormigón poroso estándar

El objetivo de este estudio previo es el de fijar la proporción óptima de árido grueso/árido fino en el hormigón poroso, manteniendo aproximadamente constante la proporción áridos/cemento. Además, una vez obtenida esta proporción, se estudiará como influye la variación del contenido de agua. El óptimo se elegirá teniendo en cuenta que se quiere que el producto final tenga las mejores propiedades de absorción acústica y, además, una buena resistencia mecánica con el fin ser utilizado como material de referencia en el desarrollo de hormigones con materiales reciclados.

5.2.1 Estudio de la relación entre árido grueso y árido fino en hormigones estándar

La primera fase de la investigación llevada a cabo ha consistido en el desarrollo de un estudio de un hormigón poroso estándar. El hormigón poroso se conforma eliminando paulatinamente el árido fino (arena) del hormigón estándar, de forma que se desarrolla una matriz con poros abiertos a base de materiales tradicionales, como son el cemento y la grava.

De este modo se han medido propiedades físicas y mecánicas de las distintas probetas. En la Tabla 5.2.1 se muestran la composición de las probetas, la proporción de agua añadida y la nomenclatura utilizada. Cabe destacar que a priori la proporción de agua se mantuvo constante, siendo este el objeto de estudio del siguiente apartado.

Hormigón	H30	H50	H65	H80	H85
Grava (%)	30	50	65	80	85
Arena (%)	50	30	15	0	0
Cemento (%)	20	20	20	20	15
Agua (% agua/cemento)	45	45	45	45	45

Tabla 5.2.1: Composición de las probetas de hormigón estándar.

5.2.1.1 Densidad aparente

La densidad aparente de las probetas a temperatura ambiente se ha determinado por la medida del peso y el volumen de las mismas, tal y como se ha descrito en

el apartado 4.2.1.2. La Figura 5.2.1 recoge la variación de la densidad aparente de los productos conforme la proporción de grava en ellos va aumentando.

En el análisis de la Figura 5.2.1 se puede observar como la variación de densidad no es significativa en las primeras composiciones. Esto se debe a que el volumen de huecos en las probetas H30 Y H50 es inexistente. En las probetas siguientes comienzan a aparecer huecos y su densidad aparente, como cabe esperar, va disminuyendo paulatinamente.

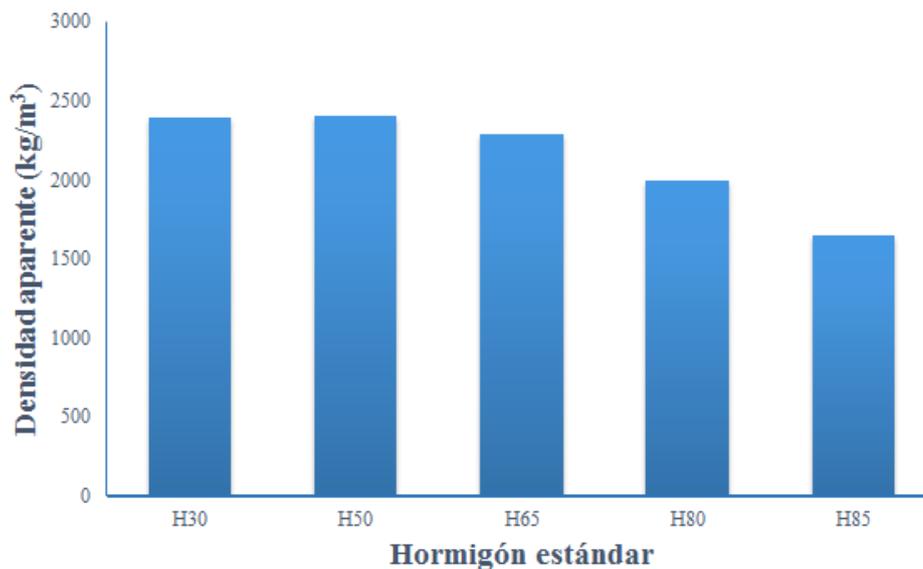


Figura 5.2.1: Variación de la densidad aparente con la relación de áridos de hormigones estándar.

5.2.1.2 Resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión se han realizado según el procedimiento descrito en el apartado 4.2.2.1. La variación de la resistencia a compresión con los diferentes ratios árido grueso/árido fino se muestra en la Figura 5.2.2. Estos valores de resistencia han sido medidos después de 28 días de curación de las muestras.

Inicialmente la resistencia a compresión aumenta ya que nos encontramos en la transición entre un material que, debido a su bajo contenido en árido grueso, lo podríamos clasificar como mortero y otro material que marca el inicio de los hormigones estándar estudiados [53]. A continuación, la resistencia a compresión de los productos de hormigón estándar disminuye conforme el contenido de grava

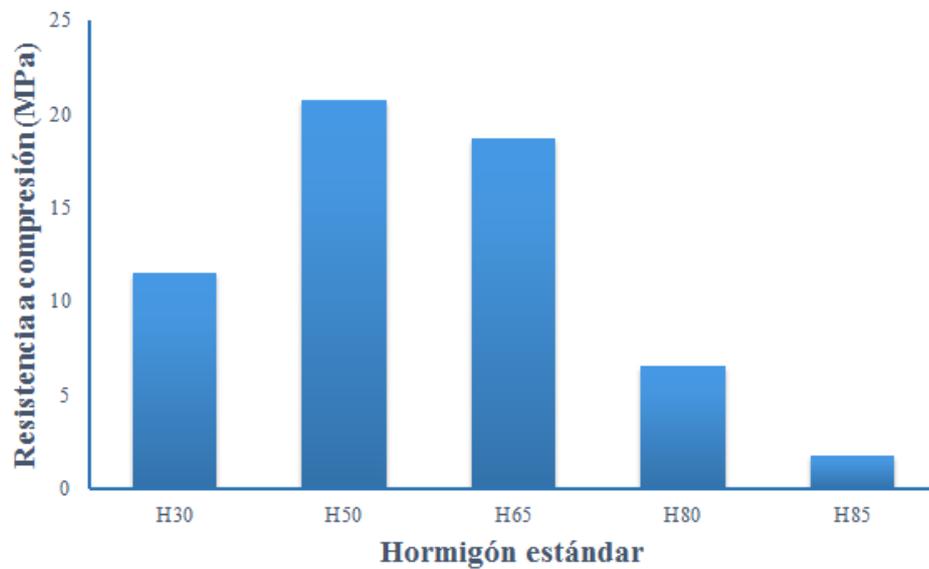


Figura 5.2.2: Variación de la resistencia a compresión con la relación de áridos de hormigones estándar.

es mayor. Esto es debido a que la matriz porosa que se va generando al aumentar la proporción de grava añadida provoca que la cohesión entre las partículas sea más débil, resistiendo menos a los esfuerzos de compresión [54]. Este resultado concuerda con la tendencia observada en los valores de densidad aparente, que también disminuyen. El mayor salto en la disminución de la resistencia a compresión se produce en el paso de un 65 % a un 80 % de contenido en grava.

Finalmente se ha optado por comenzar la investigación con un hormigón H80 (80 % de árido grueso) ya que, entre las probetas que muestran poros bien definidos a simple vista (H80 y H85), es el de mayor resistencia a compresión (Figura 5.2.3).



Figura 5.2.3: Probeta H80 seleccionada.

5.2.2 Estudio del ratio agua/cemento en hormigones porosos estándar

A continuación, una vez elegido el hormigón poroso estándar H80 como material de partida, se ha llevado a cabo el estudio del porcentaje óptimo de agua que añadirle a la mezcla. La adicción de agua proporciona unos poros bien definidos además de reaccionar con el material aglomerante para que cumpla su función. Sin embargo, un exceso de ésta debilitaría considerablemente la muestra provocando la disminución de su resistencia a compresión [53]. La composición de los hormigones porosos estándar ensayados se presenta en la Tabla 5.2.2:

Hormigón	Agua (%)	Grava (%)	Cemento (%)
H80W30	30	80	20
H80W35	35	80	20
H80W40	40	80	20
H80W45	45	80	20
H80W50	50	80	20
H80W60	60	80	20

Tabla 5.2.2: Composición de hormigones porosos estándar.

5.2.2.1 Densidad aparente

Si analizamos la Figura 5.2.4 se puede observar como la densidad aparente de las probetas va aumentando inicialmente con la proporción de agua.

Esto ocurre porque el aglomerante (cemento en este caso) reacciona con el agua incorporada y ésta pasa a formar parte de la mezcla. En las muestras con menor porcentaje de agua se observa como la mezcla de los componentes está excesivamente seca, lo que indica que no todo el cemento ha reaccionado [55].

La muestra H80W45 presenta un máximo en la densidad aparente a partir del cual la densidad comienza a descender ligeramente. Llegados a este punto todo el cemento ha reaccionado y el agua ejerce un papel limpiador de los poros, arrastrando una pequeña parte de material de la probeta [55].

5.2.2.2 Resistencia a compresión

Al igual que ocurre con la densidad, la variación de la resistencia a compresión presenta un máximo en la composición de la muestra H80W45. Por el mismo

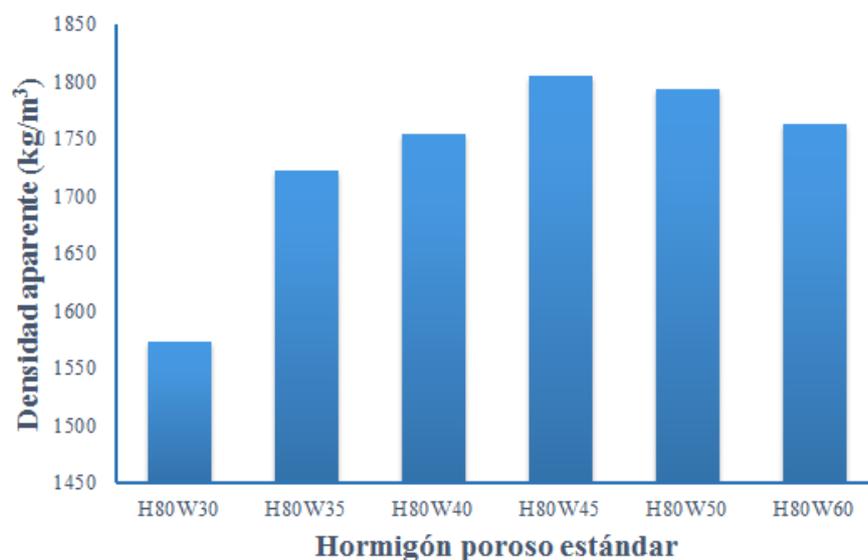


Figura 5.2.4: Variación de la densidad aparente con la relación de agua/cemento.

motivo, la resistencia a compresión va aumentando a medida que mayor parte del cemento va reaccionando. Una vez alcanzada la máxima resistencia, el agua pasa a tener un efecto debilitador en la mezcla y, en consecuencia, la resistencia a compresión disminuye [55]. Estos efectos se ven claramente en la Figura 5.2.5.

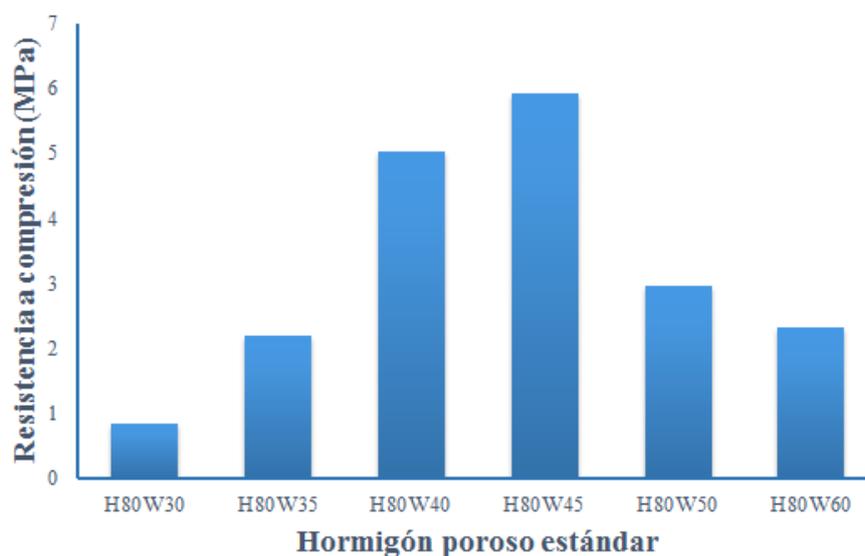


Figura 5.2.5: Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/cemento.

5.2.3 Composición óptima

Finalmente, atendiendo a los criterios de conseguir un material poroso pero con la mayor fuerza a compresión posible, la composición óptima definitiva es la que se muestra en la Tabla 5.2.3:

H80W45	
Densidad aparente	Resistencia a compresión
1804 kg/m ³	5,91 MPa

Tabla 5.2.3: Resumen de las propiedades de H80W45.

El producto de hormigón poroso estándar con esta composición elegida se utilizará como producto de referencia para las comparaciones en el estudio del desarrollo de un material acústico absorbente a base de escorias negras.

5.3 Desarrollo de un material acústico absorbente a base de escorias negras y cemento

Del estudio previo sobre un hormigón poroso a base de materiales tradicionales se pudo concluir que la proporción óptima de árido grueso en el producto final alcanza el 80 %, de modo que las propiedades de absorción acústica son elevadas y presenta una resistencia mecánica por encima de unos valores mínimos que permitan su puesta en obra y funcionalidad.

Partiendo de este 80 % de árido grueso, se ha desarrollado un material a base de escorias al que, inicialmente, se le ha estudiado la variación de sus propiedades con diferentes ratios agua-cemento y diferentes cortes de diámetros de partícula. Una vez hayada la composición óptima desde un punto de vista acústico y mecánico, se ha procedido a la caracterización completa del material, incluyendo propiedades físicas, mecánicas, acústicas y de durabilidad.

5.3.1 Estudio de la relación agua/cemento del material a base de escorias

Para el estudio del desarrollo de un material acústico absorbente a base de escorias negras, en primer lugar se ha procedido a la sustitución de la grava por escoria, para conformar el nuevo material. Se ha estudiado la variación de las propiedades físicas, mecánicas y acústicas de los productos conformados con diferentes proporciones agua/cemento, buscando la óptima. En las Tablas 5.3.1 y 5.3.2 se muestra un resumen de las composiciones estudiadas.

Escorias	E80W40G	E80W50G	E80W60G
Escorias (%)	80	80	80
Cemento (%)	20	20	20
Agua (% w/c)	40	50	60

Tabla 5.3.1: Composición de las probetas compuestas por la fracción gruesa ($dp > 2,5$ mm) del material.

Escorias	E80W40F	E80W50F	E80W60F
Escorias (%)	80	80	80
Cemento (%)	20	20	20
Agua (% w/c)	40	50	60

Tabla 5.3.2: Composición de las probetas compuestas por la fracción fina ($dp < 2,5$ mm) del material.

5.3.1.1 Propiedades físicas

Densidad aparente

En la Figura 5.3.1 se muestra la variación de la densidad aparente de los materiales elaborados con la relación agua/cemento. Se puede comprobar que a medida que el porcentaje de agua es mayor la densidad no varía prácticamente. Sin embargo, si comparamos la densidad de los materiales compuestos por la fracción fina y la fracción gruesa, se observa que la densidad del material con finos es mayor. Esto se debe a las probetas con finos son más compactas y no muestran huecos, mientras que las probetas con gruesos son bastante más porosas (como se muestra en el apartado 5.3.1.3).

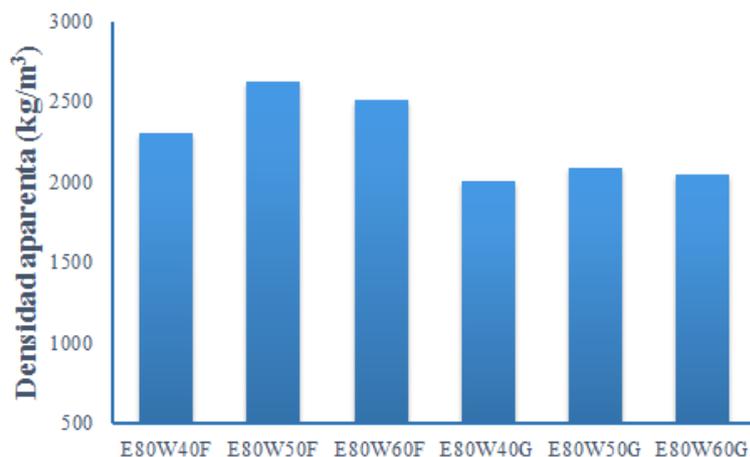


Figura 5.3.1: Variación de la densidad aparente con la relación de agua/cemento.

Porosidad abierta

Si se analiza la Figura 5.3.2 se puede comprobar la significativa diferencia de porosidad entre el material con la fracción fina y el material con la fracción gruesa. El mayor tamaño de las partículas gruesas impiden que las probetas sean cilindros

compactos, sino, por el contrario, cilindros llenos de poros. Esta característica es la principal buscada para los materiales absorbentes acústicos, que logrará que las ondas acústicas choquen en el interior de los poros disipando la energía acústica principalmente en forma de calor.

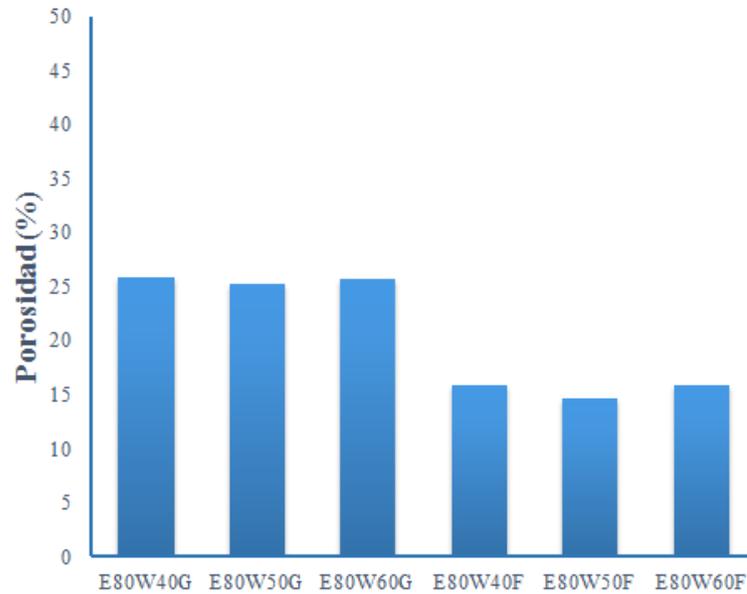


Figura 5.3.2: Porosidad abierta de los hormigones a base de escorias negras.

5.3.1.2 Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión

Por lo que respecta a las propiedades mecánicas, en las Figuras 5.3.3 y 5.3.4 se puede observar la variación de la resistencia a compresión de los materiales con la proporción de agua que contienen.

En primer lugar, si analizamos el material que contiene la fracción gruesa se observa como la resistencia a compresión siempre disminuye conforme aumenta la cantidad de agua añadida. Cualquier composición por debajo del 40% de agua no fue suficiente para mojar el cemento necesario para obtener un material aglomerado.

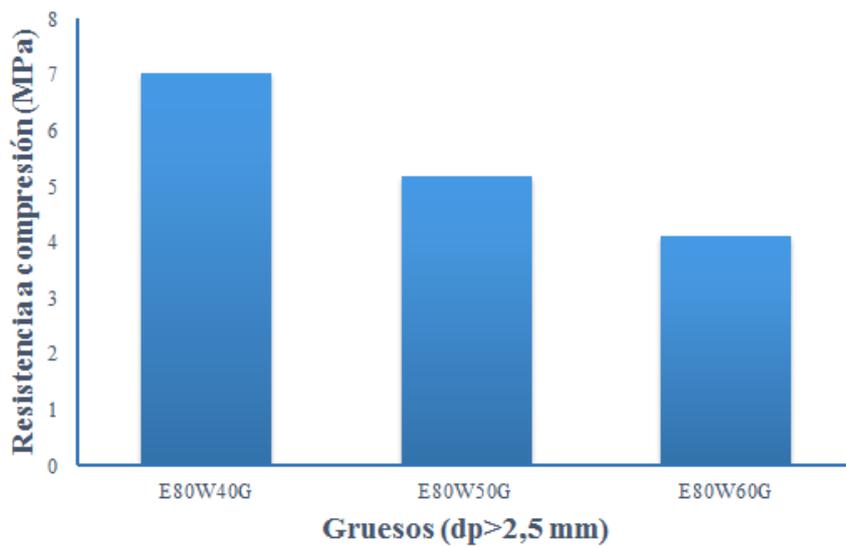


Figura 5.3.3: Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/cemento (Gruesos $dp > 2,5$ mm).

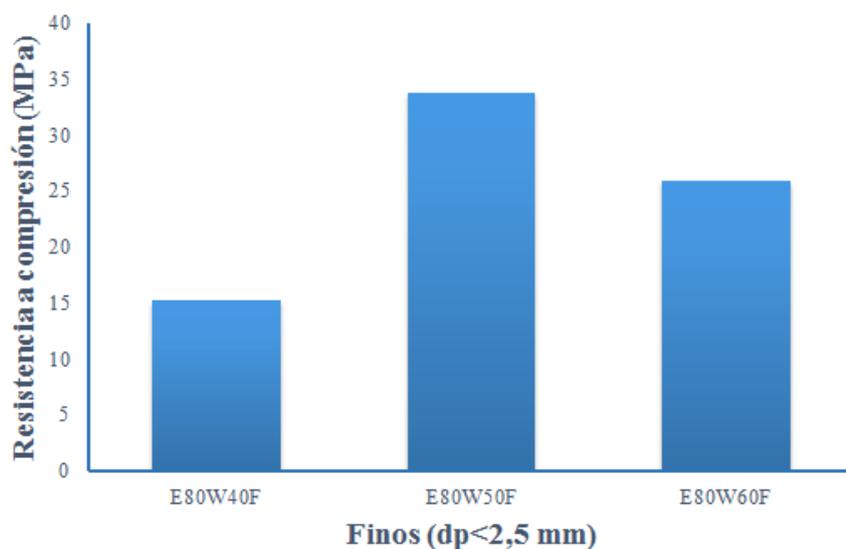


Figura 5.3.4: Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/cemento (Finos $dp < 2,5$ mm).

Si, a continuación, se observa la resistencia a compresión de la fracción fina encontramos un máximo en la composición correspondiente al 50% de agua. Comparando ambos materiales (Figura 5.3.5) se muestra que la resistencia a compresión de la fracción fina es mucho mayor. Al tener la escoria una distribución granulométrica con mayor contenido en finos, las partículas más pequeñas se introducen entre los huecos generando un producto que muestra una mayor resistencia a los

esfuerzos de compresión [53]. Se obtendría, por un lado, un material de buenas características acústicas reforzado con otro material de buenas propiedades mecánicas, maximizando, además, la cantidad de residuo reciclada.

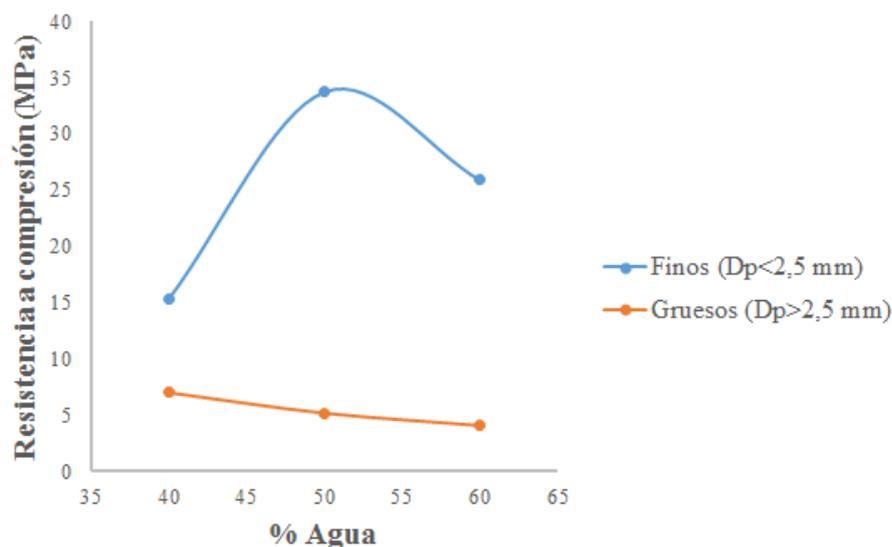


Figura 5.3.5: Variación de la resistencia a compresión con la relación de agua/cemento comparativa.

5.3.1.3 Propiedades acústicas

Absorción acústica

El coeficiente de absorción acústica a incidencia normal se ha medido por el método del tubo de impedancia (tubo Kundt) descrito en el apartado 4.2.3.1, en el rango de frecuencias comprendido entre [50-5000 Hz]. En las Figuras 5.3.6 y 5.3.7 se muestran las curvas obtenidas para las distintas probetas, donde están representados los valores del coeficiente de absorción acústica para las frecuencias preferentes en tercios de bandas de octava.

Un análisis de la Figura 5.3.7 muestra como los materiales formados por las fracciones finas de la escoria alcanzan niveles de absorción acústica muy bajos y en todos los casos las curvas obtenidas son similares entre sí. Para los materiales formados por gruesos (Figura 5.3.6), el coeficiente de absorción acústica aumenta, alcanzándose valores próximos a 1 para ciertas frecuencias, y siendo mayores en el caso de un 40 % de proporción de agua añadida. Estos resultados concuerdan con los valores medidos de porosidad abierta, mayor para los materiales formados por

5. Resultados y discusión

gruesos. La absorción acústica es la pérdida de energía de la onda sonora debido a la fricción de la onda con las paredes de las cavidades del producto sobre el que incide. De este modo se explica que conforme mayor sea el diámetro de partícula, la matriz del producto será más porosa y, por consiguiente, los coeficientes de absorción acústica medidos para el rango de frecuencias serán mayores.

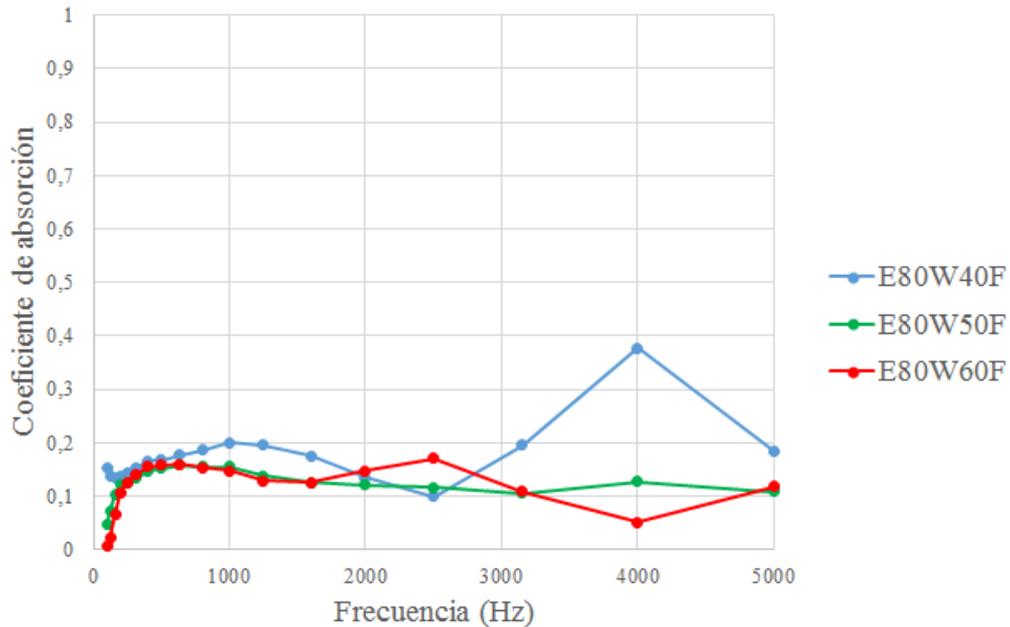


Figura 5.3.6: Variación de la absorción acústica con la relación de agua/cemento en la fracción gruesa ($d_p > 2,5$ mm).

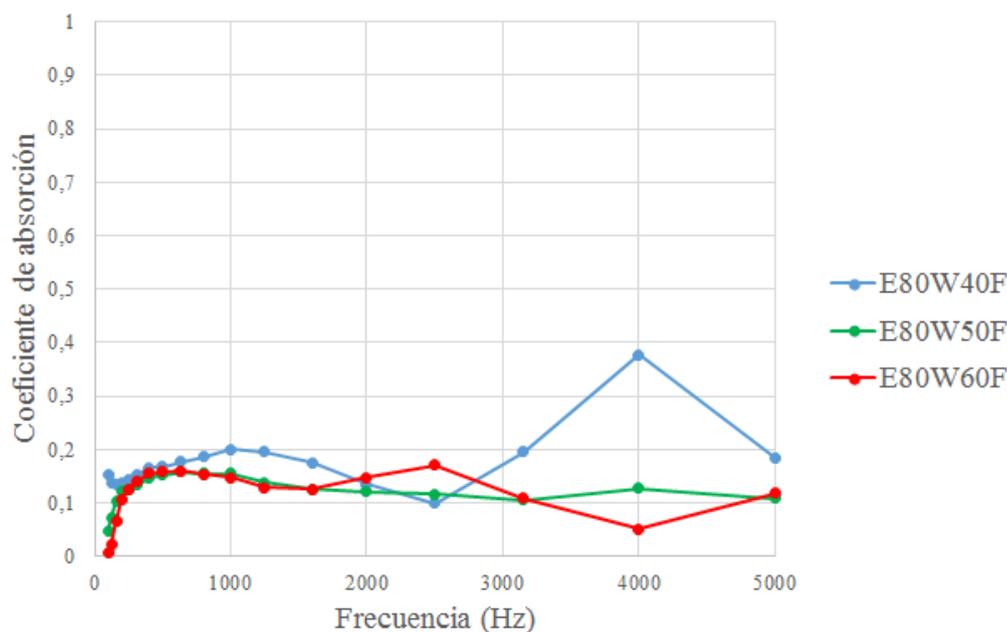


Figura 5.3.7: Variación de la absorción acústica con la relación de agua/cemento en la fracción fina ($d_p < 2,5$ mm).

NRC

El coeficiente de reducción de ruido NRC se ha calculado según el apartado 4.2.3.2.

Al igual que en el apartado anterior, en la Tabla 5.3.3 se observa la diferencia de absorción acústica entre los materiales formados por la fracción fina y la fracción gruesa. Al ser la absorción acústica mayor en los materiales con partículas mayores, el coeficiente de reducción NRC también es más elevado.

NRC			
E80W40F	0,15	E80W40G	0,30
E80W50F	0,14	E80W50G	0,37
E80W60F	0,15	E80W60G	0,27

Tabla 5.3.3: Variación del índice NCR con la relación de agua/cemento.

5.3.1.4 Material definitivo

Tras el estudio de las propiedades del material desarrollado a base de escorias negras y atendiendo a los objetivos que se perseguían, se ha decidido que la composición óptima es aquella con un 40 % de agua para las probetas de material grueso y con un 50 % de agua para el material formado por la fracción más fina. El producto grueso elaborado con esta composición presenta valores elevados de absorción acústica mientras que el elaborado con la fracción fina presenta una resistencia mecánica muy por encima de unos valores mínimos exigidos a este tipo de productos. En la Tabla 5.3.4 se recogen los valores medidos de los diferentes parámetros estudiados.

Propiedades	E80W40G	E80W50F
Densidad aparente	2010 kg/m ³	2626 kg/m ³
Porosidad abierta	26 %	15 %
Resistencia a compresión	7,03 MPa	15,32 MPa
NRC	0,30	0,14

Tabla 5.3.4: Resumen de las propiedades de los materiales definitivos a base de escoria.

5.3.2 Caracterización del material óptimo

Finalmente, una vez seleccionadas las composiciones óptimas tanto de los materiales de referencia como de los nuevos hormigones desarrollados a partir de escorias negras, se ha procedido al estudio en profundidad de sus características físicas, mecánicas, acústicas y de durabilidad, comparando en todo momento con los materiales estándar que hemos tomado como referencia (H80W45 y A80W40). En la Tabla 5.3.5 se presenta un resumen con las composiciones de todos los materiales ensayados en este apartado.

	E80W40G	H80W45	E80W50F	A80W40
Árido grueso (%)	-	80	-	-
Árido fino (%)	-	-	-	80
Escorias (%)	80	-	80	-
Cemento (%)	20	20	20	20
Agua (% w/c)	40	45	50	40

Tabla 5.3.5: Composición de las probetas definitivas de estudio.

En la Figura 5.3.8 se muestran unas fotografías de las probetas elaboradas.

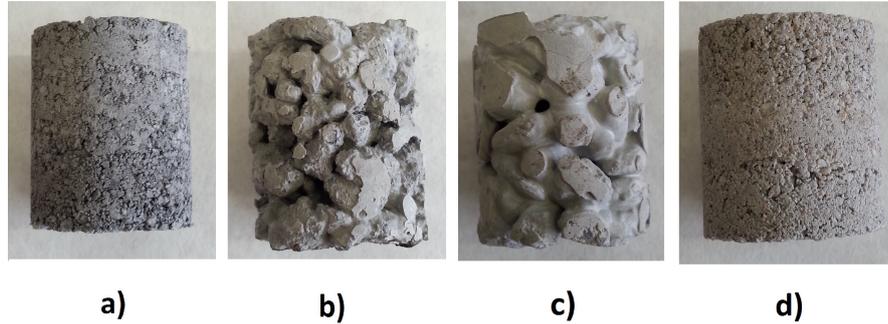


Figura 5.3.8: Probetas ensayadas. a)E80W50F b)E80W40G c)H80W45 d)A80W40.

5.3.2.1 Propiedades físicas

En cuanto a la densidad aparente (Tabla 5.3.6), se puede comprobar que ésta siempre es mayor para los productos con escorias que para sus homólogos de referencia. Esto se debe a que la gravedad específica de la escoria es significativamente más elevada que la de los áridos, lo que proporciona siempre densidades mayores [53].

Propiedades	E80W40G	H80W45	E80W50F	A80W40
Densidad aparente	2010 kg/m ³	1715 kg/m ³	2626 kg/m ³	2169 kg/m ³
Porosidad abierta	26 %	26 %	15 %	9 %
Humedad	1,7 %	1,5 %	3,1 %	1,8 %
Estabilidad volumétrica	0,2 mm	1,0 mm	0,5 mm	2,6 mm

Tabla 5.3.6: Resumen de las propiedades físicas de los materiales definitivos (fracción $dp > 2,5$ mm).

La porosidad abierta alcanza valores muy parecidos entre los nuevos materiales y los estándar debido a que la distribución granulométrica de las escorias gruesas y la grava son muy parecidas. La humedad también presenta valores similares.

Por último, la estabilidad volumétrica, parámetro que preocupara especialmente en este estudio debido a la naturaleza expansiva de la escoria negra que podría generar defectos constructivos [51], presenta valores prácticamente despreciables.

5.3.2.2 Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión

La tendencia de la resistencia a compresión es a aumentar con respecto a los materiales de referencia estándar. Esto es debido a la mayor resistencia de las partículas de escoria frente a la grava o arena tradicional. La densidad de los productos refleja claramente este hecho, observándose como a igualdad de otros parámetros, como la porosidad, las probetas de escoria presentan valores significativamente más elevados de densidad [53]. En la Tabla 5.3.7 se observan lo descrito anteriormente.

Resistencia a compresión			
E80W40G	H80W45	E80W50F	A80W40
7,03 MPa	5,91 MPa	15,32	20,10 MPa

Tabla 5.3.7: Resumen de las propiedades mecánicas de los materiales definitivos.

5.3.2.3 Propiedades acústicas

Absorción acústica

La variación del coeficiente de absorción acústica de los materiales estudiados se presentan en las Figuras 5.3.9 y 5.3.10. Se puede observar que, para la fracción gruesa, el material a base de escorias y su homólogo de referencia presentan valores muy similares con respecto al coeficiente de absorción acústica y al NRC. Este resultado es concordante si tenemos en cuenta la igualdad de porosidades entre estos materiales que se muestran en el apartado anterior de propiedades físicas [53]. Respecto a la fracción fina, la absorción acústica es bastante pobre en ambos casos, debido a la baja porosidad.

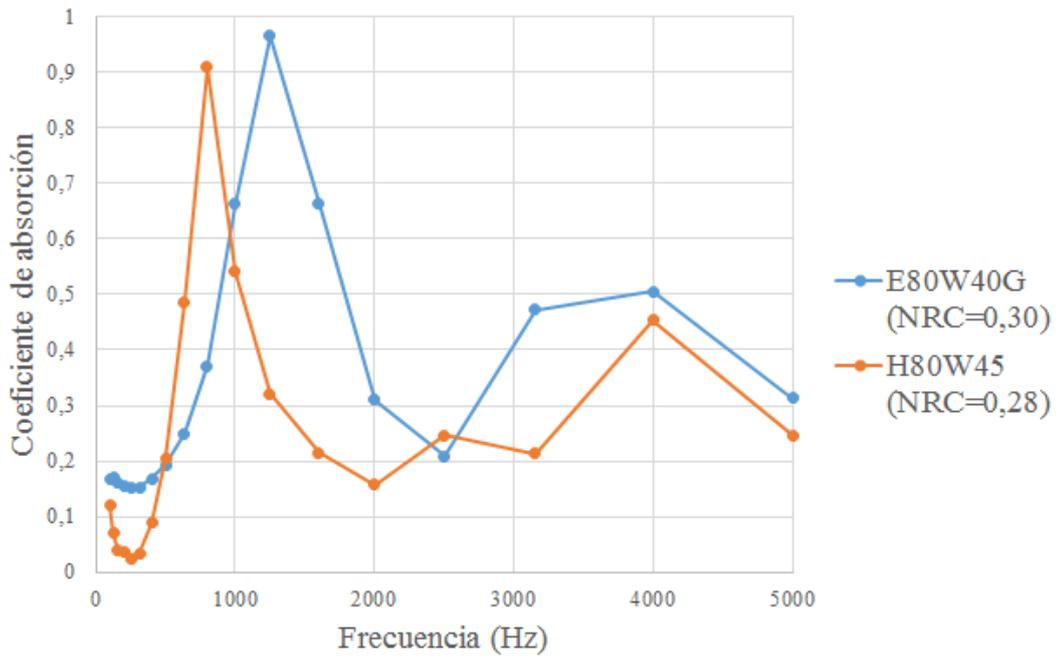


Figura 5.3.9: Absorción acústica de la fracción gruesa ($dp > 2,5$ mm).

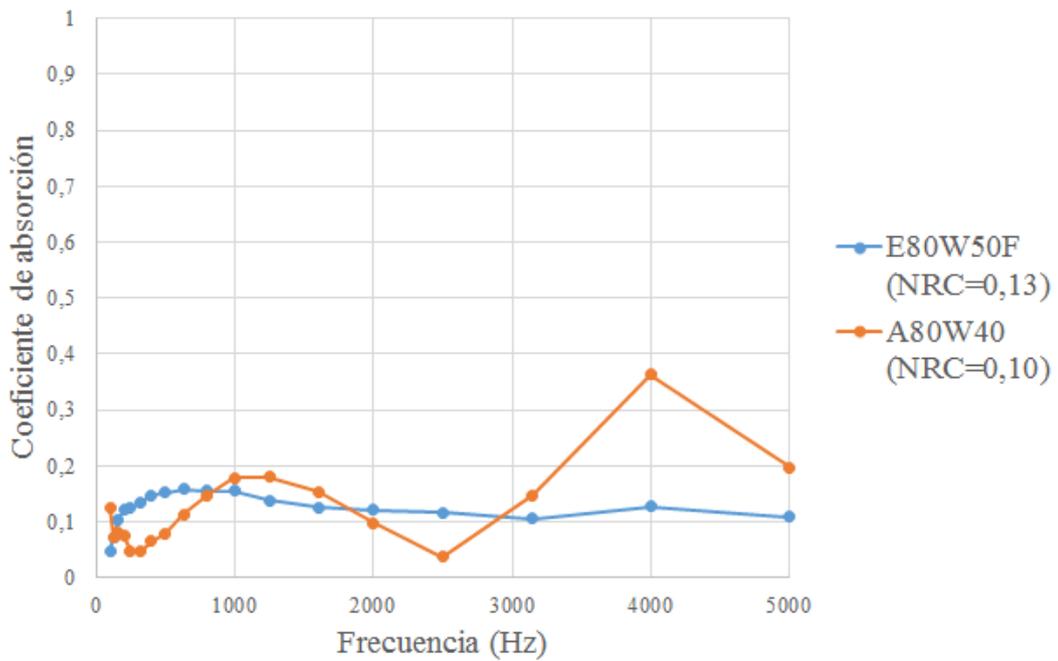


Figura 5.3.10: Absorción acústica de la fracción fina ($dp < 2,5$ mm).

Absorción acústica a diferentes longitudes

Otro parámetro del que es función la absorción acústica de un material es la longitud de la probeta que se está sometiendo a ensayo. De este modo se ha realizado un estudio de la influencia de la longitud de la probeta en las propiedades acústicas del material acústico absorbente a base de escorias.

Se ha realizado un estudio para analizar el efecto de la longitud de la probeta en las mediciones del coeficiente de absorción acústica a incidencia normal. La longitud de las probetas ensayadas es 4 (1L), 8 (2L) y 12 (3L) mm aproximadamente.

El análisis de la Figura 5.3.11 muestra que al aumentar la longitud de la probeta la absorción acústica mejora, el pico de absorción máxima se traslada a frecuencias menores. Sin embargo, el aumento de longitud para los materiales finos no presenta ninguna mejora en términos de absorción acústica, como se observa en la Figura 5.3.12.

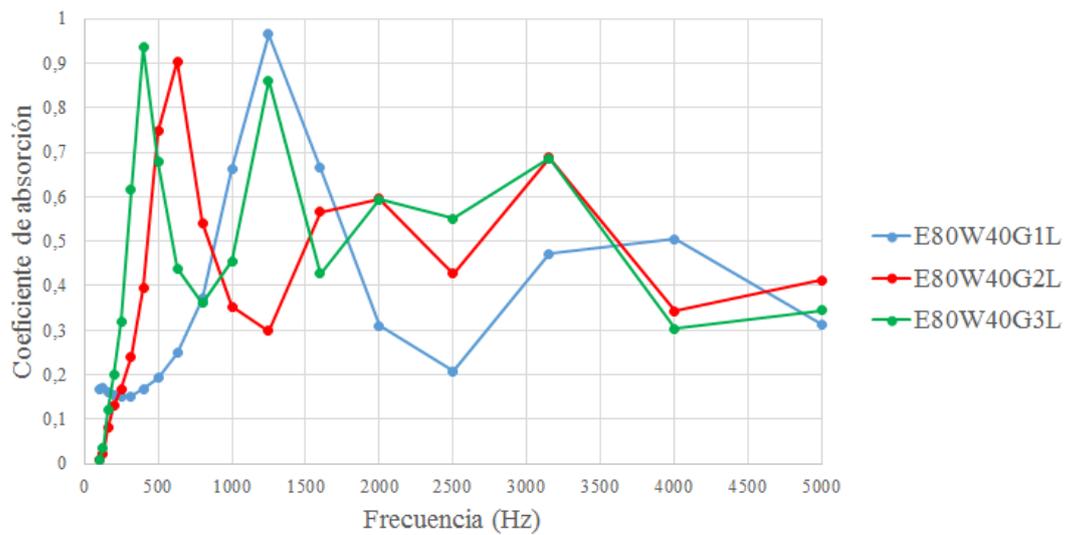


Figura 5.3.11: Absorción acústica a diferentes longitudes (Gruesos $dp > 2,5$ mm).

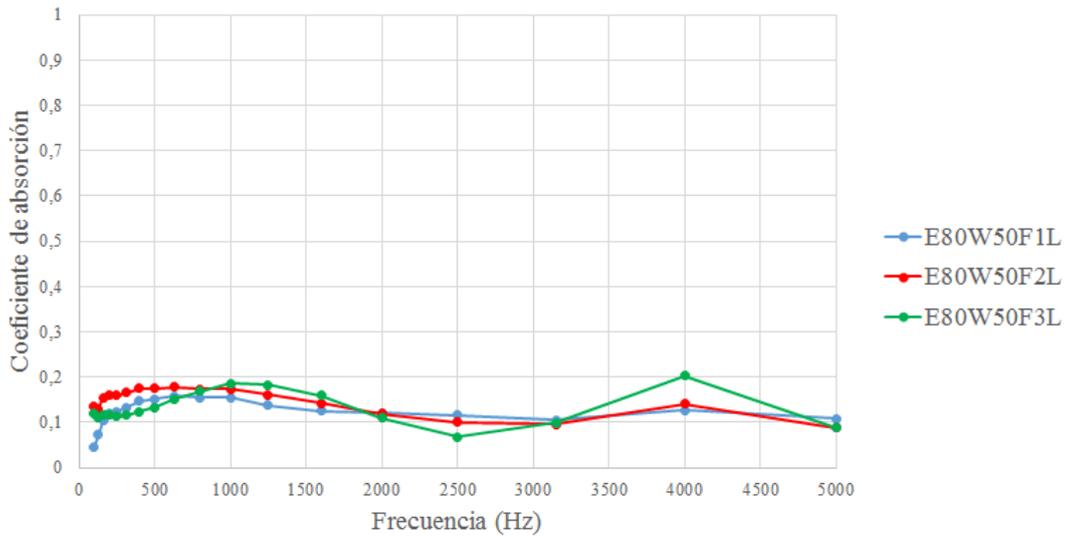


Figura 5.3.12: Absorción acústica a diferentes longitudes (Finos $d_p < 2,5$ mm).

A través de las ecuaciones que modelan el mecanismo de absorción acústica de un material poroso se puede explicar la relación entre la frecuencia a la que aparecen los picos de máxima absorción y la longitud de la probeta [56], mediante la siguiente ecuación:

$$f_p \cdot l = \frac{(2n - 1) \cdot c}{4} = \text{constante} \quad (5.3.1)$$

Siendo,

- f_p la frecuencia a la que se produce el pico de absorción máxima
- n el número de picos (constante)
- c la velocidad del sonido en aire (fija para una temperatura)
- l la longitud de la probeta

A través de esta ecuación se puede confirmar que a medida que aumenta la longitud de la probeta sometida a ensayo, la frecuencia a la que aparecen los picos de máxima absorción disminuye.

Solución constructiva de las barreras acústicas

Los dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras, también conocidas como pantallas acústicas, están conformadas a partir de hormigones que, en su mayoría, la normativa EN 1793-1 [27] para este tipo de dispositivos, los clasifica como categoría A2. Estos dispositivos, en general, están formados por dos elementos, una primera capa de hormigón poroso que le permite alcanzar un buen coeficiente de absorción acústica y una segunda capa de hormigón estándar tradicional que le confiere la resistencia mecánica.

Como uno de los objetivos de la investigación realizada es la potencial aplicación de un material acústico absorbente a base de escorias como pantalla acústica, es de relevada importancia alcanzar valores de absorción acústica elevados para que el producto final pueda ser catalogado como A2 y así competir con los materiales comercialmente utilizados. Además hay que tener en cuenta la importancia de reutilizar todas las escorias, para alcanzar un alto grado de valorización de las mismas, aún sabiendo que los tamaños de partícula de escorias más pequeños, abundantes según la granulometría mostrada, no presentan buenas propiedades de absorción acústica, si bien son los que mejores propiedades de resistencia mecánica han mostrado.

De este modo, se ha pensado en una solución constructiva que contenga todos los cortes granulométricos obtenidos tras tamizar las escorias y, además, de un espesor tal que se asemeje a las soluciones constructivas usadas en la fabricación de pantallas acústicas, con el fin de obtener mejor absorción acústica.

Se ha realizado un estudio para analizar la solución constructiva óptima que alcance una mayor absorción acústica. Se ha elegido una longitud de probeta de 12 cm, y en esta longitud se han combinado las probetas de 4 cm de los productos de material acústico absorbente elaborados a partir de diferentes tamaños de partícula de la escoria hasta alcanzar la longitud final. En la Tabla 5.3.8 se muestra la nomenclatura seguida en este apartado relacionada con la de apartados anteriores y en la Tabla 5.3.13 se recogen las diferentes combinaciones llevadas a cabo.

A	B
E80W50F	E80W40G

Tabla 5.3.8: Nomenclatura utilizada para la descripción de la solución constructiva

Solución constructiva	Combinación	Longitud total probeta (cm)
1	BBA	12
2	BAA	12

Tabla 5.3.9: Combinaciones estudiadas para la solución constructiva óptima

Cabe resaltar de la Tabla 5.3.13 que en las 2 soluciones constructivas estudiadas se ha optado en colocar en último lugar, es decir, en la cara de la probeta opuesta a la que la onda sonora incide, el compuesto elaborado con el tamaño de partícula más pequeño de escorias. Esto es debido al hecho de que este compuesto es el que va a aportar la resistencia mecánica a la solución constructiva.

En la Figura 5.3.13 se muestran unas fotografías de las probetas combinadas para formar las diferentes soluciones constructivas estudiadas.



Figura 5.3.13: Combinación de las probetas ensayadas acústicamente. A la izquierda la combinación BBA, a la derecha la combinación BAA.

En la Figura 5.3.14 se muestran las curvas del coeficiente de absorción acústica obtenidas para las distintas soluciones constructivas objeto de estudio. Como se puede observar, al comparar las curvas de las 2 soluciones constructivas, se puede

decir que aquella que tiene un mayor porcentaje del material grueso E80W40G alcanza valores de absorción acústica mayores, así como más picos de absorción y a menores frecuencias. Esto se debe a la mayor tortuosidad del camino recorrido por la onda en el caso BBA, que disipa la onda acústica [53].

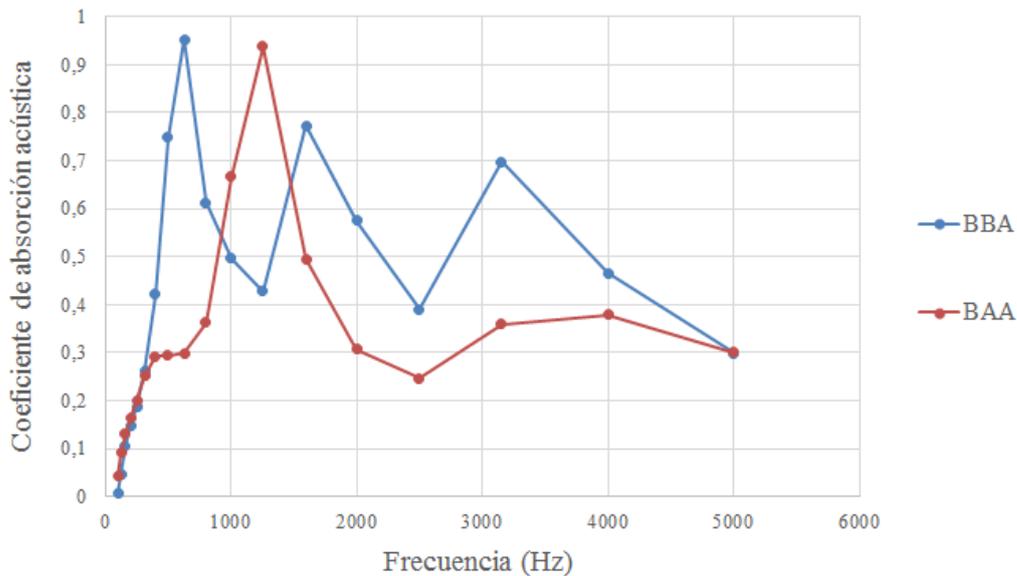


Figura 5.3.14: Absorción acústica de probetas multicomposición.

5.3.2.4 Ensayos de durabilidad

En la introducción de la norma EN 14389 (2009) [34] se indica que: “Es conveniente que el dispositivo reductor de ruido en carretera no solo cumpla con su función de absorción acústica, sino que también conserve sus propiedades durante el ciclo de vida requerido”. La norma EN 14389 (2009) [34] establece que el dispositivo reductor de ruido en carreteras debe resistir a la corrosión y a ciclos de cambios térmicos.

Con este propósito, los materiales E80W40G, E80W50F, H80W45 y A80W40 han sido sometidos a diferentes test de durabilidad: absorción de agua por inmersión total, ataque ácido, ciclos de hielo-deshielo, ciclos térmicos y resistencia al agua de mar.

Absorción de agua por inmersión total

La Tabla 5.3.10 muestra los resultados de las muestras después de haber sido sometidas al ensayo de absorción de agua. Como era de esperar, las muestras E80W40G y H80W45 presentan las mayores permeabilidades. Se conoce que el coeficiente de permeabilidad aumenta conforme la porosidad de la muestra aumenta [57]. Una mayor permeabilidad significa una alta capacidad de los fluidos para moverse a través del poro, permitiendo la introducción de moléculas que reaccionan con el material y destruyen su estabilidad química [58].

W_{IT} (%)	
E80W40G	18,6
H80W45	18,5
E80W50F	11,3
A80W40	8,9

Tabla 5.3.10: Absorción de agua por inmersión total.

Ataque ácido

La Tabla 5.3.11 muestra los resultados obtenidos en el test de ataque ácido. En todos los casos, las muestras inmersas en ácido presentan resistencias a compresión menores que las inmersas en agua. La pasta de cemento presente en las composiciones es atacada por el ácido mediante la siguiente reacción química [48], empeorando sus propiedades mecánicas:



R_A	
E80W40G	0,42
H80W45	0,47
E80W50F	0,56
A80W40	0,75

Tabla 5.3.11: Resistencia a ataque ácido.

Además, los materiales de mayor porosidad y permeabilidad (E80W40G y H80W45) alcanzan valores de resistencia a compresión menores. Los poros dejan pasar las moléculas de ácido y la probeta es atacada tanto desde el exterior como desde

el interior de la matriz porosa [53]. Este efecto no ocurre con los materiales más compactos (E80W50F y A80W40) presentando valores más elevados de resistencia mecánica.

En la Figura 5.3.15 se muestra el resultado de las probetas tras 14 días en inmersión en ácido/agua:



Figura 5.3.15: Probetas tras 14 días de inmersión. A la derecha las probetas inmersas en agua; a la izquierda las probetas inmersas en ácido.

Ciclos de hielo/deshielo

Los ciclos de hielo/deshielo pueden causar expansiones térmicas en el interior de la estructura del material [53]. Se han sometido a estos ciclos las probetas E80W40G, H80W45, E80W50F y A80W40, de acuerdo con la norma UNE-CEN/TS 12390-9 EX (2008) [49]. Se ha determinado la evolución del cambio de masa, de longitud y de resistencia mecánica después de un número determinado de ciclos de congelación/descongelación. Las Figuras 5.3.16, 5.3.17 y 5.3.18 muestran los resultados después de 1, 3, 7, 10, 14 y 20 ciclos.

Se puede observar que las muestras que peores resultados han obtenido han sido las más porosas (E80W40G y H80W45). Entre los ciclos 10 y 20 mostraron una pérdida de masa de entre el 65 % y el 85 % con respecto al valor inicial, una pérdida de longitud de un 60 % y una caída de resistencia a compresión casi completa. Sin embargo, las probetas menos porosas han mantenido prácticamente sus propiedades intactas durante todo el ensayo.

Se sabe que el hormigón expuesto a ciclos de temperatura, donde el agua se congela y se derrite en invierno, se deteriora debido a la congelación y descongelación. A medida que la temperatura disminuye, el agua contenida en el capilar de los poros se congela y se produce una expansión. Por lo tanto, los ciclos repetidos de congelación y descongelación deterioran rápidamente el hormigón [59]. Al igual que la pasta de cemento, las partículas de árido son sometidas a la presión hidráulica interna. El árido debe acomodar el expansión del agua congelada ya sea expulsando el exceso de agua o provocando una expansión. Debido a este fenómeno, a medida que la porosidad de los materiales aumenta, aumenta la pérdida de peso y de longitud, así como disminuye la resistencia a compresión [60].

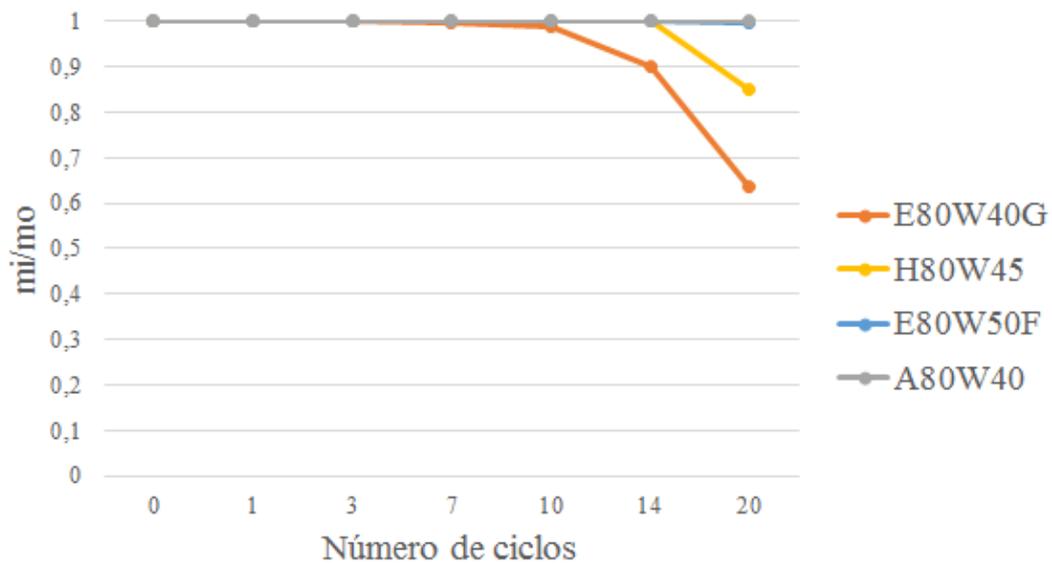


Figura 5.3.16: Pérdida de masa en ciclos de hielo/deshielo.

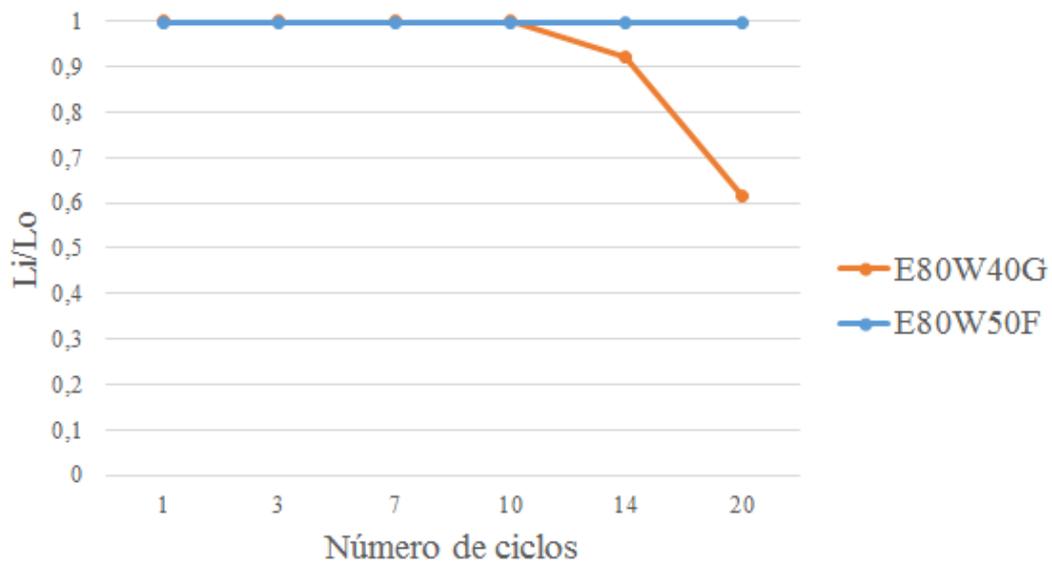


Figura 5.3.17: Pérdida de longitud en ciclos de hielo/deshielo.

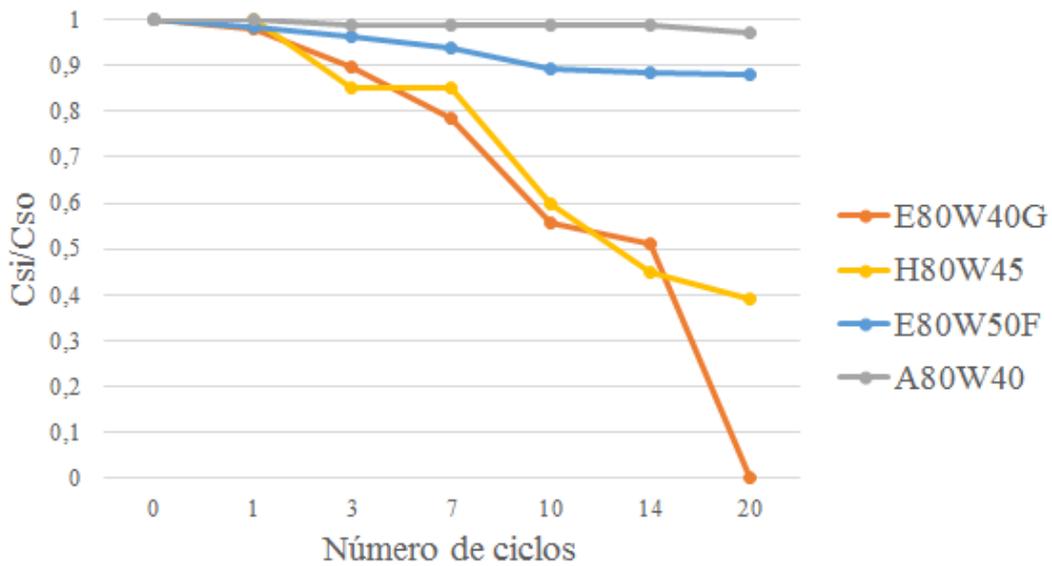


Figura 5.3.18: Pérdida de resistencia mecánica en ciclos de hielo/deshielo.

Resistencia a ciclos térmicos

Del mismo modo que los ciclos térmicos de hielo/deshielo, los ciclos de calentamiento y enfriamiento de los hormigones también afectan considerablemente a sus propiedades mecánicas.

En la Figura 5.3.19 se muestra la caída de la resistencia mecánica en ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento. Todos los materiales presentan pérdidas de resistencia a compresión similares, probablemente debidas a las dilataciones que sufre el hormigón al ser expuesto a altas temperaturas. Estas dilataciones provocan fisuras en el interior del material debilitándolas [61]. Cabe destacar que, aún después de un número significativo de ciclos, la resistencia a compresión de los materiales no ha sufrido ningún descenso brusco, presentando después de hasta 20 ciclos un descenso de no más del 70 %.

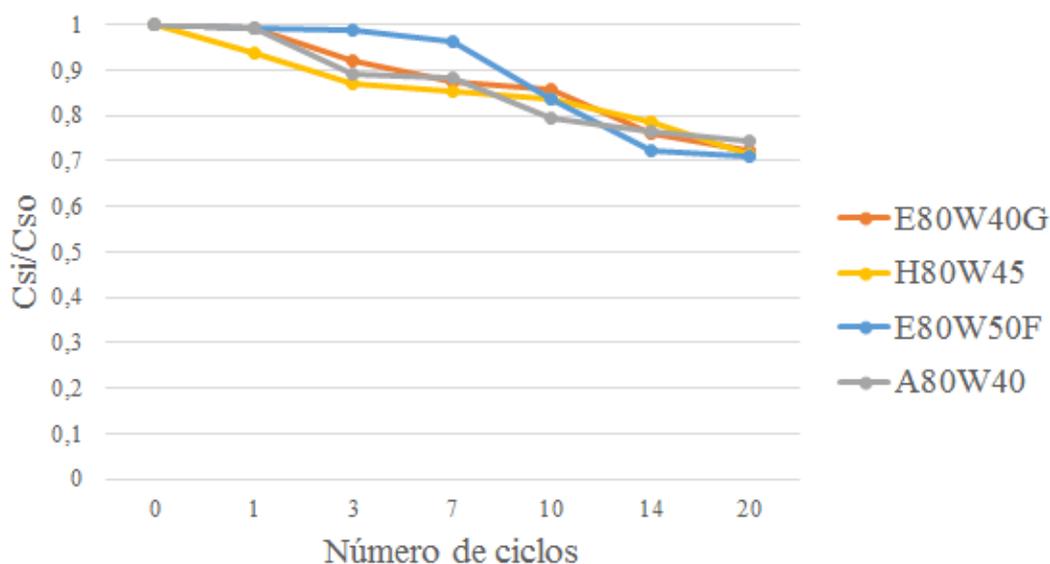


Figura 5.3.19: Pérdida de resistencia mecánica en ciclos térmicos.

Resistencia al agua de mar

El ambiente marino propicia una muy severa prueba de durabilidad para las estructuras de hormigón porque son expuestas simultáneamente a la acción de varios procesos físicos y químicos de deterioro (ataques por iones agresores del agua de mar, presión de cristalización de sales dentro del hormigón, etc) [48].

En la Figura 5.3.20 se muestra la caída de la resistencia mecánica de las probetas

5. Resultados y discusión

E80W40G, H80W45, E80W50F y A80W40 tras haber estado sumergidas durante 56 días en agua marina.

Se puede observar como la mayor pérdida de resistencia a compresión la presentan los materiales más porosos (E80W40G y H80W45), mientras que estos presentan valores muy parecidos entre sí. La matriz porosa permite la introducción de los iones del agua marina, que debilita la probeta tanto desde el exterior como desde el interior, disminuyendo su resistencia mecánica [48]. A igualdad de porosidad, los resultados de pérdida mecánica serán muy similares, como ocurre con el material grueso a base de escoria y su homólogo de referencia. Los valores de pérdida de resistencia a compresión de los materiales menos porosos son significativamente menores.

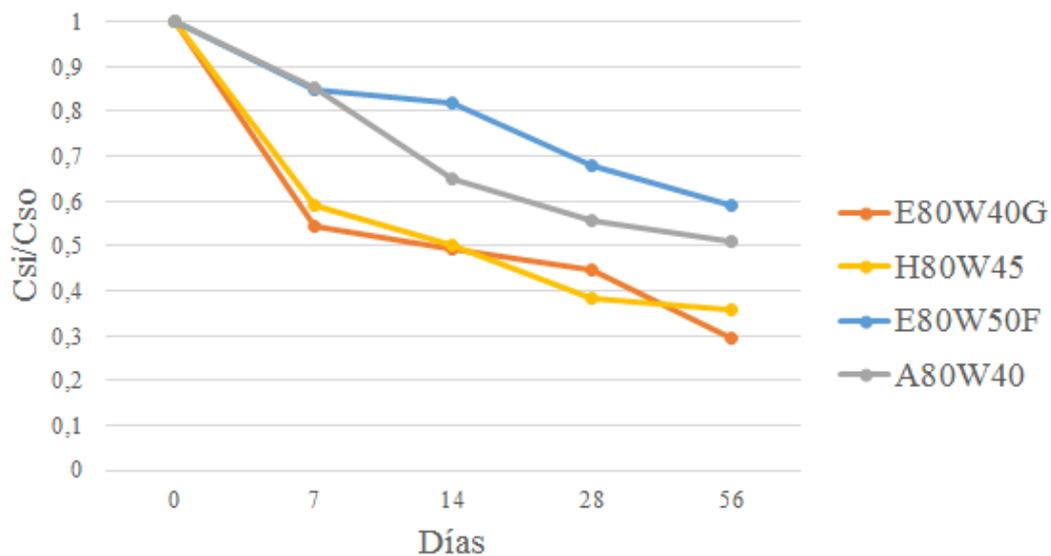


Figura 5.3.20: Pérdida de resistencia mecánica en probetas sumergidas en agua de mar.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten establecer las siguientes conclusiones:

1. Con vistas a la sustitución de áridos gruesos por escorias, el estudio de un hormigón poroso estándar revela que la proporción de grava y el agua presentes en el material modifica sus propiedades. De modo que, conforme la proporción del árido aumenta, la densidad y la resistencia a compresión del producto disminuyen, mientras que la porosidad abierta aumenta a simple vista. Por otro lado, la cantidad de agua presenta un máximo en el 45 %. Estos resultados han conducido a elegir una composición de compromiso de un 80 % de árido grueso y 45 % de agua, que alcanza una adecuadas propiedades mecánicas.
2. En la elaboración de un material acústico absorbente a base de escorias, sustituyendo el árido grueso por escoria, se ha podido comprobar que a medida que el diámetro de partícula disminuye, la resistencia mecánica y la densidad aumentan y la porosidad y la absorción acústica disminuyen. Además, con respecto a la cantidad de agua, la densidad y la resistencia mecánica presentan un máximo para los materiales correspondientes a un 40 % de agua en el material elaborado con los gruesos y un 50 % al material fino.
3. Con respecto a la caracterización físicas, químicas, mecánicas, acústicas y de durabilidad de los materiales óptimos, se ha observado que presentan propiedades similares e incluso mejores que los materiales utilizados tradicionalmente.
4. Respecto a la longitud de la probeta medida en tubo de impedancia, a medida que ésta es mayor, el pico de máxima absorción se desplaza hacia frecuencias más bajas.
5. Referente al diseño de la solución constructiva, se ha comprobado que las mejores propiedades acústicas se alcanzan cuando en la cara expuesta de la pantalla a la fuente sonora se dispone del material con mayor tamaño de partícula; mientras que en la cara opuesta la mejor opción es disponer del material con partículas finas, para provocar la reflexión de la onda sonora, además de contribuir a la mejora de las propiedades mecánicas.
6. El producto absorbente acústico se ha elaborado siguiendo un método de fabricación sencillo y similar al de los productos comerciales. Asimismo, la reducción

en el coste de la gestión del residuo como consecuencia de su reciclado en esta aplicación y el ahorro de recursos naturales demandados por el sector de la construcción hace que el producto desarrollado presente unas expectativas de fabricación rentables.

Las escorias negras de hornos siderúrgicos de arco eléctrico pueden ser potencialmente recicladas en dispositivos reductores de ruido de tráfico de carreteras, ya que los productos conformados con un 80 % de escorias presentan características similares a las de otros productos utilizados tradicionalmente en este tipo de aplicaciones.

Bibliografía

- [1] M. de Fomento, *Ficha técnica de escorias de acería de horno de arco eléctrico*, Diciembre 2013.
- [2] Ömer Özkan, I. Yüksel, and Özgür Muratoglu, “Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag,” *Waste Management*, 2007.
- [3] I. Liapis and I. Papayianni, “Advances in chemical and physical properties of electric arc furnace carbon steel slag by hot stage processing and mineral mixing,” *Hazardous Materials*, 2014.
- [4] W.-T. Kuo, H.-Y. Wang, and C.-Y. Shu, “Engineering properties of cementless concrete produced from ggbfs and recycled desulfurization slag,” *Construction and Building Materials*, 2014.
- [5] A. Kavussi and M. J. Qazizadeh, “Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (eaf) steel slag subjected to long term aging,” *Construction and Building Materials*, 2014.
- [6] R. Senthamarai, P. D. Manoharan, and D. Gobinath, “Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties,” *Construction and Building Materials*, 2010.
- [7] G. Adegoloye, A.-L. Beaucour, S. Ortola, and A. Noumowé, “Concretes made of {EAF} slag and {AOD} slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability,” *Construction and Building Materials*, vol. 76, no. 0, pp. 313 – 321, 2015.
- [8] J. M. Manso, J. A. Polanco, M. Losañez, and J. J. González, “Durability of concrete made with {EAF} slag as aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, no. 6, pp. 528 – 534, 2006.
- [9] C. Pellegrino and V. Gaddo, “Mechanical and durability characteristics of concrete containing {EAF} slag as aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 9, pp. 663 – 671, 2009.
- [10] S. B. Park, D. S. Seo, and J. Lee, “Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio,” *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 9, pp. 1846 – 1854, 2005.

- [11] Z. Krezel and K. McManus, “Recycled aggregate concrete sound barriers for urban freeways,” in *Waste Materials in Construction Wascon 2000 Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1–2 June 2000* (J. G. G.R. Woolley and P. Wainwright, eds.), vol. 1 of *Waste Management Series*, pp. 884 – 892, Elsevier, 2000.
- [12] J. Pastor, L. García, S. Quintana, and J. Peña, “Glass reinforced concrete panels containing recycled tyres: Evaluation of the acoustic properties of for their use as sound barriers,” *Construction and Building Materials*, vol. 54, no. 0, pp. 541 – 549, 2014.
- [13] N. Holmes, A. Browne, and C. Montague, “Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement,” *Construction and Building Materials*, vol. 73, no. 0, pp. 195 – 204, 2014.
- [14] UNEP, *Towards a green economy. Pathways to sustainable development and poverty eradication- A synthesis for policy makers*. 2011.
- [15] *Ley 22/2011 of 28 July on waste and contaminated soil, Boletín Oficial del Estado*. 29 de Julio de 2011.
- [16] *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. 2008.
- [17] *Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste*.
- [18] E. Commission, *Directorate-General Environment, Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to annex II of Directive 2008/98/EC on waste*. 2011.
- [19] E. Commission, www.eea.europa.eu/themes/waste/intro. Mayo 01, 2015.
- [20] EuroStat, “Generation of Waste” epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/database. Mayo 01, 2015.
- [21] EuroStat, “Consumption of Energy” epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy. Mayo 01, 2015.

- [22] C. G. Arenas, *Estudio potencial de reciclado de residuos industriales en dispositivos reductores de ruido en carreteras*. Noviembre 2010.
- [23] EN ISO 266:1998. "Acústica. Frecuencias preferentes".
- [24] P. F. Pereira, *Acústica, Ruidos y Vibraciones*. S.N., 1980; 1989. Pedro Flores Pereira; ; 22 cm; Bibliogr.: p. 656-661.
- [25] J. A. C. y H A González, *Medición del coeficiente de absorción del sonido*. Scientia el Technica, 2004.
- [26] A. G. Rodríguez, *La contaminación acústica. Fuentes, evaluación, efectos y control*. 2006.
- [27] EN 1793-1:1998. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora".
- [28] EN 1793-2:1998. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 2: Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo".
- [29] EN 1793-3:1998. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 3: Espectro normalizado de ruido de tráfico".
- [30] EN 1794-1:2003. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Comportamiento no acústico. Parte 1: Comportamiento mecánico y requisitos de estabilidad".
- [31] EN 1794-1:2003. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Comportamiento no acústico. Parte 2: Requisitos en relación con la seguridad general y el medio ambiente".
- [32] EN 14388:2006. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Especificaciones".
- [33] EN 14389-1:2006. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Métodos de evaluación del comportamiento a largo plazo. Parte 1: Características acústicas".
- [34] EN 14389-2:2006. "Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Métodos de evaluación del comportamiento a largo plazo. Parte 2: Características no acústicas".

- [35] *EN 196-1:2005. “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”.*
- [36] *EN 197-1:2000. “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos más comunes”.*
- [37] *ASTM D 3682-78 (33): “Método para la determinación de los elementos mayoritarios y minoritarios en cenizas de carbón y coke por espectrofotometría de absorción atómica”.*
- [38] *ASTM E 605-77: “Método estándar para la medida de espesores y densidades de materiales resistentes al fuego aplicados a estructuras”.*
- [39] *EN 1936:2006. “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total”.*
- [40] *EN 12859 (2011). “Bloques de yeso. Definiciones, requisitos y métodos de ensayo”.*
- [41] *EN 1097-7 (2009). “Ensayos de las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 7: Determinación de la densidad de las partículas del relleno. Método del picnómetro”.*
- [42] *EN 196-3:2005 (2009). “Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de secado y solidez”.*
- [43] *ASTM E 761-86: “Resistencia a la compresión de materiales resistentes al fuego aplicados a elementos estructurales”.*
- [44] *ASTM C 423-90: “Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation method”.*
- [45] *ASTM E1050-98: “Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system”.*
- [46] *EN 12087 (1997). “Thermal insulating products for building applications. Determination of long term water absorption by immersion”.*
- [47] T. Cerulli, C. Pistolesi, C. Maltese, and D. Salvioni, *Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster*. Cement and Concrete Research, 2003.

- [48] L. A. de Lima, *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, 1999.
- [49] *UNE-CEN/TS 12390-9 EX (2008): "Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling"*.
- [50] J. J. Emery, *Slag Utilization in Pavement Construction, Extending Aggregate Resources. ASTM Special Technical Publication 774*. American Society for Testing and Materials. Washington, DC., 1982.
- [51] *EN-12620. "Áridos para hormigón"*.
- [52] M. Monser and J. L. Barros, *Ingeniería acústica. Teoría y Aplicaciones. Segunda edición*. Berlin, Springer, 2009.
- [53] C. G. Arenas, *Recycling coal bottom ash in construction materials. Technical specifications of bottom ash based sound absorbing porous concrete applied in highway noise barriers*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2013.
- [54] R. Siddique, *Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance, and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash*. Construction and Building Materials, 2013.
- [55] H. Kurama and M. Kaya, *Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture*. Construction and Building Materials, 2008.
- [56] N. Neithalath, *Development and characterization of acoustically efficient cementations materials*. Ph.D. Thesis, Purdue University, 2004.
- [57] M. A. R. Bhutta, N. Hasanah, N. Farhayu, and M. W. Hussin, *Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate)*. Construction and Building Materials, 2013.
- [58] L. Evangelista and J. de Brito, *Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2010.
- [59] J. Aavik and S. Chandra, *Influence of organic admixtures and testing method on freeze-thaw resistance of concrete*. ACI Materials Journal, 1995.
- [60] R. Polat, R. Demirboga, M. B. Karakoc, and I. Turkmen, *The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze-thaw cycles*. Cold Regions Science and Technology, 2010.

- [61] D. Monzon, *El fenómeno de contracción en pavimentos de hormigón*. Centro de investigaciones Viales LEMaC, 2010.