

Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF

tesis doctoral realizada por:

Martha Alejandra González Ortega

dirigida por:

Antonio Aguado de Cea

Sergio Henrique Píalarissi Cavalaro

Barcelona, julio 2015

Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL



Curso académico: 2014-2015

Acta de calificación de tesis doctoral

Nombre y apellidos MARTHA ALEJANDRA GONZALEZ ORTEGA

Programa de doctorado INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Unidad estructural responsable del programa DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de la su tesis doctoral titulada __"COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE HORMIGONES ESTRUCTURALES CON ÁRIDO SIDERÚRGICO EAF"__

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

NO APTO APROBADO NOTABLE SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)			
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

_____, _____ de _____ de _____

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

SÍ NO

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado		Secretario de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	

Barcelona a _____ de _____ de _____

*Dedicada a mis papás Martha y Manuel
y a mi hermano Ricardo
por el gran esfuerzo de tenernos lejos
A Jorge, por todo lo compartido en este tiempo
Gracias por su apoyo constante!!!!*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mis tutores, a Antonio Aguado por darme la oportunidad hace cuatro años de formar parte de su equipo de investigación, pero sobre todo, por su paciencia, apoyo y dedicación durante todo este tiempo. A Sergio Pialarissi, por su excelente disposición, constante orientación, paciencia y gran amabilidad. A ambos les reitero mi admiración, por su capacidad humana y el amor a la investigación, que no es posible expresar en estas líneas.

El desarrollo de esta tesis doctoral no habría sido posible sin el apoyo económico del gobierno de México, CONCACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología). Quiero agradecer a la empresa Promotora Mediterránea-2, S.A. (PROMSA) del grupo CEMENTOS MOLINS por el convenio titulado “Estudio del comportamiento de hormigones fabricados con escorias siderúrgicas de arco eléctrico” el 1 de Junio 2010. Agradezco también a los miembros del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló (Tomás García, Robert Mc-Aloon, Camilo Bernad, Jordi Lafuente y especialmente, a Jordi Cabrerizo) por su ayuda en la realización de ensayos, las largas pláticas y los momentos divertidos.

Me gustaría agradecer a todos mis compañeros y amigos por aligerar los días difíciles y alegrar las horas de comida. Renán, Francisco, Isaac, Ana, Julia, Cristina, Jordi, Ricardo, Rasmik, Eduardo, Nayara, Juliana, Albert, André, Luca, Carlos, Liao, Tai, Rubén, Francesc, Nacho, Ahmed y en especial, a Pau, Matías, Cata y Sandra. Sobretudo quiero agradecer infinitamente a Mariana, Eve, Nieves, Silvia, Vane, Lore, Cere, María Isabel, Alejo y Luis por los increíbles momentos vividos, las incontables sonrisas y un sinfín de experiencias maravillosas en mi estancia por Barcelona. También a mis compañeros de piso Océane, Carlos, Luis con los que formamos un bonito hogar.

Por último quiero agradecer a las personas más importantes en mi vida, mis papás Martha y Manuel, y mi hermano Ricardo por apoyarme incondicionalmente a lograr esta aventura, animarme, impulsarme, por ayudarme a ser quien soy y darme palabras de aliento en los momentos difíciles. Gracias por todo su esfuerzo, y lo que ha implicado estar tan lejos. Y a Jorge por ser mi apoyo diario, por impulsarme a ser mejor cada día, guiarme, cuidarme, mimarme, alentarme en este duro reto y por aguantar las incontables horas de estrés, cansancio y dudas. No existen suficientes palabras para agradecerles y decirles lo mucho que los amo.

RESUMEN

Con la creciente preocupación por el impacto ambiental y la búsqueda de la sostenibilidad en el sector de la construcción, el uso de los áridos siderúrgicos EAF para la fabricación de los hormigones ha cobrado gran interés. Estos áridos son subproductos resultantes de la fabricación de acero mediante horno de arco eléctrico y suponen una alternativa interesante para conservar los recursos naturales, reducir el consumo energético, disminuir emisiones y la demanda de vertederos. Tradicionalmente, el uso de estos áridos en hormigones se ha limitado a aplicaciones de bajo valor añadido, con poca responsabilidad estructural y con un contenido reducido a causa de las reticencias en cuanto a la viabilidad técnica y la durabilidad.

Los áridos siderúrgicos se caracterizan por una alta densidad entorno a los 3.550 kg/m^3 , así como alta resistencia a la fragmentación y un excelente coeficiente de pulimiento acelerado con resistencia al desgaste y abrasión. Todo ello, hace del árido siderúrgico un material potencialmente interesante para la fabricación de hormigones pesados o sometidos a procesos de abrasión. Teniendo esto en cuenta, el objetivo principal de esta Tesis es evaluar la viabilidad técnica de los áridos siderúrgicos para la fabricación de **hormigones con una sustitución del 100% del árido grueso y 80% del árido fino convencional**. Este estudio se realiza considerando los requerimientos de aplicaciones en las que los áridos siderúrgicos puede representar un alto valor añadido, como pueden ser paredes estructurales para la protección radiológica y capa de rodadura de pavimentos bicapa.

Para dar respuesta a los objetivos propuestos, el presente trabajo se divide en tres capítulos que evalúan las etapas del ciclo de vida de un hormigón: producción, puesta en servicio y durabilidad. En primer lugar, se analizan las características físicas, químicas y mineralógicas de los áridos utilizados (siderúrgico, calizo, barítico) y se evalúa el comportamiento de cada árido durante el proceso de amasado. En segundo lugar, se determinan las dosificaciones idóneas de árido siderúrgico para la fabricación de hormigones pesados con responsabilidad estructural. Así mismo, se estudian y comparan las propiedades mecánicas, la capacidad de blindaje radiológico, la resistencia al deslizamiento y desgaste de tres tipos de hormigones (siderúrgico, convencional y barítico). Por último, se realiza el estudio de la durabilidad de los hormigones estudiados, ante los posibles procesos de degradación para las aplicaciones planteadas.

Los resultados de los ensayos muestran que las propiedades mecánicas de los hormigones siderúrgicos son similares o superiores a las medidas para los hormigones convencionales y, en todos los casos, son significativamente mayores en comparación con los hormigones baríticos. Aunque los coeficientes de atenuación de los hormigones siderúrgicos son más bajos que los del hormigón barítico, las diferencias en términos de espesor de pared equivalente son relativamente pequeñas. De igual modo, se constató que los hormigones siderúrgicos presentan resistencias al deslizamiento similares y resistencias a la abrasión

mayores que las de los hormigones convencionales. Estos resultados apoyan el uso de los áridos siderúrgicos para fabricar hormigones pesados con responsabilidad estructural y con capacidad de protección radiológica, así como para capas de rodadura.

Por otro lado y de manera colateral al foco principal del presente estudio, se constató que el proceso de amasado modifica la curva granulométrica del árido barítico en una medida mayor que en el caso de los otros áridos, lo que se atribuye a su estructura cristalina y elevada friabilidad. Ello da lugar a una zona interfacial de transición débil y repercute negativamente en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del hormigón. Las observaciones respecto al árido barítico durante el proceso de amasado proporcionan unas pautas importantes para el diseño, la producción y el uso de este árido en el hormigón.

ABSTRACT

The use of the EAF steel slags as aggregate in the production of concrete has gained great interest with the increasing concern about the environment impact and the sustainability in the construction industry. The EAF steel slags are by-products from the steel production process with electric arc furnace. In many applications, they are an interesting alternative to preserve natural resources, decrease the energetic consumption, decrease emissions and the need for landfills. Traditionally, the use of this EAF steel slags in concrete has been limited to applications with low added value, with poor structural responsibility and with reduced content due to reservations regarding its technical viability and durability.

The EAF steel slags are characterized by a high density (around 3550 kg/m^3) in comparison with conventional natural aggregate, a high resistance to fragmentation and to abrasion. These reasons make the EAF steel slag a potentially interesting material to produce heavyweight concrete or concrete submitted to highly abrasive processes. The main objective of this Thesis is to evaluate the technical viability of structural concrete with EAF steel slags in substitution to 100% of the conventional coarse aggregate and 80% of the conventional fine aggregate. Such analysis takes into account the requirements of two applications in which the EAF steel slags contributes to an improved performance (structural walls with radiological protection and the road bearing layer of pavements).

In order to achieve these objectives, the research is divided in three parts that cover the different stages in the concrete life cycle: production, performance in service and durability. In the first part, the physical, chemical and mineralogical characteristics of the EAF steel slags are analyzed in comparison with those from the reference aggregates (limestone and barite). A study of the influence of the mixing process in the grading curve and the surface characteristics of the aggregates is conducted. In the second part, the ideal mix to obtain a structural heavyweight concrete with EAF steel slag is determined. Likewise, the mechanical properties, the radiological shielding capacity, the slip/skid and abrasion resistance are studied and compared with equivalent concrete mixes with reference aggregates. Finally, the durability of the concretes is evaluated for the possible degradation processes that might occur in the applications considered.

The results show that the mechanical properties of concrete with EAF are similar or higher than the measured for conventional concrete and, in all cases, are significantly higher than the obtained for concretes with barite. Although the radiological attenuation coefficients of the concretes with EAF slags are lower than that of concrete with barite, the differences in terms of the equivalent wall thickness are small. Moreover, concrete with EAF steel slags have similar slip/skid resistance and higher resistance to abrasion than conventional concrete. These results support the use of EAF steel slags as aggregate to produce heavyweight concrete with structural responsibility with radiological protection capacity.

Collaterally to the main focus of the present study, it was found that the mixing process modifies the grading curve of the barite at a higher extent than in the case of the other aggregates. This is attributed to the highly crystalline structure and high friability of barite, which generates a weak interfacial transition zone with the cement paste and affects adversely the mechanical properties and the durability of concrete. The observations of the behavior of barite aggregate during the mixing process provide important guidelines for its use in the concrete.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Razón de ser	3
1.3 Objetivos generales	4
1.4 Objetivos específicos	4
1.5 Método y organización de la tesis	5
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
2.1 Introducción	7
2.2 Escorias siderúrgicas	8
2.2.1 Fabricación de acero	9
2.2.2 Horno de arco eléctrico	11
2.3 Escorias negras EAF	14
2.3.1 Propiedades	14
2.3.2 Inestabilidad volumétrica de la escoria negra	16
2.4 Estudios y aplicaciones de la escoria negra a la fecha	19
2.4.1 Áridos siderúrgico de horno de arco eléctrico	19
2.4.2 Utilización en la industria del cemento	20
2.4.3 Firmes de carreteras	21
2.4.4 Otras aplicaciones	21
2.4.5 Fabricación de hormigones siderúrgicos	22
2.5 Hormigones pesados	29
2.6 Conclusiones	33
3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ÁRIDOS	37
3.1 Introducción	37
3.2 Etapa 1: Selección y tratamiento	38
3.2.1 Áridos siderúrgicos EAF	39
3.2.2 Áridos calizos	41
3.2.3 Áridos barfíticos	42

3.3	Etapa 2: Caracterización del árido	42
3.3.1	Propuesta experimental	42
3.3.2	Resultados	44
3.4	Etapa 3: Influencia del amasado	50
3.4.1	Ensayo de la influencia de amasado en la granulometría	50
3.4.2	Resultados	52
3.5	Conclusiones	57
4.	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A NIVEL HORMIGÓN	59
4.1	Introducción	59
4.2	1ª campaña: Optimización de la dosificación	61
4.2.1	Materiales	62
4.2.2	Dosificaciones	62
4.2.3	Método de fabricación del hormigón	63
4.2.4	Propuesta experimental	65
4.2.5	Resultados y análisis	65
4.2.6	Conclusiones 1ª campaña experimental	66
4.3	2ª campaña: Comportamiento de los hormigones	67
4.3.1	Materiales	68
4.3.2	Dosificaciones	68
4.3.3	Método de fabricación del hormigón	69
4.3.4	Propuesta experimental	70
4.3.5	Resultados y análisis	74
4.3.6	Conclusiones 2ª campaña experimental	88
5.	ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES	91
5.1	Introducción	91
5.2	Propuesta experimental	92
5.3	Resultados y análisis	97
5.3.1	Profundidad de penetración de agua bajo presión	97
5.3.2	Ensayo mojado-secado	99
5.3.3	Influencia del ambiente de exposición	107
5.3.4	Ensayo hielo-deshielo	109
5.3.5	Lixiviación	117
5.3	Conclusiones	119

6. CONCLUSIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	123
6.1 Introducción	123
6.2 Conclusiones generales	124
6.3 Conclusiones específicas	125
6.3 Perspectivas futuras	128
BIBLIOGRAFÍA	131
ANEJO 1 FICHAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	145
ANEJO 2 REPORTAJE FOTOGRÁFICO PARA EVALUAR LA CAMPAÑA DE DURABILIDAD	163
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – a) escoria negra; b-c) árido siderúrgico EAF	2
Figura 1.2 – Organización de la Tesis Doctoral	6
Figura 2.1 – Clasificación de las escorias	9
Figura 2.2 – Ranking producción mundial de acero	10
Figura 2.3 – Producción Europea de acero EAF 2013	11
Figura 2.4 – Acerías de Horno de arco eléctrico (EAF) en España	12
Figura 2.5 – Proceso de fabricación del Horno de Arco Eléctrico	12
Figura 2.6 – a) Escoria negra y b) Escoria blanca	13
Figura 3.1 – Panorámica de la planta para el procesado de los áridos siderúrgicos	40
Figura 3.2 – a) Primera separación con maquinaria y b) Trozos de dimensiones mayores que 500 mm	40
Figura 3.3 – a) Tolva de separación para piezas con dimensiones mayores que 300 mm; b) 1er electroimán y c) Molino de compresión	41
Figura 3.4 – a) Molino de compresión y b) Trituración por impacto	41
Figura 3.5 – Aspecto del árido siderúrgico: a) arena; b) grava y c) nódulo de hierro embebido	44
Figura 3.6 – Aspecto del árido calizo: a) arena (0/4); b) gravilla (4/10) y c) grava (10/20)	45
Figura 3.7 – Aspecto del árido barítico: a) todo en uno; b) tamaño 4 mm y c) árido laminado	45
Figura 3.8 – Curva granulométrica de los tres áridos utilizados	48
Figura 3.9 – DRX: del árido siderúrgico EAF (a), calizo (b) y barítico (c)	49
Figura 3.10 – Procedimiento: a,b) lavado; c) secado; d) cuarteo; e) granulometría y f) amasado	51
Figura 3.11 – Curva granulométrica inicial ensayo friabilidad	51
Figura 3.12 – Porcentaje retenido inicial y a 435 segundos de amasado	54
Figura 3.13 – Variación del porcentaje retenido tras 435 segundos de amasado	55
Figura 3.14 – Variaciones relativas del contenido de material retenido en los tamices 8 y 0,125 mm para los casos Bs y Bh	55
Figura 3.15 – Aspecto de la barita: a) inicial; b) escamas cristalinas; c) 435 seg de amasado	56
Figura 3.16 – Adherencia de finos en el tiempo: a) inicial; b) 75 seg y c) 435 seg	56

Figura 4.1 – Esquema de la metodología del Capítulo 4	61
Figura 4.2 – a) amasadora; b) amasada final; c) cono de Abrams y c) medición aire ocluido	63
Figura 4.3 – a) llenado de moldes (método picado) y b) total probetas 1ª campaña	64
Figura 4.4 – Arena siderúrgica 0/4 mm comprimida, a) antes y b) después de hormigonar	64
Figura 4.5 – a) llenado de moldes (mesa vibratoria) y b) probetas para 4 amasadas	69
Figura 4.6 – a) probeta cortada; b) medición de espesura y c) Equipo de ensayo	72
Figura 4.7 – Ensayo del péndulo: a) equipo y b) contacto del patín con probeta	73
Figura 4.8 – Ensayo de abrasión: a) equipo y b) realización del ensayo	73
Figura 4.9 – Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo	76
Figura 4.10 – Influencia del aire ocluido en la resistencia a la compresión	77
Figura 4.11 – a) Resistencias a tracción; b) delaminación por compresión del árido barítico	78
Figura 4.12 – a) Correlación entre ϵ_s y ϵ_d ; b) Promedio de los módulos de cada dosificación a 90 días	80
Figura 4.13 – Coeficiente de Atenuación de rayos gamma correspondiente a cada dosificación	83
Figura 4.14 – Función lineal del coeficiente de atenuación (μ) y la densidad (ρ)	84
Figura 4.15 – Interacción del coeficiente de atenuación (μ) y el espesor mínimo de reducción (HVL)	85
Figura 5.1 – Procedimiento de ensayo ciclos mojado-secado: a) probetas sumergidas; b) pesado de probetas; c) medición expansiones y d) secado probetas	94
Figura 5.2 – a) Colocación de puntos; b) definición de ejes; c y d) ejemplo medición losas	95
Figura 5.3 – Exposición a la intemperie: a) losas; b) cubicas y c) Resultado de la aplicación de la fenolftaleína	96
Figura 5.4 – Ciclos de hielo-deshielo: a) en congelador (HS, HC, HAB) y b) en agua (HS)	96
Figura 5.5 – Profundidad de penetración de agua bajo presión	98
Figura 5.6 – Puntos de óxido en: a) losas y b) cúbicas; Variación relativa (%): c) losas y d) cúbicas	99
Figura 5.7 – Puntos de óxido de las losas: a) HSS2b1 y b) HSC2a1	100
Figura 5.8 – Puntos de óxido probetas cúbicas: a) HSS2b y b) HSC1b	101
Figura 5.9 – Evolución del peso de las losas: a) HS, b) HAB y c) HC	101
Figura 5.10 – Variación relativa (%) del peso de las losas de los HSS1b, HSC1a, HCa	

y HABb	102
Figura 5.11 – Evolución del peso de las probetas cúbicas: a) HSS y HAB; b) HSC y HC	103
Figura 5.12 – Variación relativa (%) del peso de probetas cúbicas de los HSS1b, HSC1a, Hca y HABb	104
Figura 5.13 – Deformaciones de losas, ensayo mojado-secado	105
Figura 5.14 – Fenómenos presentes durante el ensayo mojado-secado	105
Figura 5.15 – Expansiones medidas entre el ciclo 15 y 44 de cada dosificación	106
Figura 5.16 – a) Datos de temperatura y humedad y b) Deformaciones de cada dosificación	107
Figura 5.17 – Profundidad de carbonatación	108
Figura 5.18 – Probeta dosificación HABb: a) base 51 ciclos; b) lateral 53 ciclos y c) base 68 ciclos	110
Figura 5.19 – Variación del peso por ciclos hielo-deshielo	110
Figura 5.20 – Velocidades de pulso sometidos a ciclos de hielo-deshielo	111
Figura 5.20 (Cont.) – Velocidades de pulso sometidos a ciclos de hielo-deshielo	112
Figura 5.21 – a) Resistencia a compresión 0 y 68 ciclos y b) Variación relativa (%)	113
Figura 5.22 – Hormigones HAB: a) Fallo a compresión; b) presencia de poros y/o huecos en la pasta y áridos desgastados (flechas); c) polvo acumulado en zona interior de la probeta	113
Figura 5.23 – Delaminación de los áridos baríticos dentro de una matriz rígida: a, b) HABa y c) HABb	114
Figura 5.24 – Probetas después del ensayo de compresión: a) HSC2b; b) HSS2b y c) HCa	114
Figura 5.25 – Hormigón convencional (HCa) a) antes y b) después de la aplicación de los ciclos de hielo-deshielo	115
Figura 5.26 – Hormigón siderúrgico (HSS1b) antes (a y b) y después (c y d) de los ciclos	115
Figura 5.27 – Hormigón barítico (HABb) antes de ensayo hielo-deshielo: a) Aspecto general del hormigón; b) Observación de numerosos poros en la pasta; c) Mala conexión (1-2 μm) entre árido y pasta y d) Porosidad de la pasta alrededor del árido	116
Figura 5.28 – Hormigón barítico (HABb) después de ensayo hielo-deshielo: a-b) Aspecto general del hormigón; c-e) Espacio de 6 μm entre árido y pasta y d-f) Interfase con restos de polvo	117
Figura 5.29 – Valores para cada tipo de hormigón de: a) pH y b) conductividad	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 – % producción acero 2013 dependiendo tipo horno	10
Tabla 2.2 – Propiedades físico-mecánicas de las escorias negras	14
Tabla 2.3 – Composición química de la escoria según diferentes autores (% peso)	15
Tabla 2.4 – Composición mineralógica, constituyentes cristalinos [Arribas, 2011]	15
Tabla 2.5 – Fases minerales y componentes principales [Manso, 2001; Luxán, 1995]	16
Tabla 3.1 – Ensayos realizados para evaluar las propiedades de los áridos	42
Tabla 3.2 – Resultados de estabilidad volumétrica de áridos siderúrgicos EAF	46
Tabla 3.3 – Propiedades físicas de cada tipo de árido	47
Tabla 3.4 – Composición química de los áridos siderúrgicos y baríticos	48
Tabla 3.5 – % retenido para cada tamiz a los diferentes tiempos de amasado	53
Tabla 4.1 – Dosificaciones 1ª campaña experimental (Julio 2011)	62
Tabla 4.2 – Propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido	65
Tabla 4.3 – Propiedades físicas en estado fresco, 1ª campaña experimental	65
Tabla 4.4 – Resistencias a compresión, 1ª campaña	66
Tabla 4.5 – Propiedades físicas de las arenas correctoras	68
Tabla 4.6 – Dosificaciones 2ª campaña experimental (Noviembre/Diciembre 2011)	69
Tabla 4.7 – Programa de ensayos en estado endurecido	71
Tabla 4.8 – Propiedades físicas en estado fresco, 2ª campaña experimental	74
Tabla 4.9 – Resistencias a compresión para las dosificaciones de la 2ª campaña	75
Tabla 4.10 – Resistencias a tracción para las dosificaciones de la 2ª campaña	77
Tabla 4.11 – Módulos de elasticidad estáticos y dinámicos, 2ª campaña	79
Tabla 4.12 – Comparativa de módulos dinámicos experimentales y ecuación de Popovics	81
Tabla 4.13 – Velocidades de pulso ultrasónico de las dosificaciones de la 2ª campaña	81
Tabla 4.14 – Valores del factor α para las dosificaciones, según la EHE-08 y el Model Code ...	82
Tabla 4.15 – Resistencias al deslizamiento y desgaste por abrasión de cada dosificación	86
Tabla 4.16 – Valores de Desgaste de Abrasión para uso interior	86
Tabla 4.17 – Valores de Desgaste de Abrasión para uso exterior	87
Tabla 4.18 – Clasificación de los suelos según la resistencia al deslizamiento R_d	87
Tabla 4.19 – Clase exigible a los suelos en función de su localización	88
Tabla 4.20 – Tipos de sitio para la aplicación en carreteras según su índice de riesgo	89

Tabla 5.1 – Programa de ensayos de durabilidad de los hormigones 92
Tabla 5.2 – Lixivante de componentes por períodos (días) para HSS1b, HSC1a y HCa 118

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCION

Entre las industrias que generan grandes cantidades de residuos y altas emisiones de dióxido de carbono se encuentra la siderúrgica. Según la US Energy Information Administration, en la fabricación del hierro, acero, la fundición de minerales y chatarras, entre otras (se producen aproximadamente dos toneladas de CO₂ por cada tonelada de producto. Ello representa una problemática ambiental por falta de espacio (vertederos) para su correcto almacenamiento y la posible contaminación que representen debido a su degradación.

El acero es un producto aplicado en muchas industrias debido a su alta resistencia, moldeabilidad y versatilidad, además de que puede ser reciclado repetitivamente. Así mismo, el consumo de acero crece al aumentar el ingreso per cápita, dado que los hogares agregan poder adquisitivo para comprar autos, electrodomésticos, etc. Según la Asociación Mundial del Acero en su reporte anual del 2014, la producción del acero entre el 2013 y 2014 tuvo un incremento del 1,2%, alcanzando una producción mundial total de 1.662 millones de toneladas.

El horno de arco eléctrico (EAF siglas en inglés) y el horno de oxígeno básico (BOF) son los dos métodos más comunes mundialmente utilizados para la producción del acero. En el 2013, el 39,9% de la producción de acero en la Unión Europea se realizó mediante el horno de arco eléctrico. Entre los mayores productores se encuentra España en el tercer lugar (después de Italia y Alemania), con una producción de 10.042 millones de toneladas.

Bien pues, una vez terminado el proceso de afino del acero, se generan dos residuos o subproductos: las escorias negras u oxidantes y las escorias blancas o reductoras. En general, se calcula por tonelada de acero fabricado se genera entre 125 y 180 kg de escoria negra y entre 35 y 60 kg de escoria blanca [Oliver, 2012].

Por otro lado, el sector de la construcción aporta impactos ambientales negativos, tales como un consumo excesivo de recursos naturales no renovables para la extracción de materias primas (sobreexplotación), así como, residuos resultantes de la construcción y demolición (RCD), emisiones de polvo y un alto consumo de energía. En este contexto, es de vital importancia la investigación y el desarrollo de técnicas de aprovechamiento de residuos para avanzar hacia una construcción más sostenible.

En esta línea, durante el siglo XX, se ha observado el interés por la reutilización e incorporación de los residuos siderúrgicos anteriormente mencionados en el sector de la construcción. Las alternativas de uso de las escorias negras se plantean desde su empleo directo sin tratamiento (Figura 1.1a) o de su transformación en producto granular conocido como árido siderúrgico de arco eléctrico (Figura 1.1b y 1.1c).

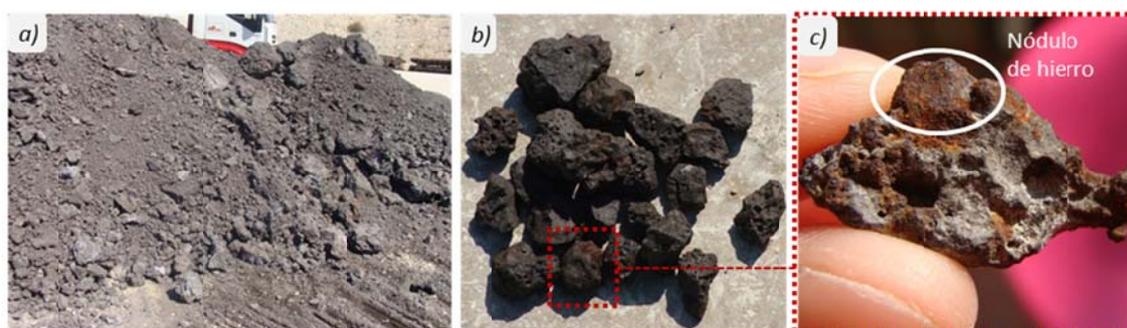


Figura 1.1: a) Escoria negra y b-c) árido siderúrgico EAF

A partir de los años 80, su uso más tradicional ha sido en firmes de carreteras, donde se empleaban las escorias negras sin tratar como relleno en bases, sub-bases y en capas granulares de carreteras [Jones, 2001; Ministère Wallon, 1995; Losañez, 2005; Luxán, 1995; Piret et. al., 1982; Rubio y Carretero, 1991; Thomas, 1983]. Desde entonces se han realizado numerosas investigaciones evolucionando hacia aplicaciones en partes del pavimento con mayor responsabilidad, como en capas de rodadura. En esta generalización de uso, también se han empleado los áridos siderúrgicos para la fabricación de cemento [Geyer et. al., 1997; Muhmood et. al., 2009; Murphy et. al, 1997; Sawadde, 1997; Sheen et. al., 2013; Shi, 2004],

mezclas bituminosas [Pasetto y Baldo, 2011; Piret et. al., 1982; San José y Uría, 2000] y como áridos para morteros [Amaral, 1999].

Una de las alternativas consideradas hoy en día es su uso como árido para la fabricación de hormigones sin responsabilidad estructural [Abdulaziz et. al., 1996; Abu-Eishah et. al., 2012; Akinmusuru, 1991; Amaral, 1999; Bäverman y Aran, 1997; Beshr et. al., 2003; Etxeberria et. al., 2010; Jigar, 2006; Lauber, 2009; Losañez, 2005; Manso, 2001; Manso et. al., 2006; Manso et. al., 2011; Maslehuddin et. al., 2003; Matsunaga et. al., 2009; Netinger et. al., 2010; Papayianni y Anastasiou, 2010; Pellegrino y Gaddo, 2009; Polanco et. al., 2011; Qasrawi et. al., 2009; Srinivas et. al., 1987; Vázquez y Barra, 2001]. La primera aplicación notable de este tipo de hormigón con responsabilidad estructural en España, se sitúa en el edificio “KUBIK” en Euskadi como resultado del trabajo de Arribas, 2011.

1.2 RAZÓN DE SER

Los estudios realizados hasta la fecha suponen un gran avance en el conocimiento de las características técnicas de los áridos siderúrgicos obtenidos a partir de las escorias negras. De igual manera, las investigaciones han dado conocimiento de la necesidad de un tratamiento previo con la finalidad de asegurar su estabilidad volumétrica.

A pesar de ello, todavía hay poca experiencia en aplicaciones con alta responsabilidad estructural a raíz de las reticencias que existen sobre el comportamiento a corto y a largo plazo del material. Por la misma razón, en la mayoría de las aplicaciones se realiza una sustitución de tan solo parte de los áridos gruesos convencionales de la dosificación por árido siderúrgico. Además, el material se suele usar en elementos en los que su incorporación no supone un alto valor añadido desde el punto de vista de desempeño, de modo que no se aprovechan los principales beneficios aportados.

Entre las características de los áridos siderúrgicos, destaca su alta densidad entorno a los 3.550 kg/m^3 comparable a la de los áridos utilizados para la producción de hormigón pesado, tales como la barita, magnetita, colemanita, entre otros. Por otro lado, su alta resistencia a la fragmentación y un excelente coeficiente de pulimiento acelerado con resistencia al desgaste y abrasión lo hacen un material especialmente interesante en elementos expuestos a un intenso desgaste superficial. Todo ello sugiere que, aparte de contribuir a una mejora del comportamiento mecánico y frente al desgaste, los áridos servirían para producir hormigones pesados o con capacidad de blindaje radiológico. .

En este contexto, es evidente que los áridos siderúrgicos son candidatos potenciales a la aplicación en hormigones con responsabilidad estructural de alto valor añadido. Para que su uso sea un éxito, se deben evaluar los problemas que los mismos podrían generar durante el ciclo de vida de las estructuras en aras de dar seguridad al medio técnico en cuanto a su uso.

Por otra parte, se deben buscar nuevas aplicaciones de mayor valor añadido que aprovechen todas las ventajas aportadas por el material, admitiendo incluso la sustitución total de los áridos convencionales por los de origen siderúrgico. Con ello, no solo se aumenta la capacidad de reaprovechamiento del residuo, como también se incrementa la sostenibilidad global de la solución adoptada.

1.3 OBJETIVOS GENERALES

Teniendo esto en cuenta, el objetivo general de esta tesis es evaluar la viabilidad técnica de los áridos siderúrgicos para la fabricación de **hormigones estructurales** con una **sustitución del 100% del árido grueso y 80% del árido fino**. El objetivo se ha planteado para dar respuesta a una necesidad creciente del empleo de este tipo de residuo (o producto secundario) en aplicaciones que tomen en cuenta el valor añadido aportado por sus características. Estas aplicaciones se centran en dos líneas de investigación: la primera, evaluar la capacidad de blindaje de los hormigones siderúrgicos para protección radiológica y la segunda, analizar su comportamiento como capas de rodadura para pavimentos bi-capa.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En respuesta a las diferentes cuestiones señaladas anteriormente, se proponen varios objetivos específicos. Estos objetivos se han desglosado en líneas de actuación que tienen en cuenta una evaluación integral del comportamiento en las diferentes etapas del ciclo de vida del material. Por lo tanto, los objetivos específicos se dividen en los siguientes temas: Comportamiento de los áridos, Influencia en el proceso de producción, Comportamiento de los hormigones y Durabilidad de los hormigones

Comportamiento de los áridos:

- Determinar las características físicas, químicas y mineralógicas de los áridos utilizados en la fase experimental (fabricación de hormigones).

Influencia en el proceso de producción

- Evaluar la influencia del proceso de amasado en las curvas granulométricas y el aspecto superficial de los áridos en función de su naturaleza.

Comportamiento de los hormigones

- Determinar las dosificaciones idóneas de árido siderúrgico para la fabricación de hormigones pesados con responsabilidad estructural.

- Comparar las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones con áridos siderúrgicos con las correspondientes a las de un hormigón convencional (con áridos calizos) y a las de un hormigón pesado (con áridos baríticos).
- Evaluar la capacidad del hormigón siderúrgico de atenuar la radiación de rayos gamma.
- Determinar la resistencia al deslizamiento/derrape (RD) y al desgaste por abrasión de los hormigones diseñados

Durabilidad de los hormigones

- Identificar los posibles procesos de degradación, de acuerdo a las condiciones ambientales de exposición, y realizar ensayos para su evaluación (Profundidad de penetración de agua bajo presión, ciclos mojado-secado, influencia del ambiente de exposición, ciclos hielo-deshielo, lixiviación).
- Analizar y comparar el comportamiento de los hormigones siderúrgicos con el de los hormigones de referencia, convencional (calizo) y pesado (barítico).

1.5 MÉTODO Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Cada uno de los grandes temas a abordar en el cuerpo de la Tesis Doctoral corresponde a uno de los Capítulos desarrollados. De esta manera, la tesis está compuesta de cinco partes, como se muestra en la Figura 1.1. En la **PARTE I** (Capítulo 2), se realiza un breve estado del conocimiento de los áridos siderúrgicos y las aplicaciones a la fecha de los mismos, así como, el análisis de los diversos estudios realizados sobre la fabricación de hormigones siderúrgicos. Ello sirvió de base para los temas que se abordarán en la tesis.

La **PARTE II** corresponde al primer programa experimental, cuyos principales objetivos son, por un lado, presentar y discutir las características físico-químicas y mineralógicas de los tres tipos de áridos utilizados (siderúrgicos, calizos y baríticos). Además se busca cuantificar y comparar la alteración de las curvas granulométricas y el desgaste superficial de cada árido como respuesta al proceso de amasado que sufren durante la fabricación del hormigón.

Mediante dos campañas experimentales se desarrolló la **PARTE III**, la primera sirvió como punto de partida para determinar una dosificación siderúrgica óptima que cumpliera con los criterios de diseño tanto en estado fresco como en endurecido. En la segunda, se ajustaron las dosificaciones siderúrgicas hasta alcanzar los objetivos fijados de diseño y se definieron las dosificaciones de un hormigón convencional y un hormigón pesado con árido barítico equivalentes.

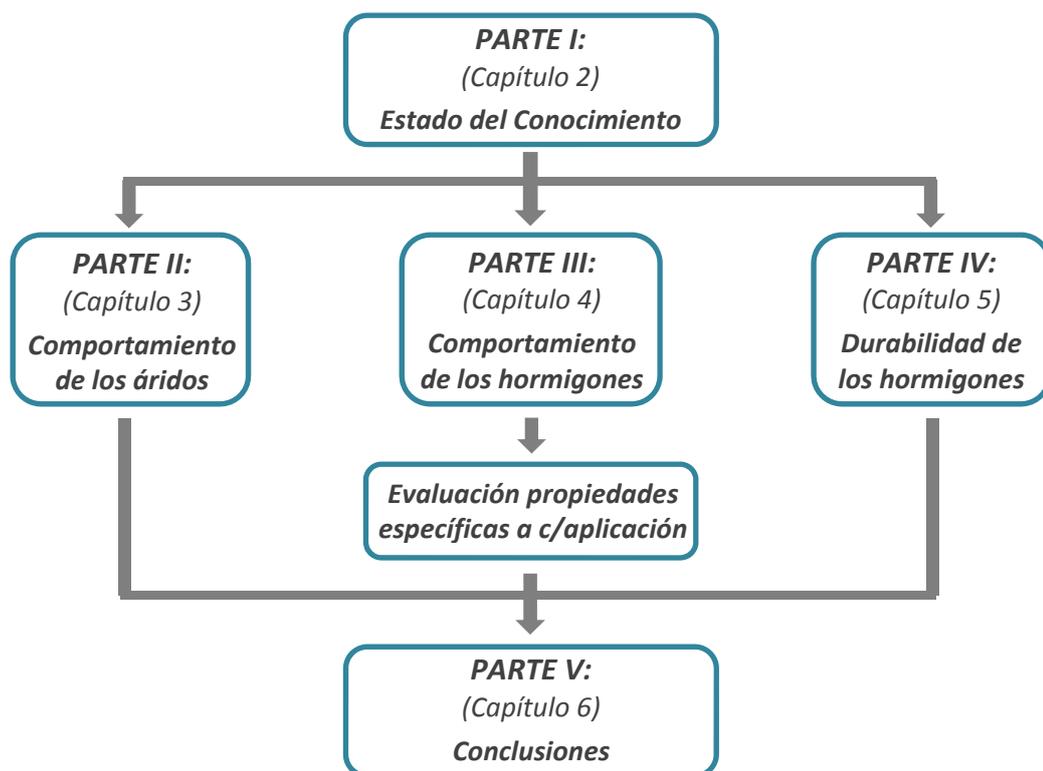


Figura 1.2: Organización de la Tesis Doctoral

Una vez fijadas las dosificaciones, se investigaron y compararon las propiedades físico-mecánicas en estado fresco y endurecido de hormigones elaborados con áridos siderúrgicos, frente a al hormigón convencional y barítico. Estos últimos se consideran como de referencia en las posibles aplicaciones contempladas en el presente estudio. De igual manera se analizan y comparan las propiedades específicas (atenuación de rayos gamma y resistencia al desgaste por abrasión y al deslizamiento/derrape) de cada dosificación.

A continuación, la **PARTE IV** se centra en aspectos de durabilidad, donde se definen los posibles mecanismos de degradación en función de las aplicaciones propuestas, así mismo, se comparan los resultados observados para cada tipo de hormigón. Finalmente, en la **PARTE V** (Capítulo 6) se exponen las conclusiones más relevantes que se derivan del trabajo realizado y se proponen las perspectivas futuras con el objetivo de profundizar y complementar el trabajo realizado en la presente Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCION

Según el informe 2011 de la Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID), la industria siderúrgica española representó el 4,6% del PIB industrial español. Así mismo, fue uno de los grandes exportadores de productos siderúrgicos, situándose en el sexto país exportador de la UE y el decimosexto en el mundo, siendo Francia, Argelia, Portugal y Alemania los principales destinos de esas exportaciones, dirigidas en un 58% a socios de la Unión Europea. El conjunto de estas exportaciones constituyó el 3,9% de las exportaciones españolas de bienes y la siderurgia fue, tras el refino de petróleo, el principal usuario de los puertos españoles.

La industria siderúrgica produce una infinidad de productos desde la fabricación del hierro, acero, hasta la fundición de minerales y chatarras, entre otras. Esta producción genera subproductos o residuos metálicos de características y propiedades diferentes dependiendo de las técnicas y procedimientos empleados. Entre estos subproductos metálicos se encuentran las escorias siderúrgicas, polvos de acería, refractarios, arenas de fundición y cascarillas de laminación. Actualmente, la necesidad de eliminar estas grandes cantidades de residuos supone una problemática ambiental, debido a los gastos de transformación, así como, falta de vertederos para su almacenaje y la degradación de los mismos.

Por esta razón, es de gran importancia la reutilización de estos residuos, ya que posibilita la conservación y minimización del consumo de los recursos naturales al reducir la demanda de materias primas convencionales, al mismo tiempo, que permite obtener un considerable ahorro de energía. No obstante, es necesario su estudio previo para valorar, tanto su competitividad económica como el cumplimiento de estabilidad y durabilidad durante la vida útil del material dentro del contexto de las aplicaciones planteadas.

En el sector de la construcción existen numerosos ejemplos de reutilización de residuos que han sido incorporados a los materiales de construcción, tales como, las arenas de fundición para la fabricación de ladrillos cerámicos [Alonso-Santurde et. al., 2012] y como áridos para el hormigón [Siddique et. al., 2009; Siddique y Singh, 2011]. Así como, los polvos de acería como adición en el cemento Portland [Salihoglu et. al., 2007], en la fabricación de ladrillos [Machado et. al., 2011] y hormigón [Al Mutlaq y Page; 2013]. Otro ejemplos, son la adición de: áridos reciclados en mezclas asfálticas [Mills-Beale y You, 2010; Paravithana y Mohajerani, 2006] y en la fabricación de hormigón [Etxeberria et. al., 2007; Hoffmann et. al., 2012; Thomas et. al., 2013; Shi-Cong et. al., 2011] y escorias siderúrgicas como constituyente principal del ligante hidráulico de carreteras [Mahieux et. al., 2009], en hormigones asfálticos [Long-Sheng et. al., 2012; Pasetto y Baldo; 2011], como áridos en pastas y morteros de cemento [Herrero, 2015; Prieto, 2012] y para la fabricación de hormigón [Losañez, 2005; Calmon et. al., 2013].

2.2 ESCORIAS SIDERÚRGICAS

Las escorias siderúrgicas son el producto del enfriamiento y solidificación de las reacciones químicas entre la materia prima, materiales añadidos al horno y las impurezas de las aleaciones férricas que se producen durante o al final de la fabricación de cualquier metal. Debido a su bajo punto de fusión y baja densidad, las escorias flotan por encima del caldo férreo. En general, su función es proteger el caldo de las impurezas, tales como la entrada de gases, el aislamiento térmico (evitar gradiente de temperatura alto) y la purificación del metal por medio de las reacciones químicas que se producen [Amaral, 1999; Manso, 2001].

Las escorias pueden provenir de diferentes tipos de metalurgia, como de la fabricación del hierro, acero, níquel, magnesio, cobre, entre otros, la función de todas es similar en todos los casos, sin embargo, poseen propiedades físicas y químicas completamente diferentes. Las escorias siderúrgicas se clasifican primeramente dependiendo del material producido, en la Figura 2.1 se muestra la clasificación de las correspondientes a la producción del hierro y acero. A su vez, el nombre con el que se define cada escoria se deriva de su forma de producción, es decir, del tipo de horno utilizado, sintetizándolas las más importantes en cinco grandes grupos. 1) Horno Alto: Escoria BF; 2) Convertidor de oxígeno: Escoria BOF; 3) **Horno de**

arco eléctrico: Escoria EAF; 4) Horno Cuchara: Escoria LF y 5) Convertidor descarbonización oxígeno Argón: Escoria AOD.



Figura 2.1: Clasificación de las escorias (elaboración a partir de Amaral, 1999 y Prieto, 2012)

Así pues, las escorias siderúrgicas de arco eléctrico (EAF siglas en inglés) derivadas de la fabricación del acero, son el objetivo principal de este estudio con la finalidad de su utilización como material granular en la fabricación de hormigones. En este contexto, se realiza un estudio de la bibliografía que se presenta mediante un breve estado del conocimiento sobre la procedencia, propiedades, posibles inconvenientes y sus aplicaciones a la fecha.

2.2.1 Fabricación del Acero

El acero es un producto aplicado en muchas industrias debido a su alta resistencia, moldeabilidad y versatilidad, además que se puede reciclar de forma repetida. Según la Asociación Mundial del Acero, la producción mundial de acero crudo alcanzó los 1.662 millones de toneladas en el año 2014, con un incremento del 1,2% en comparación con la producción del 2013. En la Figura 2.2 se muestra la producción mundial anual del acero desde el 2008 hasta el 2014, pudiéndose observar que esta producción sigue el esquema parecido al visto en la economía global (no la local de ámbito español o europeo), donde el mayor año de crisis fue en el año 2009, la subida en el último año (2014) ha sido moderada.

Así mismo, en la citada figura se muestra el ranking de la producción mundial del acero en el 2014. Aunque la UE tuvo un crecimiento moderado del 2013 al 2014, España supuso una disminución en su producción del 0,6%, sin embargo, se mantiene como el decimosexto productor mundial de acero. Se puede observar también, que la mayor producción se encuentra en Asia Oriental, tan solo el 64% del total de la producción se produce en 3 países de este continente.

El acero se obtiene a partir de dos materias primas, el arribo (procedente del Horno Alto) y la chatarra. Las propiedades del acero varían en función del contenido de carbono y otros elementos como el manganeso, cromo, silicio, etc; con los que se combinan las materias primas. El convertidor de Oxígeno (BOF) y el horno de arco eléctrico (EAF) son los dos métodos más comunes mundialmente utilizados para la producción del acero.

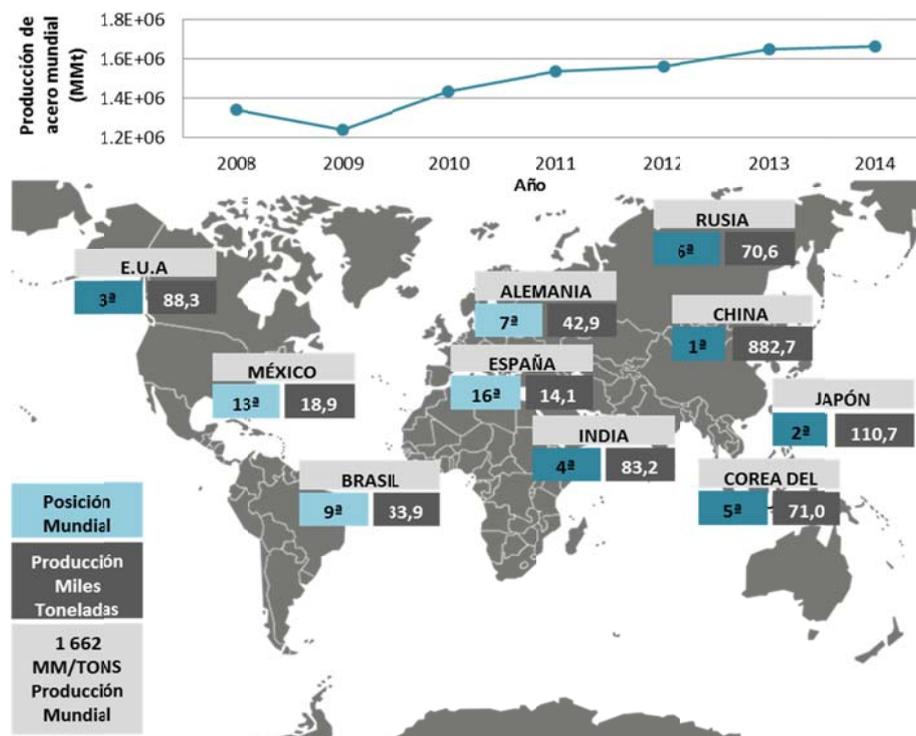


Figura 2.2: Ranking producción mundial de acero (datos Worldsteel Association, 2014)

En la Tabla 2.1 se presentan los porcentajes de la producción dependiendo del método para los países presentados en la figura 2.2, con letra cursiva se muestran los tres productores principales de la UE (se introdujo Italia). En el 2013, el 60,1% de la producción en la Unión Europea fue con el convertidor de oxígeno, mientras que, el 39,9% correspondió al horno de arco eléctrico. Los mayores productores de acero por medio del horno de arco eléctrico en la Unión Europea, son Italia y España, con una producción del 71,8% y 70,5%, respectivamente.

PAIS	EAF	BOF	PAIS	EAF	BOF
<i>Italia</i>	71,8	28,2	China	8,8	91,2
<i>España</i>	70,5	29,5	Japón	22,5	77,5
<i>Alemania</i>	31,6	68,4	Corea del Sur	39,0	61,0
EUA	60,6	39,4	India	68,4	31,5
México	70,7	29,3	Rusia	30,2	66,9
Brasil	25,1	73,3	Irán	86,9	13,1

Tabla 2.1: % producción acero 2013 dependiendo tipo horno (datos Worldsteel Association, 2014)

2.2.2 Horno de Arco Eléctrico

El Horno de Arco Eléctrico fue desarrollado por el francés Paul Héroult en EUA en 1907. Estos hornos eran utilizados en la segunda guerra mundial para la producción de aleaciones de acero, fue después cuando la fabricación del acero por este método se comenzó a expandir, debido al bajo coste en relación a la capacidad de producción y calidad superior. Como se mencionó anteriormente la Unión Europea representa el 39,9% de la producción total de acero, siendo 452 millones de toneladas durante el 2013 mediante este el horno de arco eléctrico.

Por medio de la Figura 2.4 se muestra la repartición de este porcentaje en la Unión Europea durante ese año. De acuerdo al Worldsteel Association, Italia es el primer productor de la UE, seguido por Alemania y en tercer lugar se encuentra España, produciendo un total de 17,282, 13,459 y 10,042 millones de toneladas, respectivamente.

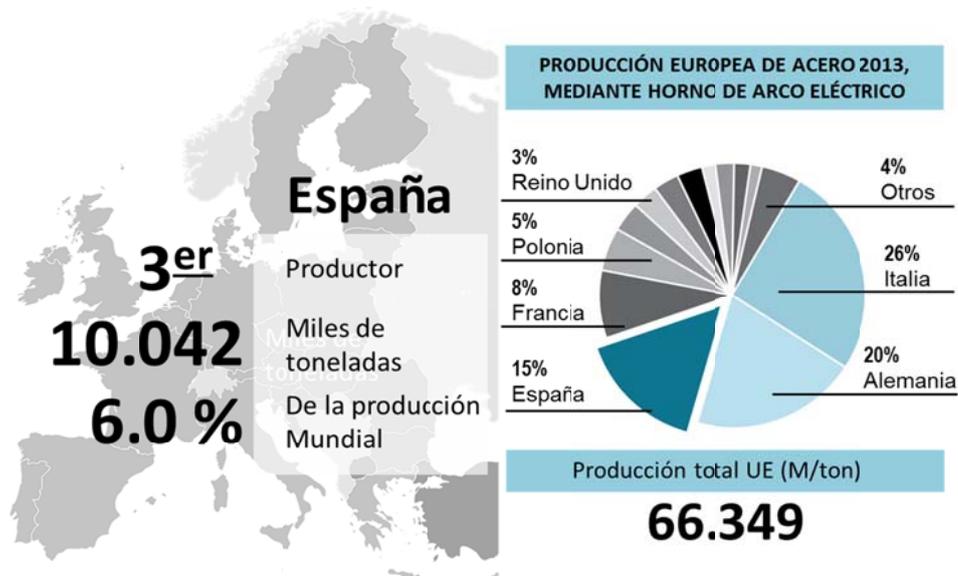


Figura 2.3: Producción Europea de acero EAF 2013 (datos Worldsteel Association, 2014)

Por otro lado, en la Figura 2.4 se muestra la localización de las acerías de Horno de Arco Eléctrico en España. Como puede observarse la mayoría de ellas se encuentran ubicadas en el norte del país (País Vasco) siendo ahí su mayor producción, seguidas por Cataluña y Andalucía.



Figura 2.4: Acerías de Horno de arco eléctrico (EAF) en España (datos UNESID, 2013)

El proceso de fabricación se representa en la Figura 2.5, el cual se divide en dos fases: la primera de fusión y la segunda de afinado (mayor pureza del material). La primera consiste, como su nombre lo indica, en fundir mediante tres electrodos de grafito (aplicación de corriente eléctrica) la chatarra con los agentes reactivos y escorificantes. El horno se llena poco a poco hasta completar su capacidad. En esta fase se lleva a cabo la oxidación (eliminación de impurezas de manganeso y silicio), la desfosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas.

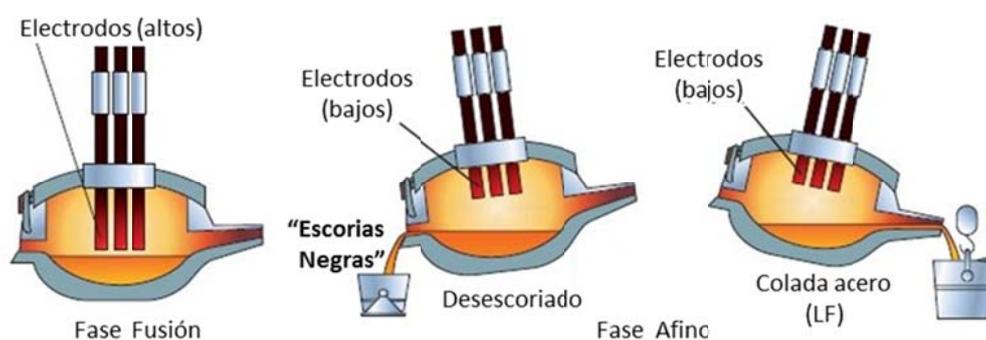


Figura 2.5: Proceso de fabricación del Horno de Arco Eléctrico (a partir de Villaverde, 2009)

Después continúa la fase de afinado que a su vez se divide en dos etapas, primeramente, se analiza la composición del baño fundido para después alimentar el horno con oxígeno puro, cal y cal dolomítica. Así pues se genera la oxidación del hierro (FeO) y éste a su vez oxida al manganeso y silicio, generando reacciones altamente exotérmicas lo que produce un aumento brusco en la temperatura y por ende la reducción del consumo energético. De esta manera, los

óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar parte de escoria que cubre el líquido fundido.

Una vez oxidados el silicio y gran parte del manganeso, la escoria presenta un alto porcentaje de FeO libre, por lo que se agrega carbón en polvo para su reducción. Esto genera monóxido de carbono, gas que al desprenderse del líquido facilita la uniformización de la composición, la eliminación de gases y la penetración de la escoria en los electrodos incrementando la eficiencia energética.

La reducción de la ebullición del líquido fundido es un indicador de que la mayor parte de carbono se ha oxidado y la presencia de cal asegura la eliminación del fósforo. De esta manera y a través de estas reacciones se produce lo que se conoce como **escoria negra u oxidante** (figura 2.6a), de colores muy oscuros, con aspecto poroso y morfología irregular y fractura puntiaguda.

Finalmente, la segunda etapa de afino consiste en vaciar el acero en un horno cuchara, donde se termina de ajustar la composición del acero y darle la temperatura adecuada, con la finalidad de obtener un metal de bajo contenido en oxígeno y de eliminar la mayor parte de azufre. Es aquí donde el líquido fundido se cubre inmediatamente con una **escoria blanca o reductora** (figura 2.6b), consiguiendo de esta manera la desoxidación, desulfuración (minimizar la presencia de azufre en el acero) y descaburación del líquido fundido. Antes de colar el líquido fundido se elimina esta escoria blanca [Hernández, 2007].

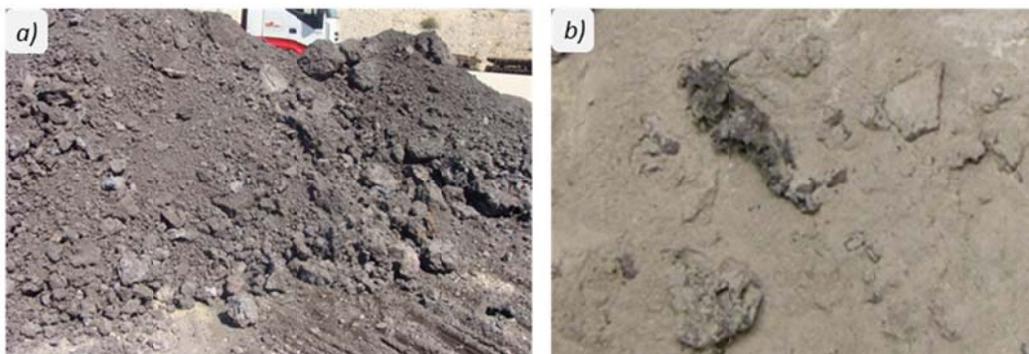


Figura 2.6: a) Escoria negra y b) Escoria blanca (fuente: Hernández, 2007)

Bien pues, las **escorias negras** están compuestas principalmente por hierro, calcio, silicio y aluminio, mientras que las escorias blancas poseen una cantidad alta de finos, provenientes del fenómeno de pulverización del silicato bicálcico durante el enfriamiento de la escoria, compuestas de calcio, silicio y bajo contenido de hierro [Amaral, 1999]. En general, se calcula que aproximadamente la cantidad de escoria producida, es proporcional a la cantidad de acero producido, siendo así un ratio de producción de **escoria negra de 125 a 180 kg/t acero** y de escoria blanca de 35 kg/t acero [Oliver, 2012]. En lo que sigue se incide en las escorias negras que son las tratadas en este documento.

2.3 ESCORIAS NEGRAS EAF

2.3.1 Propiedades

Las escorias negras poseen propiedades *físico-mecánicas* muy particulares que las hacen interesantes para su uso en aplicaciones constructivas. En la Tabla 2.2 se presentan algunas de las propiedades correspondientes a la escoria negra en comparativa con piedras naturales de altas prestaciones como el basalto y granito, de uso común en la construcción e ingeniería civil [Hernández, 2007; Manso, 2001 y Arribas, 2011]. Destacan entre ellas su alta densidad, desgaste y coeficiente de pulido acelerado, esto responde a su alta rugosidad y porosidad en su superficie.

PROPIEDAD	ESCORIA NEGRA	BASALTO	GRANITO
Densidad aparente (g/cm ³)	3,50	2,95	2,70
Forma (% partículas alargadas)	< 10	---	< 10
Coeficiente de absorción de agua (%)	0,3 – 6,0	< 0,5	0,3 – 1,2
Heladicidad (%)	< 0,3	< 0,8	0,8 – 2,0
Incremento de volumen (% vol)	1 - 5	---	---
Desgaste de los Ángeles (%)	12 - 20	9 - 20	12 – 27
Resistencia a compresión (MPa)	> 130	> 250	> 160
Coeficiente de pulido acelerado	54 - 57	45 - 56	45 – 58
Adhesividad a matriz (%)	> 90	---	> 90

Tabla 2.2: Propiedades físico-mecánicas de las escorias negras

Por otro lado, la *composición química* de la escoria puede variar dependiendo de la procedencia en referencia a las acerías. Sus principales diferencias son por la utilización de dolomita frente a la cal y la disolución del refractario, produciendo un aumento de la magnesia (MgO) en la escoria. Mientras que los valores de la cal libre (CaO) dependen de la cantidad de cal que se añade en el proceso.

En la Tabla 2.3 se presentan valores típicos de la composición química de la escoria negra según diferentes autores. En general, entre el 75% y 90% de la composición química de las escorias negras está compuesta de óxidos de calcio, hierro, silicio y aluminio, en menores cantidades se encuentran óxidos de magnesio y manganeso.

La escoria oxidante posee un índice de basicidad cal/sílice de orden 2,5 a 3,0 unidades, y en ella la presencia de cal libre es generalmente muy pequeña. Por otro lado, una parte de la magnesia total está fijada o combinada en otros componentes, sean férricos o sean silicatos y aluminatos; el resto queda como magnesia libre amorfa (no hidratante) o cristalina (periclusa hidratante), la cual aparece en proporciones entre 0% y 5%.

Elemento	España ¹	España ²	Italia ³	Brasil ⁴	Alemania ⁵	EUA ⁶
CaO	25,0 – 33,0	21,8	24,2 – 29,5	30,0 – 35,0	32,0	35,0 – 60,0
Fe ₂ O ₃	32,0 – 46,0	37,6	37,2 – 44,8	25,0 – 35,0	31,0	15,0 – 30,0
SiO ₂	10,0 – 16,0	18,3	10,1 – 14,7	15,0 – 20,0	15,0	9,0 – 20,0
Al ₂ O ₃	5,0 – 10,0	8,3	5,7 – 7,2	3,0 – 9,0	4,0	2,0 – 9,0
MgO	3,3 – 6,4	6,1	1,9 – 4,6	8,0 – 12,0	10,0	5,0 – 15,0
MnO	2,0 – 6,5	4,4	5,1 – 5,7	---	4,0	3,0 – 10,0
Cr ₂ O ₃	1,0 – 2,5	1,8	2,5 – 4,1	---	---	---

1. Vázquez y Barra, 2001 2. Etxeberria et al, 2010 3. Pellegrino y Gaddo, 2009 4. Geyer et al., 1997
5. Hernández, 2007 6. Wang et al., 2010

Tabla 2.3: Composición química de la escoria según diferentes autores (% peso)

Finalmente, el contenido de hierro de la escoria está en torno al 20% - 30% y se encuentra en todos sus estados posibles de oxidación, en forma de Wüstita (Fe⁺²), Hematites (Fe⁺³) y Magnetita (Fe^{+8/3}). Su presencia proporciona a la escoria negra una parte muy importante de sus propiedades específicas, como su alta densidad, resistencia al desgaste y a la abrasión [Manso, 2001].

Así pues, dichos compuestos definen su **composición mineralógica** presente en la Tabla 2.4, la cual se divide en tres grupos, óxidos de hierro, silicatos y compuestos de calcio y magnesio. No obstante, la composición mineralógica dependerá de la procedencia de la escoria.

ÓXIDOS DE HIERRO		SILICATOS		COMPUESTOS DE CALCIO Y MAGNESIO	
Wüstita	FeO	Larnita	Ca ₂ SiO ₄	Portlandita	Ca(OH) ₂
Hematites	Fe ₂ O ₃	Merwinita	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	Calcita	CaCO ₃
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Gelenita	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Eventualmente:	
		Clinoenstatita	MgSiO ₃	Cal libre	CaO
		Bredigita	(Ca, Fe, Mg) ₂ SiO ₄	Periclusa	MgO

Tabla 2.4: Composición mineralógica, constituyentes cristalinos [Arribas, 2011]

En la Tabla 2.5 se describen algunas de las fases minerales presentes en una escoria tipo en conjunto con sus componentes más importantes para cada caso. Se observa que el silicato bicálcico (C₂S) posee una destacada presencia en la escoria, sea por su formación a altas temperaturas o por la descomposición parcial del silicato tricálcico (C₃S) durante el enfriamiento, el cual también produce cal libre. Esta cal libre está distribuida uniformemente en la matriz compacta de la escoria cristalina y no produce problemas de expansión [Bakker, 1988].

FASE MINERAL	% EN PESO	PRINCIPALES COMPONENTES, MOLAR %
Silicato Bicálcico	30 – 60	CaO (64), SiO ₂ (32), P ₂ O ₅ (1-3)
Silicato Tricálcico	0 – 30	CaO (70-73), SiO ₂ (23-25)
Cal libre	0 – 10	CaO (75-90), MnO (2-10), FeO (5-15)
Wüstita	10 – 40	FeO (45-55), MnO (10-20), CaO (10-30), MgO (5-20)
Ferrita dicálcica	5 – 20	CaO (60-65), Fe ₂ O ₃ (15-45)
Fase Magnética	0 – 20	Fe ₃ O ₄ (50-80), Fe ₂ O ₃ (10-40)

Tabla 2.5: Fases minerales y componentes principales [Manso, 2001; Luxán, 1995]

Los problemas pueden provenir de la cal no completamente disuelta en la matriz, en partículas groseras o expuestas a la porosidad accesible. La fase magnética presente proviene del enfriamiento del Fe₃O₄ producido en estado líquido a 1600 °C, que se asocia con el Fe₂O₃ al descender la temperatura formando una fase sólida única con ambos compuestos químicos. A ella se asocia algún otro óxido metálico.

2.3.2 Inestabilidad volumétrica de la escoria negra

A pesar de las buenas cualidades de las escorias negras, están rodeadas de una cierta problemática sobre su posible inestabilidad volumétrica. La porosidad y el tamaño granulométrico de la escoria negra, así como el tamaño del grano de cal libre en éstas, son algunas de las causas que influyen en su resistencia al hinchamiento. Por otro lado, la inestabilidad volumétrica de las escorias se debe a la presencia de compuestos que en presencia de agua y/o reacción con los compuestos del cemento experimentan un aumento considerable de volumen.

Otro factor con menor influencia sobre la resistencia al hinchamiento, desde el punto de vista mineralógico según Amaral, 1999, es que dependiendo del enfriamiento a que es sometido el material, puede ser más o menos expansivo. Se sabe que cuando se deja enfriar lentamente un material a altas temperaturas y en estado líquido, los elementos se agrupan ordenadamente formando estructuras cristalinas estables. Pero cuando la escoria se enfría bruscamente, los elementos no se agrupan de forma ordenada sino formando compuestos amorfos. La importancia de detectar el contenido de materia amorfa está en que tiende a reordenarse, lo que les confiere las propiedades de reactividad hidráulica (reacciona con el agua) y reactividad puzolánica (reacciona con el hidróxido cálcico). Bien pues, los siguientes compuestos que pueden ser muy peligrosos para el hormigón porque reaccionan con facilidad, generando la inestabilidad volumétrica son los siguientes:

Fases silicato bicálcico: Debido a un cambio alotrópico del silicato bicálcico durante el enfriamiento de la escoria a temperaturas entre los 500 °C y 400 °C, la forma cristalina beta (β) se transforma a la forma gamma (γ) con un incremento en el volumen del 10% al 12% en dicha

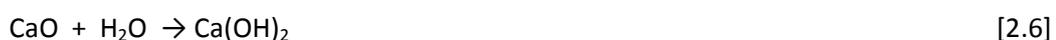
fase. La transformación finaliza una vez se ha enfriado la escoria a temperatura ambiente. Esto hace que la escoria negra se fracture durante el enfriamiento de modo que no se constituye en una roca maciza sino cuarteada, facilitando su manipulación, molienda y machaqueo. La mayor parte de la larnita no desarrolla este cambio y sin embargo contribuye a la resistencia del material.

Oxidación y corrosión del hierro: En general, la mayor parte de las escorias contienen partículas de hierro en su composición, las cuales al sufrir procesos de corrosión y oxidación pueden aparecer en forma de iones Fe^{+2} y Fe^{+3} . El aumento de volumen del hierro varía dependiendo del tipo de reacción que se produzca (oxidación ec. 2.1-2.3 y corrosión ec. 2.4-2.5). Los óxidos de hierro experimentan un menor aumento de volumen, en comparación con los hidróxidos de hierro dan volúmenes del orden de 4 veces mayor, el peor de los casos es el trióxido de hierro con un aumento de hasta casi 7 veces mayor que el elemento de hierro simple [Mehta y Monteiro, 1994].



Hidratación de la cal libre: Las elevadas adiciones de cal necesarias para la producción de aceros de alta calidad son la razón de que la escoria negra tenga un elevado contenido de CaO. En las escorias enfriadas la cal está ligada principalmente en forma de silicatos (C_2S y C_3S), ferritos y aluminatos; dependiendo del procedimiento de producción también puede contener pequeñas cantidades (hasta el 10%) de cal libre no ligada, la cual puede aparecer como cal libre expulsada o cal residual no diluida [Piret et. al., 1982]. Así pues, en presencia de humedad la cal libre puede hidratarse y producir un deterioro de la estructura de la escoria por las tensiones internas que pueden generarse, como consecuencia se provocan pequeños efectos “cuña” que rompen la zona que rodea los nódulos de cal.

A parte del contenido de cal libre y de su forma de presentación, es de gran importancia la porosidad haciendo más factible la accesibilidad de la cal libre para las reacciones que ocasionan el aumento de volumen. Las reacciones que se producen son dos: primeramente la hidratación de la cal libre y después la carbonatación, de acuerdo a las ecuaciones 2.6 y 2.7, respectivamente.



Los resultados de investigaciones previas han mostrado que las escorias con un contenido de poros del 2% vol. pueden tener un contenido de 8% de $\text{CaO}_{\text{libre}}$ y un 6% vol. de poros soportan un 4% de $\text{CaO}_{\text{libre}}$ sin causar el aumento de volumen [Manso, 2001]. Por el contrario, con una escoria compacta, que no posea poros y grietas, puede hidratarse únicamente la cal libre alcanzable por la superficie [Piret et. al., 1982; Kollar y Gunkel, 1983].

A través de estas experiencias, las normas alemandas han fijado valores límites para la construcción de carreteras, de igual manera, siempre se deben realizar pruebas de expansividad acelerada que garantice una dilatación máxima. Por ejemplo, las escorias utilizadas en capas portantes sin aglutinante, no deben sobrepasar el 7% de $\text{CaO}_{\text{libre}}$ y el aumento de volumen debe ser $\leq 5\%$ (ensayo de vapor de agua). En capas portantes de asfalto y de cobertura es permitido hasta un 4% de $\text{CaO}_{\text{libre}}$ con un aumento del $\leq 2.5\%$ y 1%, respectivamente [Manso, 2001].

Hidratación de la magnesia libre: Debido a la cal dolomítica y el desgaste del revestimiento del horno en el proceso de afino, existe la presencia de la magnesia libre (MgO) no ligada en forma de periclasa, así como de wüsitita de magnesio y hierro (Fe_2Mg)O (más del 70% en peso de MgO). La fase más reactiva es la periclasa que induce el peligro de expansión potencial lenta o diferida en el tiempo. Esto se debe a que los cristales reaccionan con el agua a temperatura ambiente, y a diferencia de la cal libre, en períodos a largo plazo Esta reacción de hidratación lenta forma hidróxido de magnesio (brucita) de acuerdo a la ecuación 2.8. Sin embargo, esta magnesia libre es capaz de fijar metales pesados o con peligro medioambiental en forma de espinelas en combinación con la alúmina [Frías et. al., 2002]. De acuerdo a Manso, 2001 la influencia negativa de la MgO libre solo afecta en las escorias si su contenido supera los 4% en peso.



Debido a estas posibles problemáticas de inestabilidad se han desarrollado métodos que recoge Mancio, 2001, para el correcto tratamiento de las escorias negras, con la finalidad de su estabilización previa a ser utilizadas en la fabricación de otros materiales. Esto se logra mediante la hidratación de la cal y magnesia libres [Best, 1987; Frías et. al., 2010; González, 1999; Kuehn, 2009; Manso, 2001; Piret et. al., 1988].

- Envejecimiento de la escoria estocada en pilas expuestas a la intemperie durante un cierto período de tiempo, su objetivo la hidratación del cal y magnesia libre. Método históricamente más utilizado, períodos entre los 0 y 12 meses. El volteo de las escorias en los acopios se revela como un remedio eficaz para su estabilización para conseguir un producto homogéneo. Debido a que la simple disposición de las escorias sin volteos añadidos sólo se estima útil en los primeros 20 cm de profundidad. Se ha demostrado que, después de 90 días de exposición a la intemperie en época invernal la escoria removida periódicamente posee una expansividad potencial inferior al 0,5% que

resulta ser admisible para todas las aplicaciones posteriores posibles para dicho material, en especial para la elaboración de hormigón.

- Así mismo el enfriamiento rápido de la escoria mediante la aspersión de agua, evita la desintegración y garantiza la maduración de estas entre las 72 horas y 45 días. Actualmente, algunas acerías garantizan expansividades menores al 0,5% tras dos días de enfriamiento, volteo y humectación.
- Otro método es el envejecimiento acelerado de la escoria a través de la cura al vapor, teniendo un aumento significativo de los costes, este método es muy utilizado en Japón.
- Tratamiento de la escoria líquida a través de la adición de materiales sílicosos e inyección de oxígeno en una cuchara de escoria separada del proceso de fabricación de acero, de modo que no influya la calidad del producto de acero.
- La adición de arena y oxígeno a la escoria líquida generando un calor adicional que mantiene líquida la escoria y disuelve la arena. La reacción es que la relación CaO/SiO_2 se reduce y la cal libre reacciona químicamente estabilizándose. La composición química de la escoria también puede alterarse a través de fragmentos de vidrio en combinación con la inyección de oxígeno.

2.4 ESTUDIOS Y APLICACIONES DE LA ESCORIA NEGRA A LA FECHA

2.4.1 Áridos Siderúrgico de Horno de Arco Eléctrico

La utilización de las escorias negras se ha planteado a partir de su transformación en producto granular estable mediante procesos de machaqueo, separación magnética y cribado. El producto final resultante se conoce con el nombre de *árido siderúrgico de horno de arco eléctrico*. La aplicación de dicho material es en función de sus propiedades y características, además de su estabilidad volumétrica, las cuales han sido objeto de estudio por parte de diferentes autores. Luxán et. al., 2000, observaron que los áridos muestran textura y morfología diferente dependiendo de su procedencia (en algunos casos puede ser más porosa y en otros más densa y compacta) y también se pueden encontrar partículas con alto contenido de hierro [Ortiz et. al., 1996]. Por otro lado, define que su color negro y forma son similares en todos los casos y que las características microestructurales están directamente relacionadas con la densidad y las diferentes capacidades de absorber el agua, al tener mayor densidad presentara mayor contenido de hierro.

Igualmente, el porcentaje de la composición química dependerá de su procedencia, en general, entre el 87% y 92% se compone de óxidos de Ca, Fe, Al, Si, Mg y Mn. Esta composición

no se ve afectada por el tamaño del árido, debido a que los intervalos granulométricos muestran composiciones similares [Frías y Sánchez, 2004; Frías et. al., 2010; Luxán et. al., 2000; Ortiz et. al., 1996; Proctor et. al., 2000; Wang et. al., 2010]. Es de suma importancia la presencia de CaO y MgO (cuando el porcentaje del último es mayor del 2% aparece como periclasa) debido a que estos componentes pueden ser potencialmente expansivos al hidratarse, sí los contenidos son bajos, presentan estabilidad volumétrica [Frías y Sánchez, 2004; Luxán et. al., 2000].

El contenido de CaO de los áridos estudiados por Frías y Sánchez, 2004, no presentan actividad puzolánica y el contenido se mantiene prácticamente constante después de 90 días de ensayo. Así mismo, Frías et. al., 2010 confirman que el proceso de envejecimiento produce una reducción efectiva en los contenidos de los compuestos expansivos durante los primeros 45 días, estabilizándose a partir de ese momento.

En relación a su composición mineralógica, presenta óxidos de hierro en forma de plusita, magnetita, hematita, silicatos (larnita, merwinita y gehlenita), la cantidad también depende de la procedencia y de cada muestra (árido) [Frías y Sánchez, 2004; Luxán et. al., 2000]. Por otro lado, Proctor et. al., 2000 mediante sus resultados indican que los metales están estrechamente unidos y no se liberan de la matriz, incluso bajo condiciones ácidas. Así mismo, de análisis de agua procedentes de lixiviaciones muestran que dichos áridos muestran una baja concentración de metales y todos los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites [Proctor et. al., 2000; Ortiz et. al., 1996].

Luxán et. al., 2000 y Frías et. al., 2010 no observan problemas de desintegración, rotura e inestabilidad, resumiendo su posible uso como material en el sector de la construcción. Se realizó también, una evaluación técnica según la cual la alta angulosidad y resistencia al impacto y pulimiento de la escoria negra le confieren unas propiedades idóneas para su utilización como árido en mezclas bituminosas para capa de carreteras [Ortiz et. al., 1996].

2.4.2 Utilización en la industria del cemento

Una de las aplicaciones propuestas es su uso para la *fabricación de cemento*, el control de calidad del material para esta aplicación, es mediante la determinación de metales presentes en el clínker elaborado, ensayo de expansión y su índice de actividad puzolánica, así como la resistencia a compresión a 28 días [Geyer et. al., 1997; Muhmood et. al., 2009; Murphy et. al, 1997; Sawadde, 1997; Sheen et. al., 2013; Shi, 2004]. Según Geyer et. al., 1997, al sustituir un 35% de cemento por escoria la expansión es nula y el índice de actividad puzolánica de un 70%, así mismo, define que cuando se utiliza granulometría inferior a 0,074 mm no tiene afectación en la resistencia a compresión (24,3 MPa). Sin embargo, para que la carbonatación sea menor y en consecuencia la durabilidad del material sea buena es recomendable una sustitución del 5% en la misma granulometría.

Por otro lado, Muhmood et. al., 2009 y Sheen et. al., 2013, confirman que es necesario el tratamiento de envejecimiento de la escoria (hidratación) para que pueda utilizarse como adición en el cemento. Ambos concluyen que se puede sustituir hasta un 30% de cemento por escoria sin afectar la resistencia a compresión (50 MPa a 28 días, Muhmood et. al., 2009). Finalmente, Shi, 2004, muestra que las ventajas de un cemento con 35% de Clinker de cemento, 30% de escoria negra, 30% de escoria de alto horno y 5% de Clinker son: bajo coste de energía, mayor resistencia a la abrasión, desarrollo de mayores resistencias con el tiempo en comparación con el cemento Portland. No obstante, tiene la desventaja en el tiempo de fraguado y baja resistencia inicial.

2.4.3 Firms de Carreteras

Las escorias negras se han empleado, tradicionalmente en *firms de carretera*, debido a su porosidad, angulosidad y falta de finos puede resultar un material incómodo durante los trabajos de extensión y compactación, por lo que suelen combinarse con áridos naturales para mejorar estos aspectos. Las experiencias previas existentes, muestran que un adecuado tratamiento y una clasificación y selección de las escorias en planta, pueden proporcionar sin problemas áridos de calidad para ser utilizados en la consolidación de suelos, capas granulares de carreteras, plataformas de vías de comunicación, caminos o vías férreas [Ministère Wallon, 1995; Losañez, 2005; Luxán, 1995; Rubio y Carretero, 1991; Thomas, 1983].

Ello responde a que estos áridos poseen un buen coeficiente de los Angeles y un excelente coeficiente de pulimiento acelerado con resistencia al desgaste y abrasión que los hace especialmente utilizables para estas aplicaciones [Jones, 2001; Piret et. al., 1982]. Por otro lado la composición química y el carácter básico de los áridos garantizan una buena adhesividad con los betunes convencionales y en mezclas bituminosas [Pasetto y Baldo, 2011; Piret et. al., 1982; San José y Uría, 2000].

2.4.4 Otras Aplicaciones

Existen *otras aplicaciones* puntuales entre ellas, su empleo en obras fluviales (con tamaño de partículas superior a 10 mm) como escollera fina de relleno, cubierta después con escollera más gruesa [Geiseler y Schlösser, 1986]. En dicho empleo, la estabilidad volumétrica es rigurosamente necesaria, así como la inocuidad de sus compuestos solubles en agua, no obstante, este ha sido un empleo minoritario y puntual. Otro fue un intento de usarlo mezclado con restos de incineración de residuos urbanos [Bäverman et. al., 1997], aplicación poco habitual de la escoria negra, entre los que destaca por su originalidad. Así mismo, se estudió como material fijador de fósforo en la depuración de aguas o fertilizantes [Vallet et. al., 2002]. Finalmente, Bantsis et. al., 2012 fabricaron morteros con árido siderúrgico de escoria negra y de escoria blanca, así como, morteros con desechos de llantas. Con la finalidad de comparar la capacidad de absorción electromagnética de rayos X (frecuencia entre 8 y 12 GHz). Los resultados mostraron, que los correspondientes a los morteros con áridos

metalúrgicos obtienen una eficacia mayor al blindaje que los fabricados con desechos de llantas. Así mismo, presentaron aumentos en las resistencias mecánicas, contrario a lo observado por los morteros con desechos de llantas.

2.4.5 Fabricación de Hormigones Siderúrgicos

Finalmente se presta mayor importancia en su aplicación como árido para la fabricación de hormigones debido a las aplicaciones propuestas en la presente Tesis Doctoral. Existen numerosos estudios para este tipo de aplicación, en todos los casos los autores han utilizado los áridos siderúrgicos envejecidos (exposición a la intemperie y/o riego de agua). De dichos estudios se pueden observar un gran número de dosificaciones posibles mediante la sustitución de árido calizo por árido siderúrgico (diferentes porcentajes), desde su sola sustitución en la fracción fina (arena) [Akinmusuru, 1991; Amaral, 1999; Bäveman y Aran, 1997; Qasrawi et. al., 2009] o en la fracción gruesa [Abdulaziz et. al., 1996; Abu-Eishah et. al., 2012; Akinmusuru, 1991; Amaral, 1999; Beshr et. al., 2003; Jigar, 2006; Lauber, 2009; Maslehuddin et. al., 2003; Netinger et. al., 2010; Pellegrino y Gaddo, 2009], hasta la sustitución de ambos [Arribas, 2011; Manso, 2001; Manso et. al., 2006; Papayianni y Anastasiou, 2010; Polanco et. al., 2011; Vázquez y Barra, 2001].

Otros autores fabrican hormigones con árido siderúrgico de escoria negra en combinación con árido siderúrgico de escoria blanca [Losañez, 2005; Manso et. al., 2011; Srinivas et. al., 1987], así mismo, incluyen la adición de otros materiales como aditivos aireantes [Jigar, 2006; Pellegrino y Gaddo, 2009], cenizas volantes, activados alcalino (polvo de cal, cal apagada) y humo de sílice [Abu-Eishah et. al., 2012; Matsunaga et. al., 2009] y arenas de fundición [Etxeberria et. al., 2010]. En general, los estudios muestran que las propiedades mecánicas de los hormigones siderúrgicos obtenidas fueron similares o mayores a las correspondientes a un hormigón convencional, aun haciendo la sustitución de la fracción fina.

Trabajabilidad

Los hormigones fabricados con bajos porcentajes de áridos siderúrgicos obtienen un asentamiento similar a los hormigones convencionales, sin embargo, el alto contenido de este tipo de áridos reduce considerablemente la trabajabilidad del hormigón [Etxeberria et. al., 2010]. Según Manso, 2001, cuando un hormigón es fabricado únicamente con árido siderúrgico, denota una falta de finos, creando un hormigón con exceso de huecos de tamaño y aspecto inadmisibles. Así mismo, menciona que la porosidad y angularidad con bordes afilados de los áridos siderúrgicos, conducen a la disminución de la trabajabilidad, especialmente cuando el árido fino tiene esta morfología [Manso et. al., 2011].

No obstante cuando se realizó la misma dosificación cambiando el árido fino siderúrgico por calizo (100% árido grueso siderúrgico, 100% árido fino calizo) se observa que la trabajabilidad se reconduce a parámetros correctos y admisibles. Mediante estas

observaciones, llego a la conclusión que un hormigón puede fabricarse con 100% de árido grueso siderúrgico y hasta un 65% de árido fino siderúrgico con el 35% restante de árido calizo. Dado que al incluir árido fino siderúrgico, la fracción fina no posee el exceso de finos de la arena caliza, ajustándose a una consistencia blanda.

Por otro lado, el principal factor que afecta la trabajabilidad es el contenido de agua en la mezcla, por lo que una buena dosificación de agua representa un factor de docilidad, pero un exceso en la proporción trae consigo una disminución de las cualidades intrínsecas del hormigón: resistencia, retracción, porosidad, impermeabilidad. Por lo tanto, si se desea conservar ésta, es posible recurrir al empleo de aditivos fluidificantes que permitan incrementar las cualidades de plasticidad, fluidez y docilidad, disminuyendo la cantidad de agua empleadas, lo que provocaría un aumento en la resistencia [Dreux, 1981; Neville, 1995].

Densidad

Cuando se hace la sustitución de los áridos siderúrgicos en la fracción fina, la densidad del hormigón muestra un aumento, ya que el peso específico de estos áridos es mayor. Sin embargo, el aumento de la densidad es pequeño, hasta un 5% en comparación a la de un hormigón convencional, por lo que no puede llegar a ser clasificado como un hormigón pesado [Amaral, 1999; Qasrawi et. al., 2009].

Lo mismo sucede cuando se hace la sustitución solo en la fracción gruesa, con valores entre los 2600 y menores a 2800 kg/m³ [Amaral, 1999; Etxeberria et. al., 2010; Jigar, 2006; Maslehuddin et. al., 2003; Matsunaga et. al., 2009; Netinger et. al., 2010]. En general, los hormigones siderúrgicos con sustitución tanto en la fracción fina como gruesa muestran un aumento máximo del 25% en la densidad [Arribas, 2011; Manso, 2001; Papayianni y Anastasiou, 2010]. No obstante, Abu-Eishah et. al., 2012 muestra en el caso de un hormigón de 50 MPa (sustitución en la fracción gruesa) con la adición de cenizas volantes un valor de 2810 kg/m³. Por encima de estos valores, con la adición de aditivo aireante, Pellegrino y Gaddo, 2009 fabricaron hormigones siderúrgicos (fracción gruesa) con densidades promedio de 2950 kg/m³. Estos dos últimos casos, muestran la posibilidad de obtener valores de densidad dentro de los límites definidos para fabricar "hormigones pesados".

Resistencias mecánicas

Comúnmente, la resistencia del hormigón se considera como su propiedad más valiosa, aunque en muchos casos, otras características como su durabilidad y permeabilidad, pueden tener la misma o mayor importancia, dependiendo de la aplicación al que el hormigón vaya enfocado. Sin embargo, la resistencia suele dar una visión global de la calidad del hormigón, debido a que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratada, así como de la interface árido-pasta. Por otra parte, la resistencia es casi

siempre, un elemento vital en el diseño estructural y específico para cumplir con los propósitos de su aplicación.

El árido grueso tiene cierta influencia sobre la resistencia del hormigón, dependiendo de sus características físicas, químicas y mineralógicas. El estrés en el que se desarrollan las grietas cuando se aplica una carga en hormigón depende en gran medida de las propiedades del árido grueso: una grava suave conduce a grietas en tensiones más bajas que de una roca triturada, áspera y angular. Esto probablemente se deba a que la unión mecánica es influenciada por las propiedades superficiales y de forma del árido grueso [Jones y Kaplan, 1957].

De los estudios mencionados anteriormente, según Bäverman y Aran, 1997, que sustituyó la arena caliza por arena siderúrgica, las resistencias a compresión y flexotracción fueron similares a las de un hormigón convencional. Por otro lado, Qasrawi et. al., 2009 concluyeron que para que la resistencia a compresión aumentara 1,1 a 1,3 veces y la resistencia a tracción 1,4 a 2,4 veces en comparación con un hormigón convencional, la sustitución debería de ser entre el 15% y 30% para el primer caso y del 50% para el segundo del árido fino. No obstante, cuando se hace la sustitución en la fracción gruesa, las resistencias a compresión y los módulos de elasticidad son mayores que cuando se hace la sustitución en la fracción fina [Akinmusuru, 1991; Amaral, 1999]. Según Akinmusuru, 1991 la razón a esto puede deberse a que las partículas de la arena tienen una superficie bruta mayor disponible para reaccionar con el cemento que las partículas de grava.

Cuando la sustitución se hace en la fracción gruesa, los hormigones siderúrgicos evidencian propiedades mecánicas similares a las de un hormigón convencional, incluso con la adición de cenizas volantes y activados alcalino [Manso et. al., 2006; Matsunaga et. al., 2009; Netinger et. al., 2010]. En la Tesis Doctoral de Manso, 2001 concluye que la resistencia a compresión en tres casos de sustitución de árido calizo por siderúrgico, 100% en la fracción gruesa, 100% fracción gruesa y 50% fracción fina y 100% fracción gruesa y 65% fracción fina, es similar a la de un hormigón convencional. En cuanto al módulo de elasticidad los valores son similares para el primer caso, y tienen un aumento del 20% y 10% para el segundo y tercero, respectivamente.

Por el contrario, otros autores observan que los hormigones con áridos siderúrgicos mejoran las propiedades mecánicas en comparación a los hormigones convencionales, con un incremento del 30% al 38% en la resistencia a compresión, así como un aumento del 10% y 8% de resistencia a tracción y módulo de elasticidad, respectivamente [Etxeberria et. al., 2010; Pellegrino y Gaddo, 2009]. Maslehuddin et. al., 2003 apreció que a partir de una sustitución del 65% del árido grueso calizo por siderúrgico la resistencia a compresión es un 7% mayor al convencional. Así mismo, Beshr et. al., 2003 observa una resistencia a compresión 25% mayor y módulos de elasticidad 30% mayor cuando hace una sustitución del 100% del árido grueso calizo por siderúrgico.

Por otro lado, Abu-Eishah et. al., 2012 concluye que la inclusión de cenizas volantes y humo de sílice producen hormigones con altas resistencias en comparación con hormigones convencionales. Finalmente Papapayanni y Anastasiou, 2010 advierte un incremento del 10% en la resistencia a compresión cuando sustituye el 100% del árido grueso y hasta un 20% si además del árido grueso se sustituye el 50% del árido fino calizo por siderúrgico. Se argumentó que este comportamiento en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón, se atribuye a que la naturaleza física de los áridos siderúrgico, tales como la mayor rugosidad de la superficie, podría contribuir al desarrollo de una mayor cohesión en la interfase entre árido y pasta de cemento. Debido a que la zona de contacto entre los áridos siderúrgicos con la pasta muestra una microporsidad significativamente menor que en el caso de los áridos calizo o naturales con una elevada densidad y ausencia de fisuras u otras discontinuidades [Amaral, 1999; Arribas, 2011; Papayanni y Anastasiou, 2010; Pellegrino y Gaddo, 2009; Srinivas et. al., 1987].

La unión entre la pasta de cemento y el árido es un factor importante en la resistencia del hormigón, especialmente en la resistencia a flexión. La unión se debe, por una parte, al emplazamiento del árido y la pasta de cemento hidratada que obedece a la rugosidad del árido, una superficie más rugosa, tal como la de partículas trituradas, dan mejor adherencia. Una mejor unión también se obtiene de partículas mineralógicamente heterogéneas, suaves y porosas. Así mismo, el enlace del árido y pasta se ve afectado por otras propiedades físicas y químicas, relacionadas con la composición mineralógica y química de los áridos. La fuerza de la unión de los áridos y la pasta aumenta con la edad del hormigón [Neville, 1995].

Durabilidad

En relación a la durabilidad, se han realizado diversos estudios con una variedad de ensayos tales como: la absorción del agua, envejecimiento acelerado, posible corrosión de armaduras, carbonatación, ciclos hielo-deshielo, ciclos mojado-secado, reacción álcali-árido, ataque por sulfatos, y lixiviaciones. A continuación, se presenta un resumen del comportamiento de los hormigones siderúrgicos estudiados por los autores antes mencionados, para este tipo de ensayos. Primeramente, Maslehuddin et. al., 2003 observaron que la absorción de agua durante 48 horas de los hormigones siderúrgicos es menor en comparación a un hormigón convencional y que esta absorción disminuye con una mayor sustitución de áridos gruesos siderúrgicos por calizos. El agua absorbida por los hormigones con áridos siderúrgicos varió desde 3,64% hasta 4,51%, mientras que en el hormigón convencional era de 5,53%.

Por otro lado, los resultados para el envejecimiento acelerado de acuerdo a la normativa ASTM D-4792 (sumersión de probetas en agua con temperatura de 70 °C durante 32 días) muestran diferentes tendencias. De hormigones siderúrgicos con la sustitución del 100% en la fracción gruesa, por un lado, Pellegrino y Gaddo, 2009, observaron que tanto en el

hormigón convencional como en el siderúrgico aparecieron eflorescencias como respuesta a los hidróxidos de calcio y magnesio, siendo menores en el hormigón convencional.

Así mismo, los hormigones convencionales presentaron un aumento del 9% en la resistencia a compresión después del ensayo, contrario al comportamiento en los hormigones con árido siderúrgico con una pérdida del 5% en la resistencia. No obstante, el mismo autor, realizó un segundo ensayo con el mismo tratamiento y, posteriormente, expuso las probetas a la intemperie durante 90 días, sin sol directo o exposición a la lluvia. Dicha prueba a largo plazo mostró una especie de estabilización en las resistencias a compresión, minimizando la pérdida a 2,37%, mientras que el aumento del hormigón convencional fue similar a la prueba anterior (8,35%).

En cambio, Lauber, 2009, no solo observa aumentos del 9% en la resistencia a compresión del hormigón convencional, si no también observa un aumento del 3% en la resistencia a compresión del hormigón siderúrgico (sustitución 100% fracción gruesa), en el ensayo a 32 días de sumersión. Finalmente, Losañez, 2005, no observa deterioro alguno en ningún tipo de hormigón (ensayo 32 días de sumersión, más 90 días exposición a la intemperie, sin sol ni lluvia directa).

Al contrario a lo demostrado anteriormente, las dosificaciones con mayores aumentos en la resistencia corresponden a hormigones siderúrgicos, con sustitución en la fracción gruesa y fina. Estos aumentos se los atribuye a una mejora en las propiedades de la matriz, así como a la mejora de la resistencia del árido siderúrgico (asociable a una posible hidratación incipiente de silicatos tricalcicos y bicalcicos que mejora la adherencia del árido a la matriz) [Manso, 2001].

En relación a la corrosión de armaduras, Maslehuddin et. al., 2003 y Arribas, 2011 ensayaron probetas con armaduras embebidas en los hormigones. El primero bajo un ambiente acelerado anódico, los hormigones siderúrgicos con una sustitución a partir del 50% del árido grueso siderúrgico desempeñaron una mejor resistencia a la corrosión que un hormigón convencional, tanto en términos de tiempo, como en la iniciación de grietas y su propagación. El segundo ante la exposición en ambiente marino durante un año, en este caso los hormigones siderúrgicos (sustitución en fracción fina y gruesa) mostraron un comportamiento de corrosión similar al hormigón calizo.

Amaral, 1999 estudio la carbonatación por el método acelerado (cámara climática con 65% de humedad relativa y atmósfera saturada de CO₂) y natural (expuestas al aire dentro del laboratorio) durante un año, con la finalidad de correlacionar los resultados. En los dos tipos de ensayos, los hormigones se carbonataron de forma homogénea (frentes de carbonatación regulares). En el método acelerado las profundidades de carbonatación presentaron una mayor diferencia entre el hormigón con árido fino siderúrgico y su hormigón convencional de referencia. Por el contrario, la profundidad de carbonatación entre estos dos hormigones fue

más cercana por el método natural. De los ensayos se concluye que, cuando se hace la sustitución del árido siderúrgico en la fracción fina la carbonatación es menor que la de un hormigón convencional, pero si la sustitución es en la fracción gruesa la carbonatación es mayor que la de un hormigón convencional.

Respecto a ciclos de *hielo-deshielo* mediante diferentes tipos de ensayos, con el paso del tiempo se ha logrado reducir la afectación en la resistencia a compresión ante este fenómeno. En los primeros estudios, las reducciones de resistencia eran mayores, sin embargo, en estudios más actuales no solo se ha logrado reducir las pérdidas, sino pueden llegar a experimentar un aumento. En general, Manso, 2001, observo una disminución en la resistencia en ambos hormigones, sin embargo, el hormigón convencional sufrió un deterioro bajo asociado a sus buenas características básicas y una disminución de la resistencia del 15%. Por otro lado, la mayor afectación observada fue correspondiente a un hormigón siderúrgico (sustitución del 100% en la fracción gruesa y 65% en la fracción fina) con afectación superficial y una reducción del 48%.

Después Pellegrino y Gaddo, 2009, observaron un aumento en la resistencia del 3% en los hormigones convenciones, mientras que en promedio los hormigones siderúrgicos conducían a una pérdida del 7,28%. Similar a lo visto por Polanco et. al., 2011, con una pérdida del 7,5% de la resistencia de un hormigón siderúrgico (sustitución 100% fracción gruesa, 50% fracción fina), no obstante, dicho hormigón cuando se le incluía escoria de horno cuchara, exhibía un comportamiento inaceptable con reducciones significativas del hasta 38,8%. La literatura menciona que una pérdida del 8% en la resistencia ante estos ciclos es aceptable y del 16% tolerable [Manso et. al., 2006; Pellegrino et. al., 2012].

Finalmente Arribas, 2011 observo una mejoría, al presenciar aumentos de entre 7% y 19% de la resistencia en los hormigones con áridos siderúrgicos, después de 300 ciclos de hielo-deshielo. Este hecho lo justificó debido a una mayor densificación de la zona interfase árido siderúrgico/matriz de cemento frente a los áridos calizos, así como, a la menor profundidad de penetración de agua en los hormigones siderúrgicos. El hormigón convencional mostró una pérdida del 17% en la resistencia a 200 días cuando alcanzó el fallo.

En cuanto a ciclos *mojado-secado*, Manso, 2001 no observa un deterioro generalizado en el aspecto superficial, solo una probeta (sustitución 100% fracción gruesa y 65% fracción fina) mostro una fisura que se prolonga a lo largo de sus caras. Las pérdidas de resistencia son altas tanto en el hormigón convencional, como en los hormigones siderúrgicos entre 30% y 48%, el peor resultado concuerda con la dosificación antes mencionada. La variación de peso en todas las muestras fue poco significativa. Al igual Pellegrino y Gaddo, 2009 observaron pérdidas aunque de porcentajes menores (26%), sin embargo, no observo daños superficiales en ningún hormigón; y un menor aumento de la densidad en el hormigón convencional. Contrario a dichos estudios, Polanco et. al., 2011 apreció un comportamiento excelente en el

hormigón siderúrgico, con un aumento de la resistencia de 6,9%, con una variación de peso bajo y una buena apariencia superficial.

Por otra parte, la reacción álcali-árido se produce cuando la disolución alcalina presente en los poros del hormigón, y los minerales silíceos de algunos áridos, reaccionan para formar un gel que en presencia de agua aumenta el volumen. Lo que puede conducir a la expansión y fisuración de las partículas de árido afectados. Arribas et. al., 2014 y Manso, 2001 estudiaron esta posible reacción. De acuerdo, a la norma UNE 146508:1999 EX, la expansión máxima a los 16 días debe ser menor de 0,10%, los primeros autores tuvieron resultados positivos concluyendo que los áridos siderúrgicos ensayados no eran reactivos con el cemento (valor máximo obtenido 0,06%). Mientras que el segundo autor observó expansiones de 0,14% a 16 días, por lo que según la norma, antes mencionada, obliga a esperar la medida a 28 días y no debe superar el 0,20% para decirse que el árido es no reactivo. Bien pues, cumplidos los 28 días los áridos presentaron un valor del orden del 0,14% al 0,15%, definiéndolos como áridos de baja reactividad.

Finalmente, se presentan las conclusiones de tres autores para el ensayo de lixiviación monolítica. Amaral, 1999 hizo lixiviación de dos tipos de hormigones siderúrgicos (1 sustitución en la fracción gruesa y otro en la fracción fina) a 64 días, en ellos estudio los siguientes elementos considerados contaminantes: Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, además de Ca, Mg, Na, Al, Fe, Ti, Mn que no son contaminantes. Concluyó que todos los metales pesados estaban por debajo de los límites definidos por la Legislación Holandesa [NEN 7345, 1993]. De los elementos contaminantes observó una pequeña lixiviación del Bario en los dos hormigones y de los no contaminantes se lixiviaron el Ca, Mg, Na, Al y Fe. La lixiviación del Ca y Na son menores en hormigones con árido siderúrgico fino, por otro lado, el Al, Mg y Fe lixivian igual en los dos hormigones. La conductividad se mantiene siempre baja aunque crece ligeramente con el tiempo, poniendo en manifiesto una escasa presencia iónica. Así mismo, el pH aumenta con el tiempo, la razón de esto según la autora es debido a la solubilidad de las fases alcalinas.

Por otro lado, Manso, 2001 estudia la lixiviación de sulfatos, fluoruros y cromo total, primeramente sobre el árido siderúrgico y después en monolíticos. Los resultados demostraron que los lixiviados directos de los áridos estuvieron cerca de los límites, tanto sulfatos como fluoruros, sin embargo, el cromo (elemento más peligroso), apenas apareció. Los resultados en probetas monolíticas de hormigón mejoran, debido al efecto encapsulador y protector, concluyendo que pueden ser empleados en construcción con seguridad.

Por último, Arribas, 2011, examina los siguientes compuestos: sulfatos, fluoruros, Cr, Mo, V, Ni, Se, Ba, Cd, Pb, Zn primeramente en lixiviación granular (árido siderúrgico), resume que solo el V y Se resultan potencialmente críticos y que el resto están por debajo de los límites. En el caso de lixiviados monolíticos a 16 días estudio elementos potencialmente críticos para el ambiente: V, Se, Ba, Mo, F, y SO₄. De los resultados obtenidos observó que el Ba y V tuvieron concentraciones próximas a los valores de detección y, por lo tanto, no era

esperable una movilización problemática de ambos, por otro lado, los sulfatos y los fluoruros presentaron una lixiviación acumulada creciente. Debido a estos resultados hizo una modelización de la lixiviación a largo plazo de 100 años, donde consto que los valores umbral de inmisión máxima para el Ba, V, sulfuros y fluoruros, se situaban muy por debajo del umbral de inmisión máxima aceptable. Concluyo que, se asumía un riesgo mínimo y aceptable derivado de la movilización hacia el suelo de los contaminantes contenidos en el hormigón.

Protección Radiológica

Debido a la densidad de los áridos siderúrgicos EAF (entre 3310 y 3570 kg/m³), la cual es comparable a la de los agregados utilizados para producir *hormigón pesado*, la convierte en una alternativa interesante y respetuosa con el medio ambiente. Debido a que podría mostrar capacidad de protección y, al mismo tiempo, mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. A la fecha no se han realizado estudios sobre el coeficiente de atenuación de rayos gamma de hormigones siderúrgicos, para saber si tienen capacidad ante dicha propiedad.

2.5 HORMIGONES PESADOS

En la actualidad, la necesidad de ofrecer materiales con mayor diversidad en las características físicas o propiedades mecánicas, ha llevado a una evolución en el hormigón, material tradicional en el sector de la construcción. A través de la utilización de materias primas diferentes a las convencionales, tales como tipos de áridos, adición de aditivos o incorporación de nuevos materiales, así como, la reutilización de residuos, se han creado diferentes tipos de hormigones. Entre ellos, se pueden mencionar algunos ejemplos: los hormigones pesados, celulares, de áridos ligeros, porosos, traslucidos, ecológicos o biológicos, con la adición de fibras, entre otros muchos. Así mismo, los métodos para su fabricación, puesta en obra y durabilidad son específicos de cada tipo y de la aplicación a la que son destinados.

Debido a las características propias del árido siderúrgico se ha planteado la posibilidad de fabricar hormigones de altas densidades (hormigones pesados). Este tipo de hormigón se considera un material de blindaje excelente, utilizados como protección radiológica [Gencel et. al., 2010]. Para reducir al mínimo los grosores necesarios, conviene emplear un material de alta densidad, por ejemplo, el plomo es una pantalla muy buena, pero resulta muy costoso y en algunas ocasiones no presentaría suficientes resistencias mecánicas. Los hormigones pesados no se distinguen esencialmente de los clásicos, excepto por el tipo de áridos empleados. Hasta la fecha, los áridos naturales más comunes que se utilizan para lograr una alta densidad han sido minerales como la magnetita, colemanita, hematita, limonita y barita [Dreux, 1981].

Hormigones Baríticos

La barita es un mineral opaco, más o menos blanco y de estructura laminar, conocido por siglos y se utiliza en numerosas aplicaciones, aumentando así sus niveles de producción. En 2012, la producción mundial ascendió a 8,4 millones de toneladas. El país que tuvo el mayor nivel de producción fue China, con el 47% de la producción mundial total, seguido por India con un 16,7%, los EE.UU. y Marruecos, con 7,7% cada uno. En los próximos años, se espera que la producción de barita tenga un crecimiento lento pero constante. Se estima que la producción en el 2015 llegará a una cifra aproximada de 8,52 millones de toneladas [Merchant Research & Consulting, 2014].

La barita se viene utilizando, entre otras aplicaciones, debido a su alta densidad ($4,50 \text{ g/cm}^3$) como árido para producir morteros [Binici et. al., 2014], así como, para la inmovilización de los residuos radiactivos (el aislamiento de radionucleídos desde el entorno) [Shaaban y Assi, 2011]. Binici et. al., 2014 confirman que las resistencias a la compresión y flexión de los morteros, se reducen cuando el porcentaje del árido barítico aumenta, sin embargo, el coeficiente de absorción de radiación aumenta.

No obstante, a pesar de las buenas propiedades de la barita para el blindaje, la ACI indica que presenta una estructura altamente cristalina que hace que sea un material friable, propenso a la fragmentación [ACI Committee, 2009]. Así mismo, Lee et. al., 2013 mencionan que la barita es un mineral que contiene una gran proporción de partículas relativamente blandas (con una dureza de Mohs entre 2,5 a 3,5) y que pueden contener grietas, las cuales al someterse a abrasión o fuerzas externas, tienden a romperse en pequeños pedazos fácilmente. Esto puede tener un impacto negativo en las propiedades mecánicas de un hormigón fabricado con este tipo de áridos, así mismo, mencionan que otras propiedades, tales como resistencia al hielo-deshielo podrían presentar deficiencias. Finalmente, mencionan que los áridos usados en hormigones para blindaje contra radiación deben ser físicamente fuertes y relativamente libres de partículas blandas o poco sólidas.

Por estas razones, es de gran importancia conocer la calidad de los áridos puesto que al menos tres cuartas partes del volumen del hormigón están compuestas por estos. No solo el agregado tiene la capacidad para limitar la resistencia del hormigón, si no puede afectar en gran medida la durabilidad y el comportamiento estructural del hormigón. La abrasión de la barita podría ocurrir incluso antes de que el hormigón se haya endurecido, es decir, debido a la energía introducida durante el proceso de mezcla. Esto podría modificar la curva granulométrica o generar cierto polvo fino, afectando así a las propiedades de la zona de transición interfacial. Sin embargo, a la fecha no existen estudios que demuestren dicho comportamiento, debido a esto y para dar respuesta a esta hipótesis se ha definido como uno de los objetivos de estudio en la presente Tesis Doctoral.

Diferentes autores han estudiado tanto las propiedades físicas y mecánicas de hormigones baríticos, así como, aspectos de durabilidad y capacidad de blindaje radiológico de rayos gamma. Para dichos estudios se han modificado parámetros de las dosificaciones, tales como la cantidad de árido barítico en el hormigón [Demir et. al., 2011; Oto et. al., 2013], con sustituciones del 50% repartidos entre fracción fina o del 100% ya sea en la fracción fina o gruesa [Akkurt et. al., 2008; Kilincarslan et. al., 2006], hasta el 100% en ambas [Akkurt et. al., 2008; Kilincarslan et. al., 2006; Sakr y El-Hakim, 2005]. Así como, en la relación a/c o en la cantidad del cemento [Akkurt et. al., 2006; Topçu, 2003] y con la adición de humo de sílice [Mostofinejad et. al., 2012]. A continuación, se dan a conocer las conclusiones observadas por los autores, en función de las propiedades estudiadas.

Trabajabilidad

A partir de la fabricación de hormigones baríticos (sustitución 100%) alterando solamente la relación a/c, Topçu, 2003 observó que al aumentar esta relación, la trabajabilidad del hormigón era mayor, al igual que si contiene aditivo plastificante. Los hormigones con una relación a/c de 0,55 y 0,60 obtuvieron un cono de Abrams de entre 6 y 7 cm.

Densidad

En general, todos los autores concluyen que la densidad aumenta cuando el porcentaje de barita en la dosificación es mayor. Topçu, 2003 encontró que las densidades de los hormigones baríticos eran un 25% mayores que la de un hormigón convencional, con valores entre 3203 y 3359 kg/m³. Por otro lado, Akkurt et. al., 2008 obtuvo densidades entre los 2800 y 3000 kg/m³ cuando la sustitución es del 50% (fracción fina y gruesa) o del 100% (solo en una de las fracciones) y de 3400 kg/m³ cuando la sustitución es del 100% en ambas fracciones. Finalmente, Kilincarslan et. al., 2006 tuvo valores entre 2821 y 3507 kg/m³, las más altas corresponden a hormigones con una relación a/c de 0,51, seguidas por 0,43 y las más bajas con una relación 0,65.

Resistencias mecánicas

En relación a la resistencia a compresión, Mostofinejad et. al., 2012 observaron que al igual que en un hormigón convencional cuando la relación a/c disminuye la resistencia a compresión aumenta, lo mismo pasa al incorporar humo de sílice. Así mismo sus resultados muestran que cuando la relación a/c es alta con un 0,5 (usando la misma cantidad de cemento), la resistencia a compresión de los hormigones baríticos es igual a la de los hormigones convencionales.

Sin embargo, cuando la relación a/c es menor de 0,4 la resistencia de los hormigones baríticos es un 10% menor que la de los convencionales. Debido a que, los áridos calizos son más resistentes que los baríticos, esto se demuestra cuando la relación a/c es baja, la

estructura de la pasta de cemento es mejorada y de esta manera los áridos son la influencia principal en la resistencia. Opuesto a esto, Akkurt et. al., 2008 menciona que siempre la resistencia a compresión disminuye cuando aumenta la cantidad de la barita en el hormigón.

Por otro lado, Topçu, 2003 observa que cuando la relación a/c aumenta la velocidad de pulso ultrasónico también aumenta, debido al aumento de huecos en el hormigón. Sin embargo, Kilincarslan et. al., 2006 también lo vincula a la relación a/c, debido a que observo que cuando un hormigón tiene la misma cantidad de árido barítico y una relación a/c de 0,51 o 0,65 la velocidad de pulso no se ve afectada. Contrario a cuando esta relación es menor, de 0,43 ya que si se ven alteraciones en la velocidad de pulso. Por último, se ha observado que el módulo de elasticidad es función de la cantidad de barita en el hormigón, aumentando cuando hay mayor cantidad de barita [Akkurt et. al., 2008; Kilincarslan et. al., 2006].

Durabilidad

Akkurt et. al., 2008 estudiaron el comportamiento de hormigones baríticos con diferentes sustituciones (50% del total de los áridos, repartidos entre fracción fina y gruesa, 100% en la fracción gruesa, 100% en la fracción fina y 100% en ambos) ante ciclos de hielo-deshielo. No observaron variaciones significativas en las densidades, opuesto a la resistencia a compresión y módulo de elasticidad, los cuales se vieron afectados.

Después de los 10 ciclos de hielo-deshielo la resistencia del hormigón 100% barítico tuvo una disminución de aproximadamente 15 MPa, similar fue el comportamiento del hormigón con sustitución del 100% en la fracción fina, menor fue la pérdida cuando la sustitución fue del 100% en la fracción gruesa (10 MPa). El módulo de elasticidad sigue el mismo comportamiento, después de 50 ciclos los hormigones baríticos tienen las siguientes pérdidas 74%, 60% y 20%, respectivamente. Los autores concluyen que para que un hormigón barítico no se vea afectado por los ciclos de hielo-deshielo, la sustitución debe de ser del 50% del total de los áridos, repartido entre la fracción gruesa y fina.

Por otro lado, Sakr y El-Hakim, 2005 analizaron el comportamiento de un hormigón 100% barítico sometido a altas temperaturas. Cuando el hormigón fue expuesto a 2 hrs a temperatura de 250°C, 500°C, 750°C y 950°C, la resistencia a compresión se redujo un 7%, 40%, 68% y 86%, respectivamente. Mencionan que la reducción de la resistencia se podría atribuir a la conducción del agua y la fracción de agua libre de hidratación del hormigón debido a las altas temperaturas, ya que la deshidratación del hormigón provoca una disminución tanto de la resistencia como del módulo estático, coeficiente de expansión térmica y de la conductividad térmica.

Protección Radiológica

Se han realizado estudios para conocer la capacidad de blindaje de los hormigones baríticos, mediante la medición del coeficiente de atenuación de rayos gamma utilizando diferentes fuentes radioactivas, siendo las más comunes ^{137}Cs (660 – 663 keV) y ^{60}Co (1330 keV) [Akkurt et. al., 2006, Demir et. al., 2011; Mostofinejad et. al., 2012], solo un autor utiliza ^{133}Ba (80.99 y 303 keV) y ^{241}Am (59.54 keV) [Oto et. al., 2013]. En general, sin importar el tipo de fuente, concluyen que existe una correlación lineal entre el coeficiente de atenuación y la densidad del material, es decir, el coeficiente de atenuación es función de la densidad. Cuando aumenta la densidad, el valor del coeficiente de atenuación incrementa, por eso entre mayor sea el porcentaje de barita en el hormigón mayor será su capacidad de blindaje [Akkurt et. al., 2006, Oto et. al., 2013].

Según Demir et. al., 2011 el coeficiente de atenuación de un hormigón 100% barítico es 40% mayor que el de un hormigón convencional. Por otro lado, Mostofinejad et. al., 2012 observo que el uso de humo de sílice como sustitución parcial del cemento en el hormigón, disminuye el coeficiente de atenuación. La razón a esto es porque la densidad del humo de sílice es menor que la del cemento, por lo tanto los hormigones tendrán menor densidad y por ende un menor coeficiente de atenuación. Por otro lado, observaron que si se aumenta el contenido de cemento y se mantiene la relación a/c constante, el coeficiente disminuye y, cuando el cemento es constante y aumenta la relación a/c también el coeficiente disminuye.

Al igual que en la resistencia, Sakr y El-Hakim, 2005 analizaron la posible afectación en el coeficiente de atenuación del hormigón barítico a las 2 hrs bajo las mismas temperaturas. Los resultados demostraron que el coeficiente de atenuación gamma depende ligeramente de la temperatura, reduciéndose en comparación con el valor a 25 °C, un 7%, 13%, 17% y 21% a 250°C, 500°C, 750°C y 950°C, respectivamente.

2.6 CONCLUSIONES

A partir de la revisión de la bibliografía, la cual forma el presente capítulo del estado del conocimiento, se destacan las siguientes conclusiones:

- La producción de hierro y acero generan numerosas cantidades de subproductos o residuos siderúrgicos (entre ellos las escorias siderúrgicas), que suponen una problemática ambiental debido a los gastos de transformación para su aprovechamiento y reutilización, así como, la falta de vertederos para su almacenaje y la degradación de los mismos.
- En el 2013, el 70,5% de la producción de acero en España fue mediante el Horno de Arco Eléctrico (EAF, siglas en inglés), siendo el 3^{er} gran productor dentro de la Unión

Europea. A los subproductos producidos por este método (durante la fase de afino) se les conoce como escorias negras u oxidantes. El ratio de producción de escoria negra es de 125 a 180 kg/t de acero.

- Los áridos siderúrgicos son el producto granular resultante de las escorias negras mediante procesos de machaqueo, separación magnética y cribado. En general, entre el 87% y 92% de su composición corresponde a óxidos de calcio, hierro, aluminio, silicio, magnesio y manganeso (esta composición no se ve afectada por el tamaño del árido). Mientras que, mineralógicamente consisten principalmente en silicatos de calcio, ferritas y óxidos metálicos.
- Entre las características de los áridos siderúrgicos destacan su mayor densidad y absorción que la de los áridos convencionales calizos. La densidad del árido siderúrgico es un 20% mayor en comparación con la del árido calizo y la absorción, alrededor de 3 veces superior (debido a su mayor porosidad).
- La presencia de cal libre y magnesia pueden suponer problemas de inestabilidad volumétrica ya que pueden ser potencialmente expansivos. No obstante, se ha demostrado que si dichos compuestos se hidratan previamente mediante procesos de envejecimiento (aspersión de agua) el árido siderúrgico resulta volumétricamente estable.
- Los áridos siderúrgicos a la fecha han sido utilizados tradicionalmente en firmes de carreteras, así como, en la fabricación de cemento, áridos para morteros entre otros usos puntuales. Así mismo, su uso como áridos para la fabricación de hormigón sin responsabilidad estructural (a excepción de la autora Arribas, 2011) constituye una tendencia creciente en la última década.
- De los diversos autores que han estudiado hormigones elaborados con áridos siderúrgicos, se resume que las propiedades mecánicas son similares y en algunas ocasiones superiores a las del hormigón convencional. Sin embargo, se ha observado que los áridos siderúrgicos muestran falta de finos repercutiendo en la trabajabilidad, la cual se puede corregir mediante aditivos y/o la adición de arenas correctoras de origen calizo o silíceo.
- La mayoría de los autores, observan que los hormigones siderúrgicos presentan una durabilidad ligera o moderadamente inferior a la de los hormigones convencionales con áridos calizos, no obstante, no inhabilitan en absoluto su uso a la intemperie. Así mismo, los estudios de lixiviación se concluye que la incorporación de áridos siderúrgicos no inducen impactos ambientales negativos.

Uno de los objetivos principales de la Tesis, debido a la densidad de los áridos siderúrgicos (entre 3310 y 3570 kg/m³), es la posibilidad de fabricar hormigones pesados con capacidad de blindaje. Por esta razón, se realizó una revisión bibliográfica de hormigones baríticos, ya que la barita es uno de los áridos naturales más comunes que se utilizan para lograr hormigones de alta densidad (pesados), llegando a las siguientes conclusiones:

- El árido barítico presenta una estructura altamente cristalina, con una gran proporción de partículas relativamente blandas y que puede contener ciertas grietas, esto lo hace un material friable, propenso a la fragmentación.
- En cuanto a la trabajabilidad, para obtener un cono de Abrams entre 6 y 7 cm en hormigones 100% baríticos, es necesaria una relación a/c de 0,55 y 0,60 o la adición de aditivos plastificantes. Así mismo, se encontró que las densidades aumentan cuando el porcentaje de barita en la dosificación es mayor. La resistencia a compresión de los hormigones baríticos disminuye cuando aumenta la cantidad de la barita en el hormigón, siendo valores siempre menores que los del hormigón convencional.
- Respecto a la durabilidad ante fenómenos hielo-deshielo, la resistencia de un hormigón 100% barítico disminuye 15 MPa, así mismo, el módulo de elasticidad se ve afectado un 74%. Por otro lado, cuando este hormigón es expuesto a 2 horas a altas temperaturas tales como 250°C, 500°C, 750°C y 950 °C, la resistencia a compresión se reduce un 7%, 40%, 60% y 86%.
- Respecto a la protección radiológica de rayos gamma, los autores concluyen que sin importar el tipo de fuente, existe una correlación linear entre el coeficiente de atenuación y la densidad del material. En otras palabras, cuando aumenta la densidad, el valor del coeficiente de atenuación también incrementa, por eso entre mayor sea el porcentaje de barita en el hormigón mayor será su capacidad de blindaje.
- El coeficiente de atenuación de un hormigón 100% barítico es 40% mayor que el de un hormigón convencional. Por otro lado, se observó que, si se aumenta el contenido de cemento y se mantiene la relación a/c constante, el coeficiente disminuye y, cuando el cemento es constante y aumenta la relación a/c también el coeficiente disminuye.
- Finalmente, las altas temperaturas reducen el valor del coeficiente de atenuación un 7%, 13%, 17% y 21% a 250°C, 500°C, 750°C y 950°C, respectivamente.

CAPÍTULO 3.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ÁRIDOS

3.1 INTRODUCCION

Los áridos componentes del hormigón pueden tener distintas procedencias, tanto naturales como resultado de procesos de fabricación. El origen marca las características físicas, químicas, mecánicas de dichos áridos, si bien estas pueden verse afectadas, con posterioridad, en los procesos de vertido, mezclado y manipulación posterior del hormigón [Allen, 1997; Hogg, 1980; Orumwense y Forsberg 1991]. Estas variaciones en los procesos pueden modificar el esqueleto granular de origen y, consecuentemente, las propiedades tanto del hormigón fresco (p.ej.: trabajabilidad), como del hormigón endurecido (p.ej.: resistencia a tracción)

Así pues, la caracterización de los áridos es necesaria para analizar su comportamiento físico y mecánico cara a su empleo en la fabricación de hormigones asociado a las posibles aplicaciones de los mismos. Así mismo, tendrán contribución a la propia durabilidad del material exigida para cada tipo de aplicación. En consecuencia, este capítulo tiene los siguientes objetivos:

1. Determinar las características físicas, químicas y mineralógicas de los áridos utilizados en la fase experimental, para la fabricación de hormigones. El conocimiento de su estructura y comportamiento tiene como finalidad, predecir y justificar posteriormente el diseño y el comportamiento de los hormigones.
2. Evaluar cómo el proceso de amasado puede afectar la granulometría y el aspecto superficial de los áridos en función de su naturaleza. Este estudio permitirá entender la influencia de este fenómeno sobre las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón, analizadas en el siguiente capítulo.

Para alcanzar los objetivos propuestos anteriormente, este capítulo se divide en tres etapas principales: *Selección y tratamiento*, *Caracterización del árido* e *Influencia del amasado*.

En la *Selección y Tratamiento* se presenta la procedencia de cada uno de los áridos, así como, las tomas de muestras en cada ensayo. Por otra parte, se describe el proceso de obtención y tratamiento de los áridos siderúrgicos.

En la *Caracterización del árido* se analizan las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de cada árido, así como la importancia e influencia que tendrán sobre las características del hormigón fabricado con éstos. Este apartado se divide en dos subapartados, el primero donde se muestra la propuesta experimental realizada y el segundo, donde se presentan los resultados a las propiedades ensayadas.

En la *Influencia del amasado* se evalúa y cuantifica la alteración en las curvas granulométricas y el desgaste superficial de cada árido, como respuesta al proceso de amasado que sufre durante la fabricación del hormigón. En este apartado se describe un ensayo propio diseñado para dicha cuantificación y los resultados obtenidos para cada tipo de árido.

3.2 ETAPA 1: SELECCIÓN Y TRATAMIENTO

La sobreexplotación de los recursos naturales y la gran cantidad de residuos generados han dado lugar a un importante desequilibrio ambiental. En este contexto, es vital avanzar hacia una construcción más sostenible, por lo que conviene analizar alternativas a los áridos tradicionales en diversos campos de aplicación. En el estudio se han considerado tres tipos de áridos: áridos calizos, áridos siderúrgicos (EAF, siglas en inglés) y áridos baríticos. Los áridos calizos serán la referencia como árido para la fabricación de hormigón convencional, mientras que los áridos baríticos para hormigones pesados, debido a su densidad como se ha mencionado anteriormente.

Los áridos siderúrgicos proceden del proceso de refinado del acero por horno de arco eléctrico, y son considerados subproductos, procedentes de las “escorias negras u oxidantes” [Akinmusuru, 1991]. Estos subproductos son procesados para producir áridos siderúrgicos (EAF, siglas en inglés). Los mismos han sido objeto de numerosos estudios, para su uso en la industria de la construcción. Así, a manera de ejemplo, actualmente los áridos siderúrgicos se utilizan como áridos para la fabricación del hormigón, con la finalidad de sustituir en diferentes porcentajes, dependiendo de los diferentes autores, al árido calizo [Abu-Eishah, 2012; Arribas, 2011; Etxeberria et. al., 2010; Froněk et. al., 2012; Manso et. al., 2011; Pellegrino et. al., 2012; Polanco et. al., 2011].

La densidad de los áridos siderúrgicos es comparable a la de los áridos utilizados para producir hormigones pesados. A la fecha, los áridos naturales más comunes que se utilizan para fabricar este tipo de hormigones han sido minerales como la barita, magnetita, hematita, entre otros. La barita ha incrementado su producción, ya que es un material conocido que se utiliza en numerosas aplicaciones. Entre ellas, la barita se utiliza como árido para morteros y hormigones con la finalidad de aumentar su densidad [Mostofinejad, 2012] y para la protección radiológica por su capacidad de absorción o difracción de la radiación [Binici et. al., 2014; Shaaban y Assi, 2011].

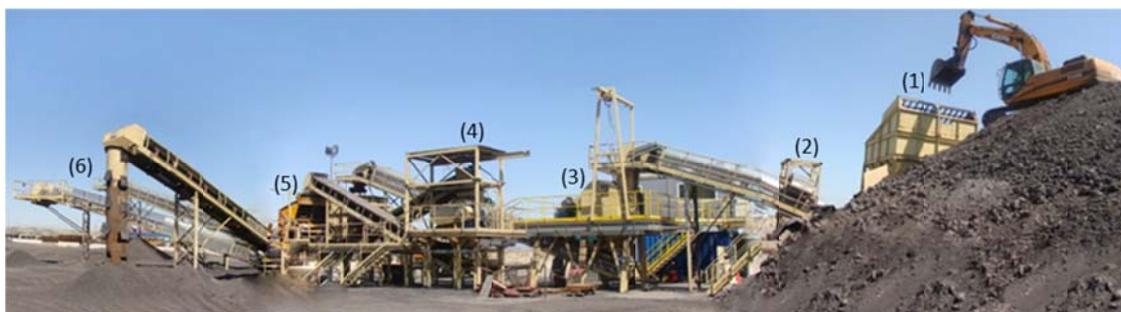
A pesar de sus buenas propiedades para el blindaje, el ACI indica que la barita es un material friable debido a que presenta una estructura altamente cristalina. Por lo tanto, es propenso a la fragmentación cuando se somete a abrasión o fuerzas externas, que pueden tener un impacto negativo sobre las propiedades mecánicas de los morteros u hormigones fabricados con este tipo de árido [ACI Committe 304, 2009].

3.2.1 Áridos Siderúrgicos EAF

Como se ha mencionado anteriormente, los áridos siderúrgicos se obtienen a partir del tratamiento de las escorias oxidantes de horno de arco eléctrico, residuo de la fabricación del acero. En esta investigación, los áridos siderúrgicos utilizados son procedentes de la empresa Arcelor Mittal en Zaragoza (España). En lo que sigue se describe, paso a paso, el proceso de obtención utilizado por la empresa.

Este proceso se inicia en la extracción de la escoria negra a la salida del horno con una temperatura aproximada entre los 1000°C y 2000°C. A continuación la escoria se transporta a un acopio en el interior donde se exponen a un riego continuo durante 24 horas, bajo aspersores de agua. El objetivo de la aspersión es de hidratación, para generar las reacciones que garanticen su estabilidad, este procedimiento se conoce como proceso de envejecimiento. Una vez finalizadas las 24 horas, las escorias se han enfriado hasta una temperatura entre 150°C y 200°C.

Con posterioridad, las escorias (en una granulometría única) se transportan a un acopio exterior a la intemperie, donde se enfriarán hasta la temperatura ambiente. El tiempo de permanencia de las escorias en dichos acopios puede ser de 3 a 4 meses, dependiendo de la demanda. Al finalizar ese plazo, las escorias se introducen en el proceso de obtención de los áridos en sus diferentes granulometrías, con los procesos usuales en este tipo de plantas de machaqueo: separación, machaqueo y trituración para la producción del árido siderúrgico. En la Figura 3.1 se presenta el esquema general de la planta para dicho proceso.



(1) Tolva (2) 1er. Electroimán (3) Molino (4) 2do. Electroimán (5) Trituradora (6) Áridos siderúrgicos

Figura 3.1: Panorámica de la planta para el procesado de los áridos siderúrgicos

Antes de introducir el todo-uno del acopio exterior en el sistema de producción, se hace un reconocimiento visual y se separan los trozos más grandes de acero, con tamaños mayores a los 500 mm, para lo que se utiliza una retroexcavadora (Figura 3.2a). Estos grandes pedazos de acero son reutilizados junto con la chatarra para la fabricación de nuevos aceros.

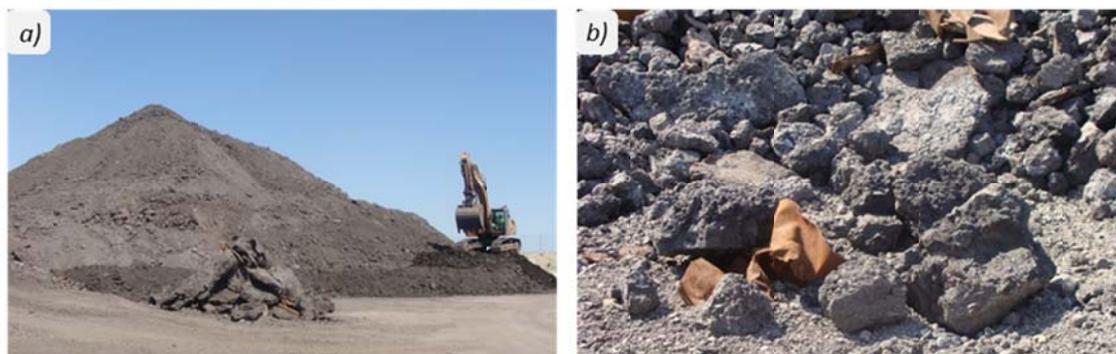


Figura 3.2: a) Primera separación con maquinaria y b) Trozos de dimensiones mayores que 500 mm

Una vez separados estos grandes trozos (Figura 3.2b), se deposita la escoria restante en una tolva (Figura 3.3a), donde por medio de peines se realiza una segunda separación de piezas con tamaños mayores a los 300 mm. La escoria que pasa se coloca en una cinta transportadora hasta un punto donde hay un primer electroimán (Figura 3.3b) donde se hace una tercera separación de material férrico con tamaños de hasta los 80 mm. Las escorias restantes entran a un molino de compresión para su machaqueo (Figura 3.3c).

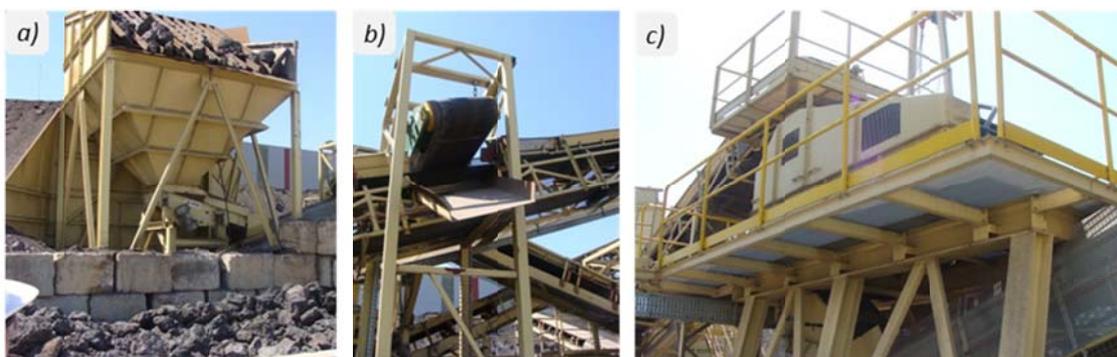


Figura 3.3: a) Tolva de separación para piezas con dimensiones mayores que 300 mm; b) 1er electroimán y c) Molino de compresión

Finalmente se hace una última detención de residuo metálico, por medio del segundo electroimán, el cual obstruye el paso de piezas con dimensiones de hasta 20 mm. Tras esta última extracción, el material es triturado por impacto (Figura 3.4a) donde se obtiene el árido siderúrgico EAF en cuatro granulometrías: 0/6, 6/12, 12/20 y 0/20 mm.

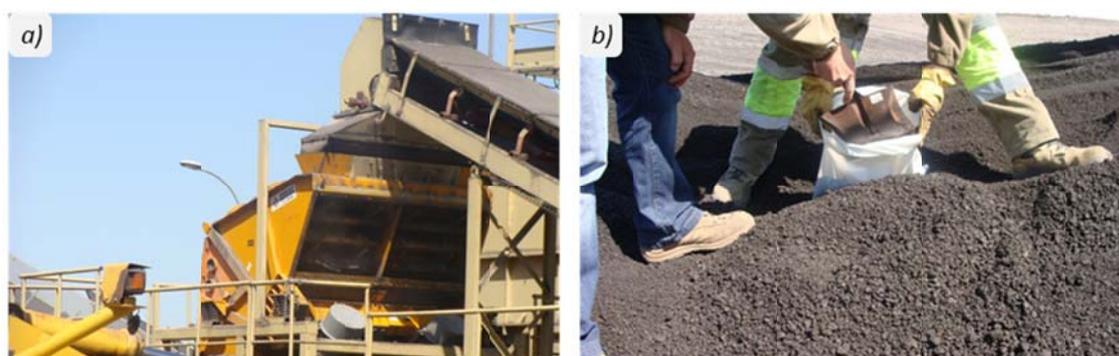


Figura 3.4: a) Molino de compresión y b) Trituración por impacto

Para los estudios realizados sobre el árido siderúrgico se hicieron varias tomas de muestra en diferentes fechas asociadas a distintos objetivos. Así, para la realización de los estudios de las propiedades físicas y químicas, así como de estabilidad volumétrica la toma de muestras se realizaron en dos etapas. La primera fue tomada durante el transcurso del año 2010 y la segunda, se efectuó el día 11 de Abril del 2011. Ambas fueron tomadas sobre un volumen global de producción aproximado de 25 toneladas, de las cuales se recogieron aproximadamente 65 kg con una granulometría única 0/20 mm (Figura 3.4b).

3.2.2 Áridos Calizos

Los áridos calizos utilizados proceden de una cantera ubicada en Pallejá (Barcelona), explotada industrialmente por el Grupo Cementos Molins Industrial. La toma de muestras se realizó directamente de los acopios almacenados en el laboratorio de Tecnología de

Estructuras Luis Agulló (UPC), con las granulometrías 0/2 y 0/4 para arenas, 4/10 y 10/20 para gravilla y grava, respectivamente.

3.2.3 Áridos Baríticos

Las muestras del árido barítico fueron suministradas por la empresa Mineralia Minerals Girona S.A. en Girona. Las materias primas que son utilizadas para la elaboración de la barita son procedentes de yacimientos ubicados en África y Asia. El envío de muestras por parte de la empresa, fueron en tres fechas diferentes noviembre 2011, febrero 2013 y abril 2014.

3.3 ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO

3.3.1 Propuesta Experimental

En la Tabla 3.1 se enumeran cada una de las propiedades estudiadas para cada tipo de árido, así como las normativas correspondientes a éstas. En ella se observa que la estabilidad volumétrica sólo se realiza para el árido siderúrgico, dado que es de obligado cumplimiento en ese tipo de árido y es, fundamental, para el desarrollo de las prestaciones futuras de los hormigones. Por otro lado, el estudio de las propiedades químicas sólo se estudia sobre los áridos siderúrgicos y baríticos, ya que el calizo es un árido de referencia para la fabricación de hormigón, estando muy contrastadas las características del mismo.

PROPIEDADES	NORMATIVA	ÁRIDO*
Estabilidad Volumétrica	NLT 361/91	
Índice de Limpieza	UNE-EN 13043:2003	Siderúrgico
Contenido de Finos	UNE-EN 933-1:2012	
Aspecto Superficial	---	
Densidad	UNE-EN 1097-6:2014	Siderúrgico
Absorción de Agua		Calizo
Resistencia a la Fragmentación	UNE-EN 1097-2:2010	
Curva granulométrica	UNE-EN 933-1:2012	Barítico
Composición Cristalina	Difracción de Rayos X	
Composición Química	Fluorescencia de Rayos X	Siderúrgico Barítico

Tabla 3.1: Ensayos realizados para evaluar las propiedades de los áridos

El ensayo para evaluar la propiedad de *estabilidad volumétrica* se realizó en dos etapas: la primera en los meses de Junio y Octubre del 2010 y la segunda en Abril 2011. Uno de los problemas potenciales encontrados a la hora de utilizar los áridos siderúrgicos es su posible expansión debido a la hidratación de los óxidos presentes en su composición. Dependiendo del fabricante y su tratamiento podrán presentar o no dicha problemática. Según la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE08) (2008) menciona que los áridos de naturaleza sin antecedentes empleados para las aplicaciones diferentes a las ya conocidas en la práctica, en este caso los áridos siderúrgicos, es esencial la comprobación de su estabilidad volumétrica. En otras palabras, no deben ser reactivos al contacto con el cemento, ni ser afectados por los agentes exteriores a los que pueden ser expuestos, así como generar fenómenos expansivos en el hormigón.

Este análisis se realiza mediante el ensayo de Autoclave, de acuerdo a la norma NLT 361/91, el cual es una prueba de fiabilidad para evaluar la capacidad de un producto para soportar cambios bruscos de temperatura y humedad. Éste se utiliza principalmente para acelerar la corrosión en las partes metálicas del producto, incluyendo las áreas de la metalización en la superficie de la matriz, así mismo, los sujetos de las muestras a la alta presión de vapor. Por medio del ensayo se valora el grado de envejecimiento intrínseco del material, siendo una herramienta para determinar la homogeneidad y facilitar la determinación de tiempo de envejecimiento necesario [Carretero y González, 1992].

Los áridos utilizados en este trabajo de investigación se sometieron a la estabilización por medio de un proceso de envejecimiento. Dentro de la normativa se menciona que, para que los áridos siderúrgicos puedan ser utilizados como material en carreteras, es necesario que su índice granulométrico de envejecimiento (IGE) sea menor de 1,00% en el caso de que las escorias no hayan sido sometidas a ningún tratamiento. Por el contrario, cuando la escoria ha sido envejecida el IGE debe ser menor a 0,70%.

Además del índice granulométrico de envejecimiento y el módulo granulométrico, en todos los ensayos se toman los valores de: Índice de limpieza y contenido de finos en los áridos siderúrgicos. El objetivo del primero es determinar el coeficiente de limpieza superficial de los áridos de tamaño superior a 2 mm, separando por lavado las partículas inferiores a 0,5 mm que estén mezcladas o adheridas a las superficies de los áridos. Por otro lado, el objetivo del contenido de finos es calcular la proporción de finos que pasa por el tamiz 0,063 mm.

Por otra parte, dentro de las propiedades físicas es necesario conocer las *densidades* de los áridos, para diseñar las dosificaciones, puesto que esta característica definirá la propia densidad de los hormigones. Los ensayos de *absorción de agua* de los áridos tienen un carácter complementario a los de densidad y proporcionan una medida de la porosidad accesible o cantidad de huecos que pueden ser ocupados por el agua capilar, con relación al volumen o peso total de la muestra.

La resistencia a la fragmentación se realizó por medio del ensayo Los Ángeles. Este ensayo provoca la disgregación y fragmentación, por medio del rozamiento resultante de la abrasión y el impacto entre los áridos y bolas de acero estandarizadas. Si los áridos que se utilicen como áridos para la fabricación de hormigones presentan una buena resistencia a la fragmentación, éstos contribuirán a las sollicitaciones mecánicas, aportando resistencia a la compresión y a la tracción.

Conocer la composición química de los áridos es necesario para identificar por un lado componentes que puedan ser peligrosos al medio ambiente o a la salud humana y, por otro lado, hacer una clasificación del material. Asimismo, otra de las finalidades sobre las composiciones es poder analizar las fases mineralógicas y cristalinas que estén presentes. Teniendo esto en cuenta se evaluó la presencia de hierro, calcio, silicio, aluminio, magnesio, manganeso, cromo, entre otros.

El análisis cristalino de los áridos se realizó a través de la Difracción de Rayos-X sobre muestra de polvo del material. Los elementos presentes en la composición química pueden estar distribuidos dentro de la matriz formando compuestos cristalinos o compuestos amorfos. Los compuestos amorfos son resultado del enfriamiento brusco de cualquier material en estado líquido y a altas temperaturas, debido a que los elementos no se agrupan ordenadamente. Contrario a lo que sucede cuando hay un enfriamiento lento, lo cual formara estructuras cristalinas estables. Es sumamente importante conocer las estructuras cristalinas que puedan estar presentes en la estructura del árido, la razón a esto es que algunos de los compuestos pueden ser muy peligrosos para el hormigón. La materia amorfa contenida en la matriz tiende a reordenarse ocasionando reactividad ya sea puzolánica (contacto con el hidróxido de calcio) o hidráulica (contacto con agua).

3.3.2 Resultados

Aspecto Superficial

Como puede verse en la Figura 3.5, el árido siderúrgico EAF tiene una superficie rugosa e irregular, con cavidades (poros), las cuales son fruto del proceso de enfriamiento, como respuesta tendrá una mayor adherencia a la pasta de cemento.

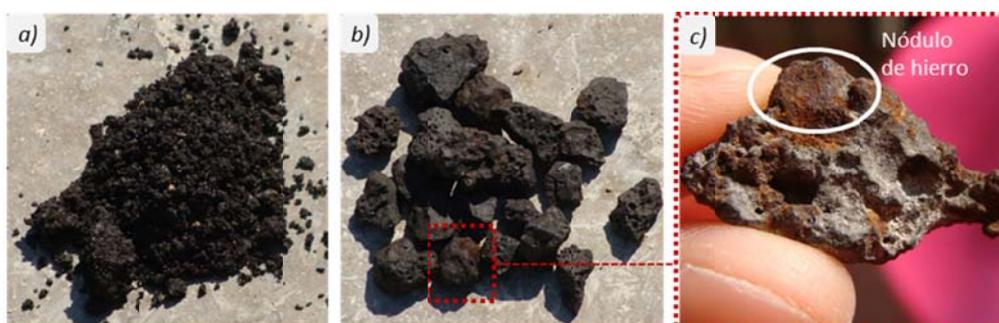


Figura 3.5: Aspecto del árido siderúrgico: a) arena; b) grava y c) nódulo de hierro embebido

Los granos presentan baja esfericidad y un color gris oscuro casi negro, lo que conlleva a un hormigón de color más oscuro que el obtenido con áridos calizos. Se puede observar claramente nódulos de hierro embebidos, como residuo resultante de la producción de acero. Es de gran importancia que dichos nódulos se encuentren oxidados previamente a la incorporación del árido al hormigón, para que no se produzcan reacciones expansivas una vez la matriz cementicia ha endurecido.

Por el contrario, el árido calizo muestra una superficie ligeramente rugosa con aspecto homogéneo, de un color gris claro, tal como puede verse en la Figura 3.6.



Figura 3.6: Aspecto del árido calizo: a) arena (0/4); b) gravilla (4/10) y c) grava (10/20)

La barita presenta una superficie con escamas color blanco y como se puede observar en la Figura 3.7c (árido mayor a 20 mm) su microestructura está conformada de capas adyacentes. Esta característica puede generar una problemática a la hora de utilizar este árido como agregado, debido a que puede repercutir en las propiedades mecánicas por la delaminación de dichas capas, afectando la resistencia del propio hormigón.

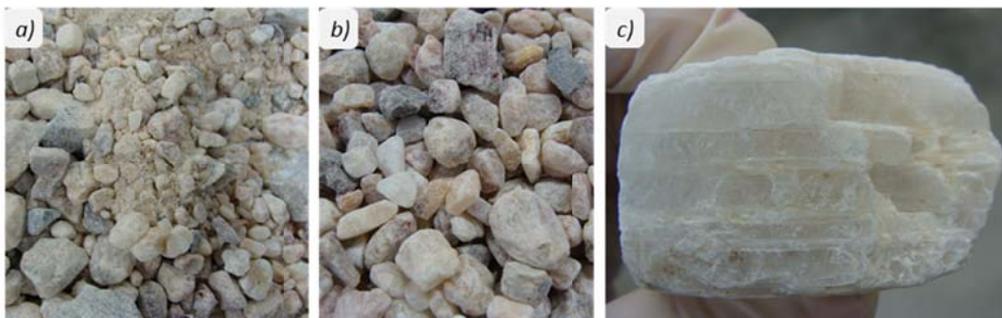


Figura 3.7: Aspecto del árido barítico: a) todo en uno; b) tamaño 4 mm y c) árido laminado

Estabilidad Volumétrica

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de estabilidad volumétrica realizados. De los resultados obtenidos para la primera etapa (año 2010), puede verse que tanto el *índice de limpieza*, como el *contenido de finos* se sitúan entre 0,00% y 0,40%.

ETAPA	1ª: AÑO 2010				2ª: AÑO 2011	
	6,3/12,5	12,5/20	6,3/12,5	12,5/20	6,3/12,5	12,5/20
Índice de Limpieza (%)	0,10	0,00	0,40	0,10	0,00	0,05
Contenido de finos (%)	0,07	0,00	0,40	0,10	0,00	0,00
Módulo Granulométrico	6,04	7,01	5,98	6,99	6,35	6,64
Envejecimiento Escoria (IGE %)	0,07	0,00	0,20	0,10	0,00	0,00

Tabla 3.2: Resultados de estabilidad volumétrica de áridos siderúrgicos EAF

En cuanto al *módulo granulométrico*, puede verse que el valor de la gravilla (6,3/12,5 mm) en todos los casos es menor al de las gravas (12,5/20 mm). Por otro lado, se observa que, para un determinado tamaño de árido, las diferencias observadas entre tomas de distinta fecha son pequeñas. Así por ejemplo, en el caso de la grava, donde el intervalo es más cerrado entre 6,99 y 7,01 es tan solo un 0,5% mayor y en el de la gravilla un 1% mayor. Esto tiene relación a los procesos de machaqueo, demostrando así la homogeneidad del producto.

Con respecto al *envejecimiento de la escoria* (IGE), puede observarse que los valores más altos (0,20%) corresponden a aquellas muestras donde el contenido de finos es mayor, por lo que estos parámetros se correlacionan entre sí. Ello corresponde a la mayor relación superficie/volumen que tienen los áridos finos, respecto los gruesos; lo que hace que la fracción fina se hidrate más rápidamente que las fracciones más gruesas (donde el agua tarda más tiempo en llegar al interior de cada uno de los gránulos gruesos), formando cal libre y periclasa.

La normativa NLT 361/91 hace mención a un valor máximo de aceptación para el IGE de 0,70%. El máximo valor obtenido fue de 0,20%, por lo que los áridos siderúrgicos estudiados pueden ser empleados como áridos para la fabricación del hormigón. Esto se ratifica mediante los resultados de la segunda etapa (año 2011), en todos los casos, el índice de envejecimiento (IGE) se sitúa en valores nulos (0,00%). Los valores del módulo granulométrico son algo diferentes de las muestras de la primera etapa.

Densidad, Absorción de agua y Resistencia a la Fragmentación

En la Tabla 3.3 se muestran las propiedades de densidad, absorción de agua y resistencia a la fragmentación para cada tipo de árido. La barita representa los valores más altos de densidad que son 26% y 67% mayores que los de los áridos siderúrgico y calizo, respectivamente. Es importante resaltar que la absorción de agua más alta corresponde a la arena (fracción 0/6) del árido siderúrgico EAF, siendo al menos dos veces mayor que la

obtenida para las otras fracciones del mismo árido y tres veces mayor al resto de áridos. Ello puede repercutir en la cantidad de agua requerida para alcanzar un hormigón con una correcta trabajabilidad.

TIPO DE ÁRIDO		FRACCIÓN (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	% DE PERDIDA POR FRAGMENTACIÓN
Siderúrgico EAF	Arena	0/4	3 310	2,47	20
	Gravilla	4/10	3 570	0,81	
	Grava	10/20	3 530	1,18	
Calizo	Filler	---	2 490	---	30
	Arena	0/4	2 690	0,90	
	Gravilla	4/10	2 640	0,74	
	Grava	10/20	2 600	0,91	
Barítico	Todo en uno	0/20	4 410	0,30	40

Tabla 3.3: Propiedades físicas de cada tipo de árido

Por otro lado, los resultados para la resistencia a la fragmentación mediante el ensayo de los Ángeles muestran que los áridos siderúrgicos son mucho más resistentes en comparación con los áridos convencionales. Por otro lado, la barita es un 33% menos resistente en comparación a los áridos calizos. Esto corrobora las observaciones de la literatura [ACI Committe 304, 2009; Lee et. al., 2013], donde se menciona que la barita es un material altamente propenso a la fragmentación debido a su microestructura cristalina y compacta.

Curva Granulométrica

En la Figura 3.8a se muestran las curvas granulométricas del árido siderúrgico, barítico y calizo. Los dos primeros se hicieron sobre una granulometría todo en uno (0/20 mm). Por otro lado, el árido calizo estaba separado en diferentes granulometrías (0/5, 5/12 y 12/20 mm), la curva presentada es la composición de éstas. El contenido de finos en el árido calizo es considerablemente menor, por ejemplo para las fracciones 4 y 2 mm es 6 veces menor en comparación a los áridos baríticos y siderúrgicos y en el caso de las fracciones de 8 mm presenta la mitad de porcentaje que pasa.

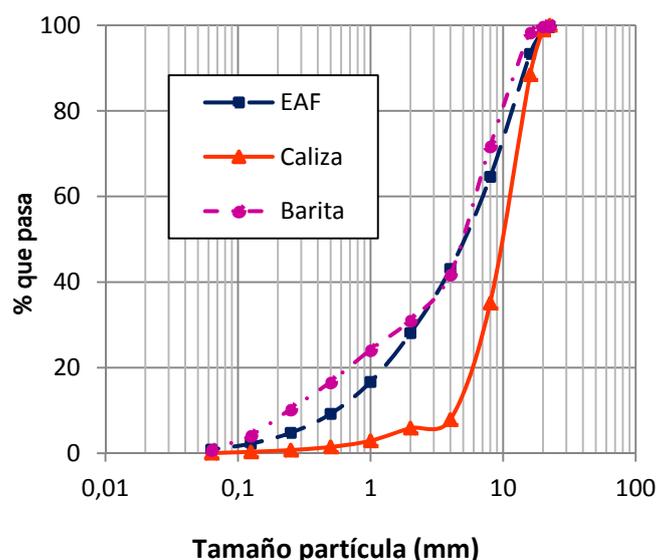


Figura 3.8: Curva granulométrica de los tres áridos utilizados

Composición Química

En la Tabla 3.4 se muestra la composición química del árido siderúrgico y barítico. Así mismo, se muestran las composiciones estudiadas por otros autores para el material siderúrgico [Arribas, 2011 y Manso, 2001]. El 96% de la composición del árido barítico corresponde a sulfato de bario, el cual es un mineral con estructura cristalina.

ELEMENTOS (%)	SIDERÚRGICO			BARÍTICO
	ARCELORMITTAL	ARRIBAS, 2011	MANSO, 2001	
CaO	30,20	32,52	30,35	---
Fe ₂ O ₃	25,80	30,80	37,44	---
SiO ₂	19,00	17,17	10,69	---
Al ₂ O ₃	12,70	7,96	3,93	---
MnO	4,80	3,80	2,53	---
MgO	4,60	4,56	5,15	---
Cr ₂ O ₃	1,60	---	0,41	---
TiO ₂	1,00	0,59	0,33	---
BaSO ₄	---	---	---	96,00
SrO	---	---	---	1,10

Tabla 3.4: Composición química de los áridos siderúrgicos y baríticos

Como puede observarse la composición química para los áridos siderúrgicos utilizados en esta investigación son similares a la obtenida por otros autores. De acuerdo a los valores referentes al árido siderúrgico, se destaca que el 87,7% de su composición está formada óxidos de calcio, hierro, silicio y aluminio. Mientras que para Arribas, 2011, corresponde al 88.45% y para Manso, 2001 un 82.61%. Asimismo, los áridos siderúrgicos utilizados en esta investigación

presentan menor contenido de óxido de hierro que los de las referencias citadas. Por último, los óxidos de manganeso y magnesio se encuentran en porcentajes similares.

Los óxidos de calcio y magnesio son los responsables de los posibles fenómenos de expansión. A corto plazo, el óxido de calcio en contacto con agua se hidrata rápidamente, produciendo una rápida expansión volumétrica. A largo plazo, el responsable de la hidratación y expansión es el óxido de magnesio [Frías *et. al.*, 2004; Frías *et. al.*, 2010; Vázquez-Ramonich y Barra, 2001; Wang *et. al.*, 2010;]. Sin embargo, el árido siderúrgico utilizado en esta investigación ha sido sometido al tratamiento de estabilización o envejecimiento (mencionado anteriormente), el cual acelera dichas reacciones para mitigar sus posibles repercusiones en el hormigón.

Composición Cristalina

Con la finalidad de conocer la composición mineralógica de cada tipo de árido, en la Figura 3.9 se muestra el análisis de difracción de rayos X (DRX) para cada uno de ellos.

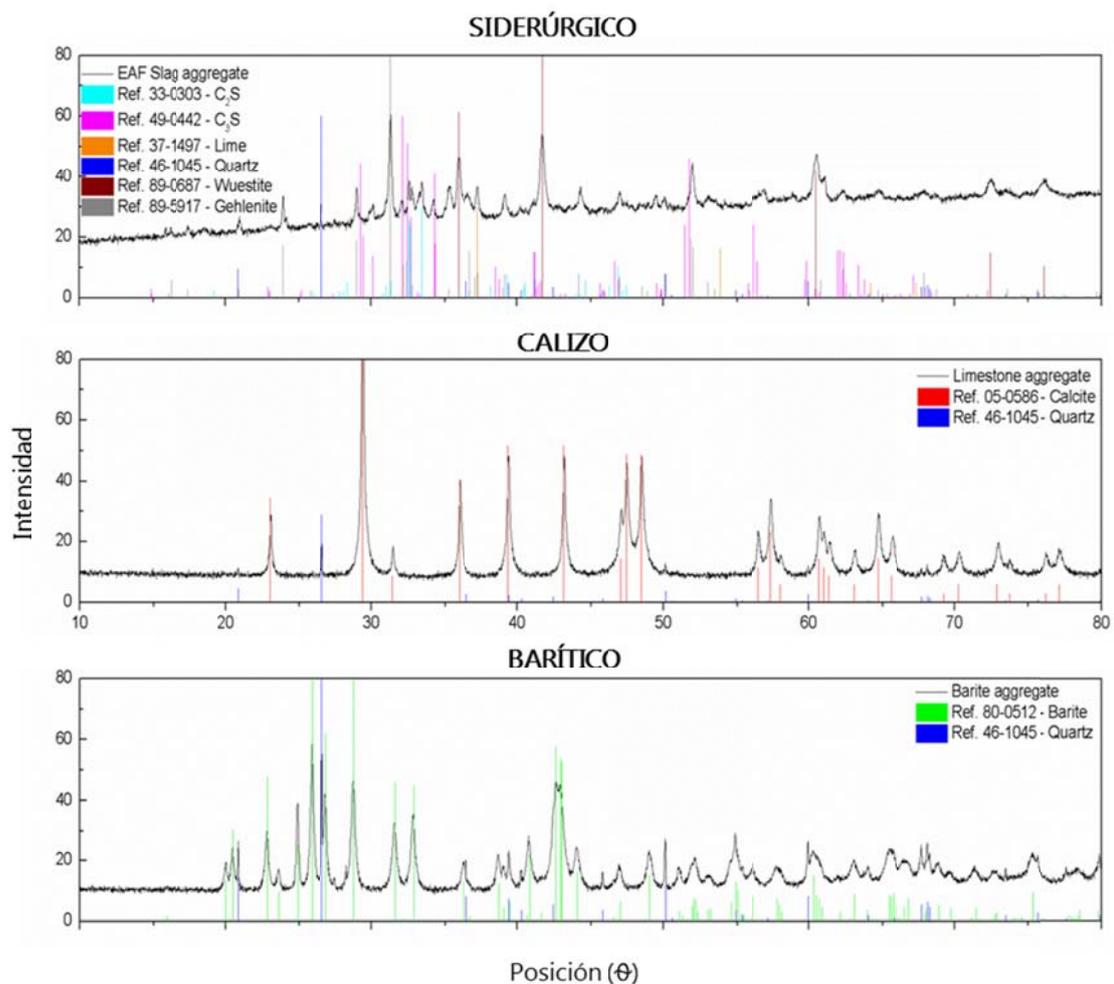


Figura 3.9: DRX: del árido siderúrgico EAF (a), calizo (b) y barítico (c)

Los resultados obtenidos de las fases cristalinas en el árido siderúrgico nos indican que su mineralogía se compone en mayor cantidad de wuestite (FeO) y silicato tricálcico (C₃S). También se observan picos importantes que corresponden a larnita (C₂S) y gehlenita (Ca₂MgSi₂O₇) y en menores porcentajes cal libre (CaO) y cuarzo (SiO₂). Estos resultados son similares a los obtenidos por otros autores [Arribas, 2011 y Manso, 2001].

En relación al árido calizo, la difracción evidencia, principalmente, la presencia de calcita (CaCO₃) y pequeñas cantidades de cuarzo (SiO₂). Finalmente para la barita, se pueden identificar picos correspondientes al sulfato de bario (BaSO₄), responsable de la microestructura cristalina, y en muy pequeñas cantidades cuarzo (SiO₂).

3.4 ETAPA 3: INFLUENCIA DEL AMASADO

El método y la energía utilizada durante el proceso de amasado pueden repercutir sobre la granulometría de los áridos, dependiendo de la microestructura y resistencia a la fragmentación de los mismos. Este apartado tiene por objetivo evaluar el desgaste y cambio de granulometría que sufre cada uno de los tres tipos de áridos principales, como respuesta a este proceso. Así mismo, se observa mediante microscopia el aspecto superficial del árido.

3.4.1 Ensayo de la influencia de amasado en la granulometría

El objetivo del ensayo es representar el proceso de amasado al que son sometidos los áridos durante la fabricación del hormigón. La finalidad es observar el desgaste que presentan los áridos a través de las alteraciones que se generen en la curva granulométrica. Este desgaste es respuesta al impacto y fricción entre los diferentes tamaños de partículas.

Preparación de Muestras

El ensayo se realizó sobre los tres tipos de áridos (siderúrgico, calizo y barítico). Con el propósito de eliminar el número de variables, todos los áridos se ensayaron en estado seco. Para profundizar y como información complementaria, el árido barítico al tener microestructura frágil compuesta por capas, susceptible a la fragmentación, se ensayó en estado seco y húmedo. En la Figura 3.10 se muestran diferentes etapas del proceso para la preparación de las muestras.

En 1^{er} lugar, todos los áridos se lavaron para eliminar las partículas finas, con la finalidad de cuantificar con mayor precisión el aumento de finos durante el proceso de amasado (Figura 3.10a-b). Después los áridos se extendieron en el suelo sobre plástico limpio para dejarlos secar y reposar a temperatura ambiente (Figura 3.10c). Seguidamente se removieron por medio de una pala para homogenizar y finalmente fueron cuarteados según la norma EN 932-2:1999 (Figura 3.10d). A través de este procedimiento se obtuvieron 6 muestras

de 40 kg, 4 para el árido barítico (2 estado en seco y 2 estado húmedo), 1 para el árido siderúrgico y otra para el árido calizo.

En la Figura 3.11 se exponen las curvas granulométricas de cada árido utilizado en el ensayo de desgaste. Una vez obtenidas las muestras de 40 kg para cada tipo de árido, se llevó a cabo un segundo cuarteo, reduciendo 3 veces para obtener sub-muestras de 5 kg, conforme a la norma UNE-EN 933-1:2012, con la finalidad de obtener las curvas granulométricas iniciales (Figura 3.10e). Para el árido calizo se realizó un ajuste en la curva granulométrica para que se aproximara al de la barita. La intención a esta actuación fue evitar la introducción de variables a parte de la naturaleza geológica del árido, lo que podría dificultar la comparación y análisis de resultados.

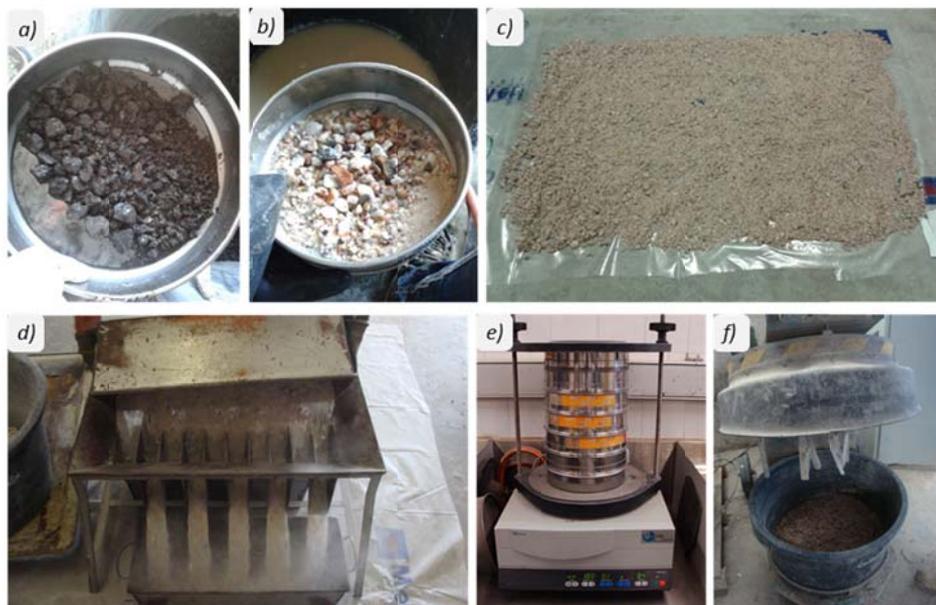


Figura 3.10: Procedimiento: a,b) lavado; c) secado; d) cuarteo; e) granulometría y f) amasado

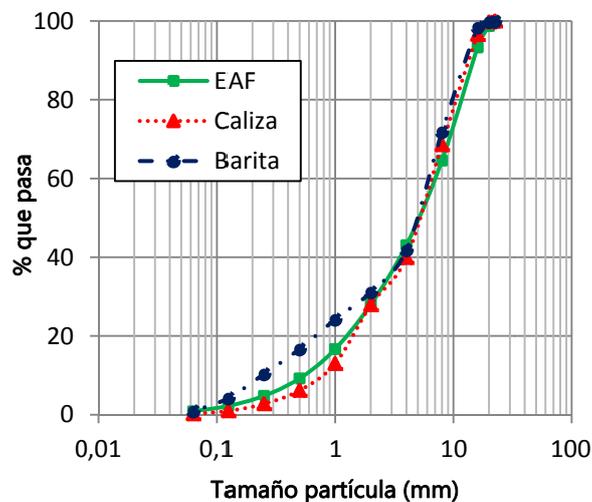


Figura 3.11 Curva granulométrica inicial ensayo friabilidad

Así mismo se tomó una pequeña muestra de 0,350 gr para observar su aspecto superficial inicial mediante lupa estereoscópica. Aunque, se observan pequeñas diferencias, en general las curvas obtenidas son similares. Presentando la barita mayor porcentaje que pasa en las fracciones 0,25, 0,50 y 1,00.

Procedimiento del ensayo

Después de obtener las curvas granulométricas iniciales, los 5 kg de sub-muestra fueron devueltos a los recipientes con el árido restante. Cada muestra de 40 kg se mezcló durante 30 segundos en estado seco (s), utilizando una amasadora con capacidad de 50 litros y una potencia de 1.1 Kw (Figura 3.10f). Al finalizar este período, la curva granulométrica fue evaluada nuevamente. Este procedimiento se repitió para tiempos de mezcla total de 75, 135, 255 y 435 segundos. Al final de cada fase de amasado se extrajeron pequeñas muestras de 0.35 gr para realizar la inspección del aspecto superficial.

Para el caso de las muestras de barita en condición en estado húmedo (Bh), se les agregó 1,40 litros de agua, con la finalidad de tener el árido en condiciones saturadas. Con la finalidad de homogeneizar la distribución del agua se aplicó un movimiento manual suave sobre las partículas. En seguida se mezcló mecánicamente durante 30 segundos para posteriormente dejarlas secar durante dos días a temperatura ambiente. A continuación, se obtuvo la curva granulométrica. Este proceso se realizó para los tiempos de mezcla mencionados anteriormente.

3.4.2 Resultados

En la Tabla 3.5 se presenta el porcentaje en peso de material retenido para cada tamiz en los diferentes tiempos de amasado. En ella se puede observar que en los tres áridos, los mayores % retenidos en las granulometrías iniciales están contenidos en las fracciones 2, 4 y 8 mm. Por otra parte, los menores % retenidos, siendo en algunos casos nulos, pertenecen a las fracciones del filler, 20 y 22,4 mm.

Asimismo puede verse que el porcentaje (%) de filler, aumenta en todos los casos a medida que aumenta el tiempo de amasado, llegando a duplicarse desde el inicio al final, si bien los porcentajes son distintos en función del tipo de árido. El mayor incremento, así como el mayor porcentaje en valor absoluto se obtiene para el árido barítico.

ÁRIDO*	TIEMPO (s)	TAMAÑO DE ÁRIDO (mm)											
		filler	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	20	22,4
EAF	0	0,85	1,39	2,53	4,43	7,45	11,41	14,99	21,51	28,72	5,45	0,81	0,45
	30	1,02	1,40	2,67	4,57	7,69	11,59	14,23	21,14	27,28	7,06	1,36	0,00
	75	1,24	1,47	2,92	4,90	8,22	12,30	14,91	20,98	24,97	7,78	0,31	0,00
	135	1,05	1,50	3,13	4,94	8,38	12,62	15,61	21,57	25,21	3,37	2,61	0,00
	255	1,38	1,94	3,71	5,62	9,01	12,70	14,88	20,52	24,55	5,33	0,00	0,38
	435	1,58	1,46	3,35	5,10	8,27	11,81	14,51	21,88	25,78	6,27	0,00	0,00
C	0	0,21	0,75	1,80	3,40	6,81	14,92	12,00	28,69	27,95	3,22	0,25	0,00
	30	0,27	0,96	2,30	3,99	7,72	15,88	11,85	26,59	27,70	2,54	0,19	0,00
	75	0,23	0,77	1,80	3,13	6,34	14,14	11,83	30,25	27,96	2,33	1,22	0,00
	135	0,47	1,24	2,59	4,43	8,36	16,70	11,96	26,18	25,24	2,26	0,56	0,00
	255	0,55	0,97	2,28	3,73	7,08	15,05	11,72	27,43	28,16	3,02	0,00	0,00
	435	0,56	1,25	3,31	4,74	8,37	16,08	11,32	25,55	25,40	3,43	0,00	0,00
Bs	0	0,80	3,16	5,49	5,89	7,11	6,73	10,78	31,53	27,15	1,14	0,00	0,22
	30	1,18	3,93	7,00	6,64	7,51	6,76	9,98	27,97	27,35	1,43	0,26	0,00
	75	1,28	3,49	8,35	6,49	7,21	6,75	10,17	27,54	27,85	0,73	0,15	0,00
	135	1,20	3,50	10,35	6,72	7,18	6,97	10,36	27,59	24,61	1,21	0,32	0,00
	255	1,72	6,02	9,49	6,16	6,57	6,85	10,61	27,33	23,48	1,42	0,34	0,00
	435	1,95	7,40	9,98	5,56	5,65	6,31	10,67	27,45	23,37	1,46	0,21	0,00
Bh	0	0,99	3,53	6,71	6,80	7,96	7,11	10,63	28,42	26,00	1,71	0,13	0,00
	30	1,42	4,04	6,78	6,61	7,60	7,05	10,90	28,97	25,69	0,81	0,13	0,00
	75	1,10	2,99	8,67	5,92	6,80	6,69	10,83	29,36	26,85	0,60	0,19	0,00
	135	1,59	5,11	8,03	5,71	6,28	6,50	10,33	28,14	26,70	1,31	0,13	0,18
	255	2,46	7,36	7,92	5,16	5,60	6,48	10,83	28,04	24,80	1,33	0,00	0,00
	435	2,08	9,87	8,74	4,18	4,57	6,23	10,43	28,58	23,74	1,40	0,00	0,17

Tipo de árido* (EAF) siderúrgico, (C) calizo, (Bs) barítico seco y (Bh) barítico húmedo

Tabla 3.5: % retenido para cada tamiz a los diferentes tiempos de amasado

Para simplificar el análisis de los resultados y favorecer la visualización de los resultados de la tabla 3.5, en la Figura 3.12 se presentan las curvas del porcentaje retenido antes del proceso y después de 435 segundos de amasado. Una ligera variación se esperaba a raíz de la propia dispersión del ensayo, introducida por la toma de muestras y el procedimiento adoptado. Los áridos siderúrgicos presentan las menores diferencias entre sus curvas iniciales y finales, indicando el menor grado de alteración causado por el amasado. Esto es probablemente la consecuencia de su alta resistencia a la fragmentación (20% en la prueba de Los Ángeles).

En cambio, las mayores alteraciones se obtienen en los áridos baríticos, ya sea en estado seco o húmedo, fruto del coeficiente de desgaste más alto (40%, ver Tabla 3.3). En todos los casos, en las fracciones por debajo del tamiz 0,125 mm presentan un aumento

significativo tras el proceso de mezcla. Esto se compensa por una reducción en el contenido de los tamices más gruesos (correspondientes a las aberturas 4 y 8 mm).

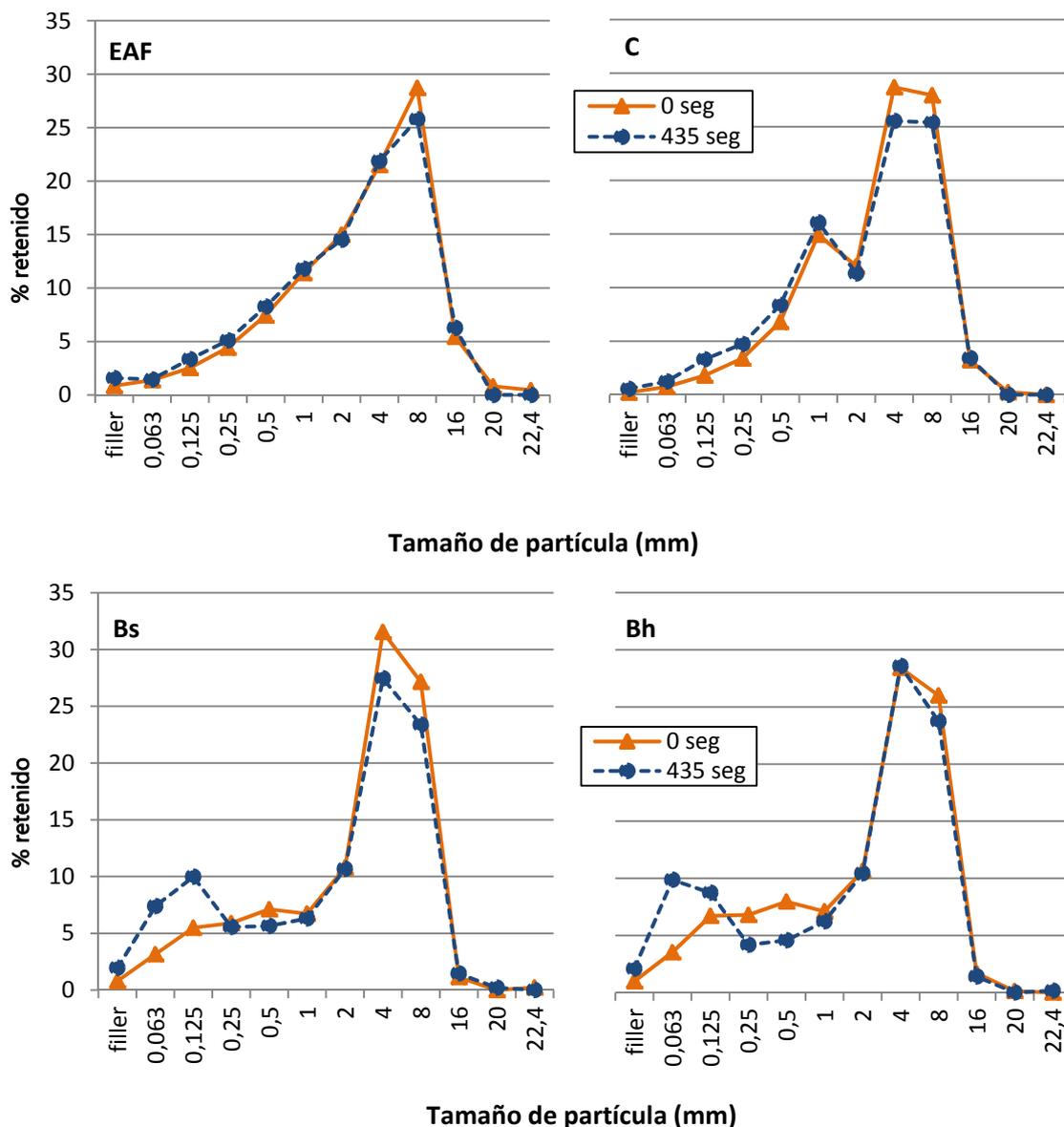


Fig. 3.12: Porcentaje retenido inicial y a 435 segundos de amasado

La Figura 3.13 presenta la variación de porcentaje apreciada por los áridos entre 0 y 435 segundos de amasado. Una vez más se reflejan los mayores aumentos por parte de la barita en las partículas inferiores a 0,125 mm. Esto es compensado por la reducción del contenido de material con tamaños 0,25, 0,50, 4 y 8 mm.

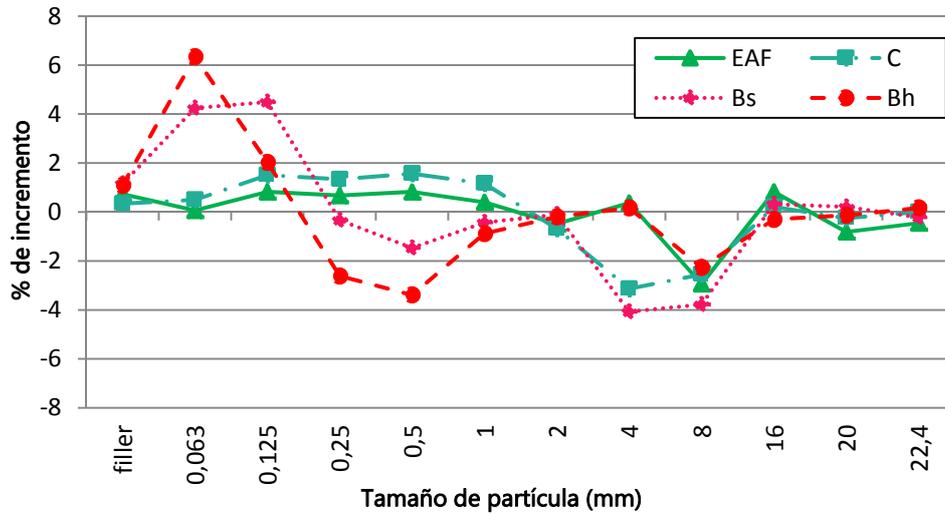


Fig. 3.13: Variación del porcentaje retenido tras 435 segundos de amasado

Los resultados también sugieren que la alteración de la curva granulometría de la barita en seco es más pronunciada que la barita en esta húmedo. Esto se hace evidente en la Figura 3.14, donde se compara el aumento relativo del porcentaje retenido para las fracciones 0,125 y 8 mm, del árido barítico en seco y húmedo.

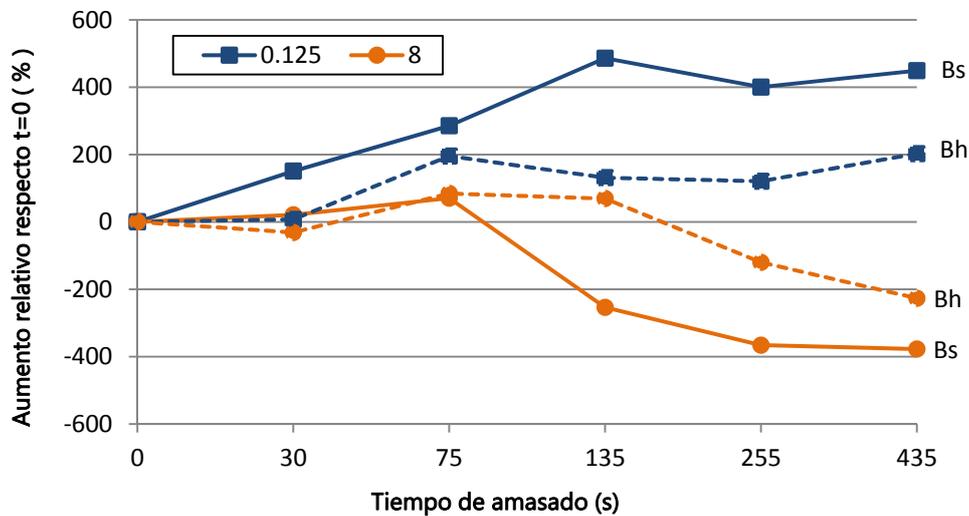


Fig. 3.14: Variaciones relativas del contenido de material retenido en los tamices 8 y 0,125 mm para los casos Bs y Bh

Tal aumento relativo se calcula para cada tiempo de mezclado, dividiendo la diferencia entre el porcentaje retenido a cada tiempo de ensayo por el porcentaje inicial existente para la misma fracción. El comportamiento para ambos casos es el mismo. Sin embargo, en el caso de la barita en estado seco se aprecia una mayor alteración, con variaciones aproximadamente de 400% en relación al porcentaje retenido inicial. Nótese que, en estado húmedo las variaciones son aproximadamente la mitad de la medida para Bs.

En la gráfica se muestra un comportamiento de compensación, es decir, hay un tamiz que adquiere un aumento correspondiente a la pérdida de otro. Este comportamiento se explica por medio de la Figura 3.15 (a y b), donde se observa el aspecto inicial de los granos de barita, los cuales eran rugosos con granos cristalinos. Al pasar los 435 segundos de amasado, se observó que la superficie de los granos cambiaba y presentaban una apariencia lisa los granos (Figura 3.15c), como respuesta a la pérdida del grano adherido. Por esta razón, las fracciones 1 y 2 mm no se alteran o presentan cambios menores, dado que, durante el proceso de amasado estas fracciones generan finos y al mismo tiempo reciben áridos desgastados de los tamices 4 y 8 mm.

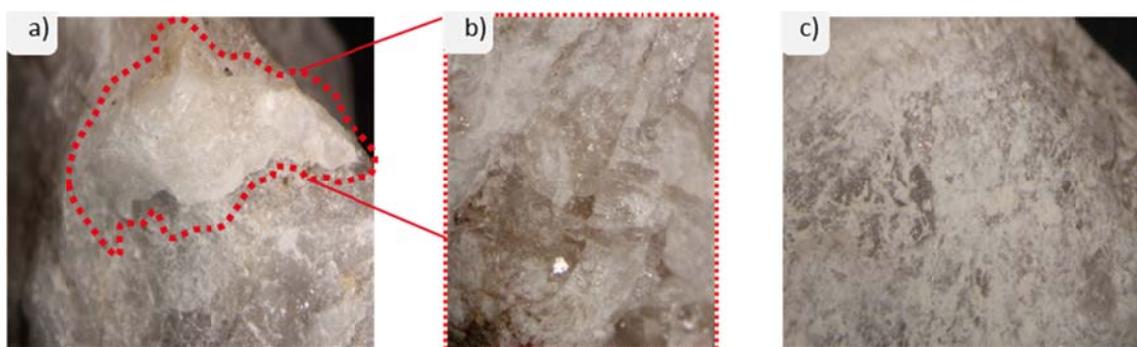


Fig. 3.15: Aspecto de la barita: a) inicial; b) escamas cristalinas; c) 435 seg de amasado

Durante el proceso de amasado se detectó un fenómeno en todos los tipos de áridos referente al filler. La figura 3.16 muestra las imágenes tomadas con un microscopio óptico pertenecientes al árido barítico en seco. La primera de ellas corresponde a la condición inicial en la que es posible distinguir algunas venas del agregado, así como los granos cristalinos que lo componen. Después de 75 segundos de amasado (Figura 3.16b) pequeñas acumulaciones de polvo en la superficie son visibles.

La acumulación superficial de finos se incrementa con el tiempo de amasado, alcanzando el aspecto mostrado en la figura 3.16c tras 435 segundos. Este fenómeno se observó en un grado mucho menor en los agregados siderúrgicos y calizos, fruto del menor incremento de finos como consecuencia a la menor friabilidad del árido.

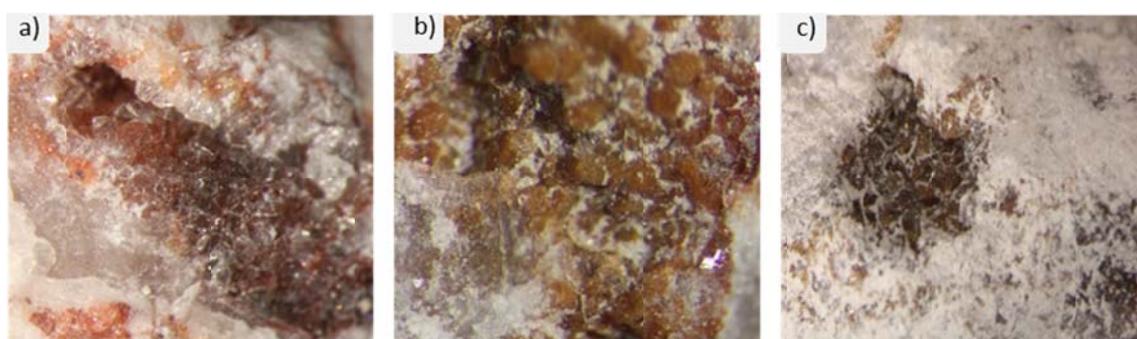


Fig. 3.16: Adherencia de finos en el tiempo: a) inicial; b) 75 segundos y c) 435 segundos

El hecho de que parte de los finos se mantenga alrededor de los áridos más gruesos podría inducir a un pequeño error sistemático en la evaluación de las granulometrías. En este caso, parte del peso de los finos puede ser computado al contenido de tamices más gruesos, dando lugar a pequeñas subestimaciones del contenido real de finos. En otras palabras, las alteraciones esperadas de la curva granulométrica deberían ser ligeramente mayores que lo medido en el programa experimental.

La formación de la capa de polvo alrededor del árido barítico en estado húmedo también podría explicar el menor contenido de finos en comparación con los resultados obtenidos para el árido en estado seco (ver Figura 3.14, presentada con anterioridad). Es razonable asumir que la presencia de agua sature los granos y contribuya a la formación de una capa de protección suave, alrededor del árido. Como resultado habría una reducción en la interacción entre partículas, reduciéndose la abrasión superficial entre los granos y la producción de finos durante el proceso de amasado.

3.5 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización de cada uno de los áridos utilizados para las diferentes campañas experimentales se presentan las siguientes conclusiones:

- Todos los áridos siderúrgicos utilizados en esta Tesis Doctoral presentan estabilidad volumétrica aceptable, de acuerdo a la normativa vigente. El mayor valor para el índice de envejecimiento (IGE) es de 0,20%, el cual es inferior al máximo permitido por la normativa (0,70%).
- Los áridos siderúrgicos y baríticos contienen mayor cantidad de finos en la curva granulométrica.
- En la inspección visual y en los estudios de la composición química se ha identificado que el árido barítico presenta una microestructura cristalina compuesta fundamentalmente de sulfato de bario (BaSO_4).
- La microestructura de la barita está compuesta por capas adyacentes con interfaces que aumentan la probabilidad de friabilidad durante la manipulación y amasado.

Del estudio que se llevó a cabo sobre la alteración de los áridos debido al proceso de amasado, pueden derivarse las siguientes conclusiones:

- Los áridos siderúrgicos presentan menor alteración como consecuencia de su alta resistencia a la fragmentación (20%). Por el contrario, la barita es altamente friable dado que presenta la más baja resistencia a la fragmentación.

- La energía introducida por el proceso de amasado modifica la curva granulométrica de la barita. Debido a la abrasión resultante de los granos con tamaños más gruesos, como resultado el contenido de los finos con granulometría inferior a 0,125 mm aumenta.
- Las alteraciones de la curva granulométrica de la barita son acompañadas por la formación de una capa de polvo fino alrededor de los granos, que se hace más evidente a medida que aumenta el tiempo de amasado. Dado que esta capa podría comprometer el rendimiento de la zona de transición de interface entre la pasta y el agregado, es aconsejable reducir el tiempo de mezclado y controlar la energía aplicada para dicho proceso.
- Las alteraciones de la curva granulométrica de la barita realizada en estado seco es más significativa que en estado húmedo. Esto es probablemente debido a la formación de una capa de finos que, en presencia de humedad, forma una protección superficial que reduce la interacción entre los granos. Por ello, se deberá reducir el tiempo de mezcla en seco del material con el fin de disminuir la alteración de la curva granulométrica.

CAPÍTULO 4.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A NIVEL HORMIGÓN

4.1 INTRODUCCION

Los estudios del comportamiento de los áridos presentados en el Capítulo anterior, muestran la posibilidad del uso de los áridos siderúrgicos para la fabricación del hormigón. Los resultados obtenidos en dicho capítulo, señalan que los áridos tienen potencialidad de uso en aplicaciones estructurales debido a su bajo índice de envejecimiento (IGE), alta densidad y resistencia a la fragmentación. Sin embargo, las investigaciones planteadas a la fecha son, mayoritariamente, para aplicaciones no estructurales, ya sea desde su uso en: bases granulares para carreteras y caminos [Luxán et. al., 2000; Rubio y Carretero, 1991], mezclas bituminosas [San José y Uría, 2001], producción de cemento [Muhmood et. al., 2009; Murphy et. al., 1997; Sawaddee, 1997; Shi, 2004], hasta su uso como árido para la fabricación de morteros [Sheen et. al., 2013].

Así mismo, en el Capítulo 3 se ha hecho mención que otra de las alternativas consideradas hoy en día es su adición como árido para la producción del hormigón sin responsabilidad estructural [Abu-Eishah, 2012; Arribas, 2011; Etxeberria et. al., 2010; Fronck et. al., 2012; Manso et. al., 2011; Pellegrino et. al., 2012; Polanco et. al., 2011]; aunque sus prestaciones darían respuesta estructural. La primera aplicación notable de este tipo de

hormigón con responsabilidad estructural en España, se sitúa en el edificio “KUBIK” en Euskadi como resultado del trabajo de Arribas, 2011.

Así pues, en la presente Tesis Doctoral se ha planteado dar el máximo valor añadido a las características de los áridos siderúrgicos. Primeramente su alta densidad (entre 3310 y 3570 kg/m³), hace que este tipo de áridos sea una alternativa interesante y sostenible para la fabricación de hormigones pesados. Este tipo de hormigones se consideran como un excelente material de blindaje que se utiliza como protección radiológica de centrales nucleares, aceleradores de partículas, reactores de investigación, paredes y techos para las habitaciones de hospitales [Akkurt et. al., 2008; Gencel et. al., 2010; Kilincarslan et. al., 2006; Mostofinejad etl. al., 2012; Sakr y El-Hakim; 2005; Topçu, 2003] y para la movilización de los residuos radiactivos (el aislamiento de radionucleidos del medio ambiente) [Shaaban y Assi, 2011]. Es por esta razón, que se planteó el uso de los áridos siderúrgicos en la fabricación de hormigones pesados para su aplicación en muros radiológicos, ya que podría mostrar capacidad de protección.

Por otro lado, debido a su alta resistencia a la fragmentación y en consecuencia a la mejora de las propiedades mecánicas observadas en los diversos estudios, se plantea su uso para la fabricación de hormigones para capas de rodadura de pavimentos bi-capa de hormigón. En ambas aplicaciones se plantea el diseño de hormigones siderúrgicos con una sustitución de 100% de los áridos gruesos de origen siderúrgico, por los usuales áridos convencionales (calizos)

Por lo tanto, con la finalidad de evaluar el comportamiento de este tipo de hormigones ante las aplicaciones planteadas, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Determinar las dosificaciones idóneas de árido siderúrgico para la fabricación de hormigones pesados con responsabilidad estructural. para lo cual se plantean dos campañas experimentales.
- Comparar las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones con áridos siderúrgicos con las correspondientes a las de un hormigón convencional (con árido calizo) y a las de un hormigón pesado (con árido barítico)
- Evaluar la capacidad del hormigón siderúrgico de atenuar la radiación de rayos gamma, así como, la resistencia de estos ante la abrasión y deslizamiento.

En vía de alcanzar los objetivos propuestos, mediante el esquema de la Figura 4.1 se presenta la metodología planteada. Como se observa el presente capítulo está dividido en dos etapas mediante la realización de dos campañas experimentales. Cada una se compone de una propuesta experimental, resultados y análisis, así como sus propias conclusiones.

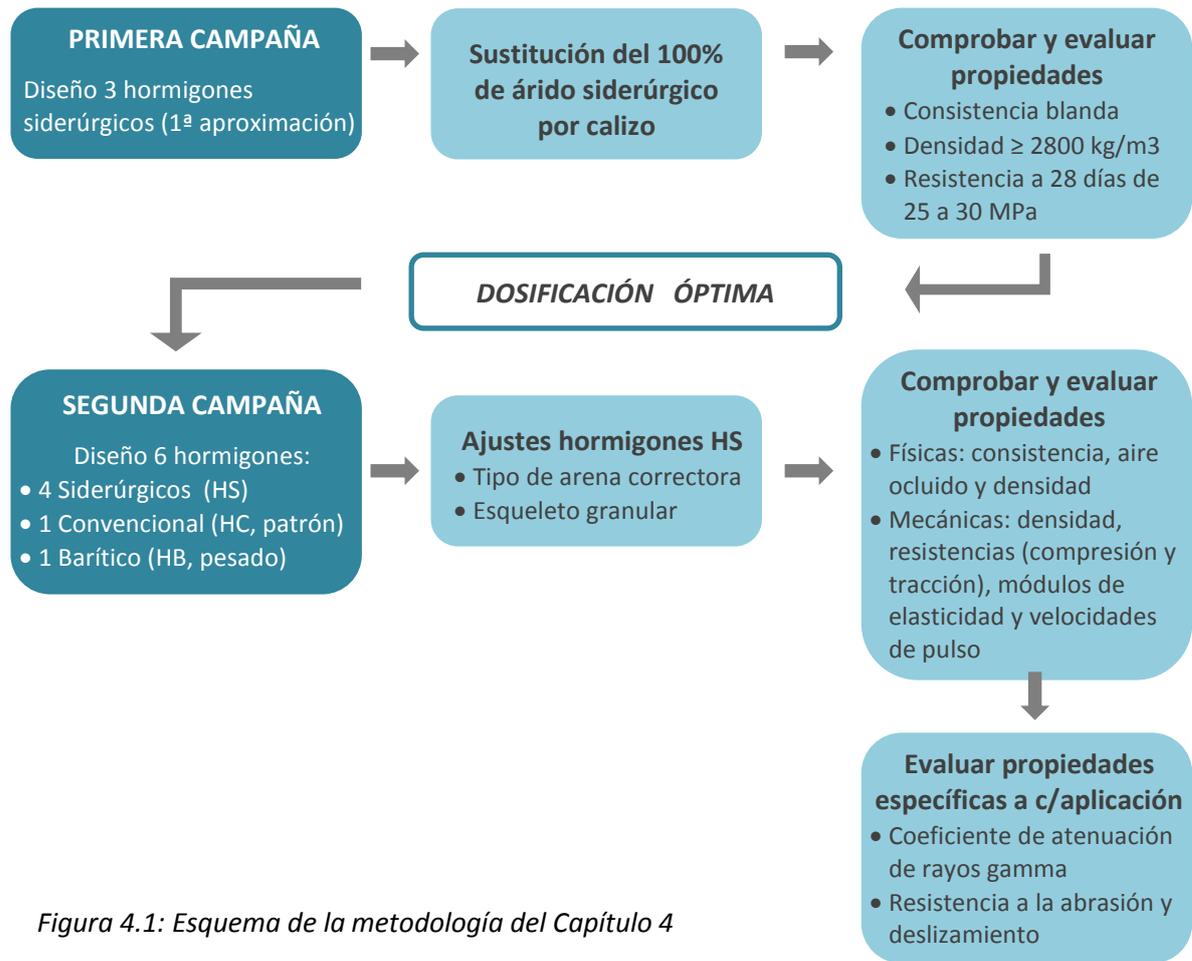


Figura 4.1: Esquema de la metodología del Capítulo 4

4.2 1ª CAMPAÑA: OPTIMIZACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN

En la 1ª campaña experimental, realizada en Julio del 2011, se diseñaron tres hormigones siderúrgicos, a partir de la sustitución del 100% de áridos calizos por siderúrgicos, para una dosificación de referencia de hormigones convencionales. El objetivo fue determinar una dosificación siderúrgica óptima, que cumpliera con los criterios de diseño tanto en estado fresco como endurecido, como punto de partida para el diseño de las dosificaciones de la 2ª campaña experimental. Los criterios de diseño para los hormigones fueron los siguientes:

1. Hormigón tipo HA-25-B-20 / IIa
2. Contenido de cemento 275 kg/m³
3. Relación agua cemento (a/c) máxima de 0,55
4. Consistencia blanda, es decir, un cono de 5-10 ± 1 cm
5. Densidad de 2 800 kg/m³ (hormigones pesados)
6. Resistencia a compresión a 28 días de 25 a 30 MPa

4.2.1 Materiales

La caracterización de los áridos utilizados para la fabricación de hormigones siderúrgicos de la primera campaña experimental se detalla en el Capítulo 3. Para todas las dosificaciones se utilizó un cemento CEM II/A-L 42,5 R. El agua era proveniente de la red de abastecimiento. Así mismo, se utilizaron dos tipos de aditivos, un polifuncional fluidificante (Melcret PF-75) y un policarboxilato superplastificante (Visconcrete 5940). Esta combinación de aditivos permite unos resultados satisfactorios de trabajabilidad con unos costes razonables y, en cualquier caso menors se utilizar sólo un superplastificante.

4.2.2 Dosificaciones

De cara a evaluar la influencia de los áridos siderúrgicos en la densidad, trabajabilidad y resistencia del hormigón, se han diseñaron tres hormigones siderúrgicos variando el tipo y la cantidad de los finos; tal como se muestra en la Tabla 4.1, donde se incluyen las dosificaciones de cada una de ellas, así como el total de masa, sin incluir los aditivos.

MATERIALES (Kg/m ³)		HSf		HSc		HS0/4	
		a	b	a	b	a	b
Árido Calizo	Filler	300		150		--	
	0/4	--		260		870	
Árido Siderúrgico EAF	0/4	1130		1000		416	
	4/10	136		136		136	
	10/20	831		831		831	
CEM II/A-L 42,5 R		275		275		275	
Visconcrete 5940		0,83		0,83		0,83	
Agua		150	140	150	140	150	
PF - 75		1,93		1,93		1,93	
Total		2822	2812	2802	2792	2678	

Tabla 4.1: Dosificaciones 1ª campaña experimental (Julio 2011)

Debido a la falta de finos en las arenas siderúrgicas (ver granulometría en Anejos) se han empleado finos de procedencia caliza, filler y arena 0/4 mm, como prevención a la posible falta de trabajabilidad. Así pues, las dosificaciones se diferencian por los contenidos de finos y la combinación entre ellos. La HSf con mayor cantidad de arena siderúrgica y adición de filler, la HS0/4 con menor cantidad de arena siderúrgica y la adición de arena caliza y la HSc con la combinación de ellas.

Con la finalidad de evaluar la reproducibilidad de los resultados y corregir disfunciones de trabajabilidad, se analizó la consistencia al momento de la fabricación, mediante el cono de Abrams. Por esta razón se realizó una modificación en la relación a/c (de 0,55 a 0,51) de las dosificaciones Hsf y HSc, generando así la serie "b". Mientras que para la dosificación HS0/4 se mantuvo la misma dosificación con la finalidad de reforzar los resultados obtenidos de consistencia.

4.2.3 Método de fabricación del hormigón

El método de fabricación del hormigón fue el mismo para las dos campañas experimentales, discrepando solamente en el proceso de llenado de probetas. El amasado se realizó en las instalaciones de la empresa PROMSA, mediante una amasadora de eje vertical de 250 litros de capacidad máxima (Figura 4.2a).

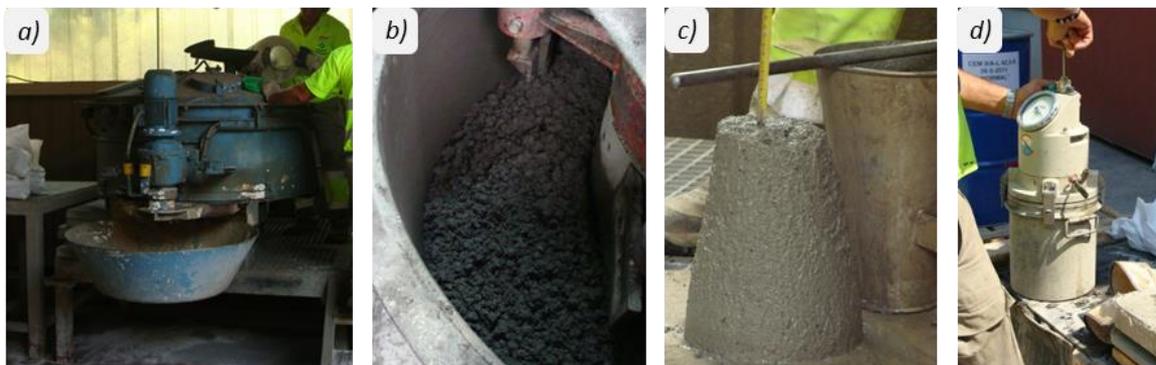


Figura 4.2: a) amasadora; b) amasada final; c) cono de Abrams y c) medición aire ocluido

El esquema de vertido y los tiempos de cada fase es el siguiente:

- Con la amasadora parada, se introducía el árido, la arena y el filler, los cuales se mezclaban posteriormente durante 30 segundos.
- Con la amasadora en movimiento, se agregaba el cemento y se amasaba otros 30 segundos.
- Se añadía el 90% del agua y se agitaba durante 1 minuto.
- El aditivo fluidificante se incorporaba, con parte del resto del agua y se removía durante 1 minuto más.
- Se incorporaba el aditivo superplastificante con el resto del agua y se hacía un amasado final de 4 minutos (Figura 4.2b).

Tras el amasado, se realizaba una primera comprobación de la consistencia mediante el cono de Abrams (Figura 4.2c), de acuerdo a la norma UNE-EN 12350-2:2009, buscando siempre cumplir con el criterio de diseño, obtener una consistencia de 6-9 cm. Así mismo, se

medía el porcentaje de aire ocluido en el hormigón fresco (Figura 4.2d) conforme la norma UNE-EN 12350-7:2010. El procedimiento para el llenado de los moldes se realizó de acuerdo a la norma UNE EN 12390-2:2009, mediante el método de picado (Figura 4.3a).

En total, se fabricaron 36 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm (Figura 4.3b) mediante la producción de 100 litros de hormigón por cada dosificación, a parte del material preciso para los ensayos en estado fresco. La temperatura ambiente durante la fabricación de los hormigones fue entre los 28 y 32 °C.



Figura 4.3: a) Llenado de moldes (método picado) y b) total probetas 1ª campaña

Durante la fabricación de los hormigones, se tuvo una incidencia en relación a los áridos siderúrgicos. Una vez que estos ya estaban pesados y preparados para realizar el amasado, se encontró que la bolsa que contenía la arena siderúrgica 0/4 mm, utilizada en la dosificación HSO/4a, presentaba cierta humedad generando trozos compactados (Figura 4.4a).

En un principio se dio por sentado que dichos trozos se desmenuzarían durante el proceso de amasado, lo cual no fue del todo cierto, ya que, al revisar la mezcla se observó que la pasta no había logrado penetrar (Figura 4.4b), teniendo como consecuencia una mezcla no homogénea. Es importante mencionar que no se encontraron más anomalías como ésta en el resto de las dosificaciones

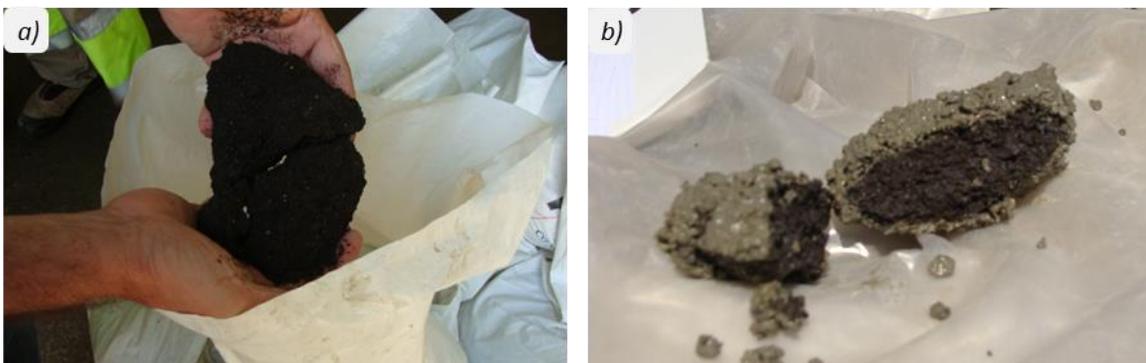


Figura 4.4: Arena siderúrgica 0/4 mm comprimida, a) antes y b) después de hormigonar

4.2.4 Propuesta experimental

Para el estudio del comportamiento de los hormigones siderúrgicos en estado fresco y endurecido, se analizaron las propiedades citadas en la tabla 4.2, de acuerdo a su normativa correspondiente. Así mismo, se menciona la cantidad de probetas utilizadas y la edad de ensayo. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Promotora del Mediterráneo S.A. (PROMSA).

PROPIEDAD	NORMATIVA	PROBETAS (cm)	Nº por amasada	EDAD (días)
Trabajabilidad (cono de Abrams)	UNE-EN 12350-2:2009			
Aire ocluido	UNE-EN 12350-7:2010	---	---	---
Densidad en fresco	UNE-EN 12350-6:2009			
Resistencia a compresión simple	UNE-EN 12390-3:2009	Cilíndricas 15 x 30	3	7 y 28

Tabla 4.2: Propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido

4.2.5 Resultados y análisis

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos para los ensayos del cono de Abrams, así como, el porcentaje de aire ocluido y la densidad en fresco para cada una de las dosificaciones. Respecto a la *trabajabilidad*, los valores del cono de Abrams para las dosificaciones HSf y HSc son mayores como respuesta a la adición de filler, el cual aporta más fluidez al hormigón. Por otro lado, el comportamiento de reducción en el cono de Abrams es igual en ambos casos, al reducir la cantidad de agua (series b). Las series b de las dosificaciones HS y HSf tienen valores similares a los obtenidos para las dosificaciones HS0/4. La explicación responde a que la dosificación HS0/4 tiene mayor cantidad de finos al cambiar el esqueleto granular (menor arena siderúrgica 0/4 mm y mayor cantidad de arena caliza 0/4). Como consecuencia será necesaria mayor cantidad de agua debido a que los finos tienen mayor superficie específica y el agua de mojado también es mayor.

DOSIFICACIÓN		CONO DE ABRAMS (cm)	AIRE OCLUIDO (%)	DENSIDAD (kg/m ³)
HSf	a	10	3,1	2 738
	b	6	2,9	2 769
HS0/4	a	11	4,0	2 694
	b	5	3,1	2 781
HSc	a	6	4,8	2 556
	b	4	4,9	2 600

Tabla 4.3: Propiedades físicas en estado fresco, 1ª campaña experimental

En relación al *% de aire ocluido*, este es un 50% mayor en el caso de los hormigones HS0/4 en comparación con el valor medio de los HSf y HSc (3,2%). La razón a esto es la falta de filler, el cual tiene mayor potencialidad para rellenar los microhuecos de la matriz del hormigón. Finalmente, se observa que las *densidades* son mayores en las dosificaciones HSf y HSc, esto es debido a que su esqueleto granular cuenta con mayor cantidad de arena siderúrgica 0/4 mm. La densidad del hormigón depende de la propia densidad de los áridos. Siendo la arena siderúrgica 0/4 mm 23% y 33% mayor que la densidad de la arena caliza 0/4 mm y del filler, respectivamente.

Las resistencias a compresión que se presentan en la Tabla 4.4 corresponden al valor medio de las 3 probetas ensayadas para cada dosificación, a cada edad.

DOSIFICACIÓN		7 días	28 días	% AUMENTO
HSf	a	21,6	28,5	31,9
	b	24,8	32,8	32,2
HS0/4	a	23,0	30,4	32,2
	b	30,5	36,7	20,3
HSc	a	32,5	38,6	18,8
	b	34,3	41,0	19,5

Tabla 4.4: Resistencias a compresión, 1ª campaña

En primer lugar, se observa que todas las dosificaciones cumplen con el valor de diseño a 28 días (25 a 30 MPa). Así mismo, la reducción de la relación a/c de las series “b” de las dosificaciones HSf y HSc, repercute favorablemente aumentando un 15% y 20% la resistencia a compresión a 28 días. Por otro lado, los porcentajes de aumento para estas dosificaciones de 7 a 28 días son similares, entorno del 30%.

Asimismo, se observa que las dosificaciones HS0/4 tienen mayor resistencia. Sin embargo, el incremento de resistencia entre 7 y 28 días es menor, en promedio un 19%. Esto se debe a que la cantidad de árido siderúrgico en estas dosificaciones disminuye y aumenta la cantidad de árido calizo, haciendo que el esqueleto granular sea menos rígido. Esto corresponde a la menor resistencia a la fragmentación de los áridos calizos, así como su mayor desgaste durante el proceso de amasado.

4.2.6 Conclusiones 1ª campaña experimental

Ante la previsión de fabricar hormigones pesados, el principal interés en esta campaña, tal como se ha dicho, era obtener un hormigón de una densidad igual o superior a 2800 kg/m³; así como, una consistencia blanda y resistencias a compresión a 28 días, similares a las de un hormigón convencional (25 a 30 MPa), en unos límites razonables de costes económicos. Los resultados muestran que, en conjunto, todas las dosificaciones cumplen las prestaciones

requeridas, excepto la de densidad, que se quedan un poco por debajo de lo inicialmente requerido (Ver tabla 4.3)

Las densidades menores (en el entorno de 2600 kg/m^3) se obtienen para la serie HSc, que por contra es la que mayor resistencia presenta. Este resultado puede ser fruto, por un lado, a la granulometría de combinación de los finos (filler) y las arenas y, por otro lado, a la mayor cantidad de aire ocluido. Todo ello conduce a una estructura interna más porosa (reflejada en la menor densidad), si bien con áridos más resistentes y de un mayor coeficiente de rozamiento interno (que aporta el árido siderúrgico), reflejada en la mayor resistencia. Esto puede verse, asimismo en la menor consistencia de los hormigones de esta serie (Tabla 4.3): Como consecuencia de estos resultados se descarta las dosificaciones tipo HSc para las siguientes campañas.

De las dos dosificaciones con dos relaciones a/c (HSf y HSc), las series "a" han dado, como era de esperar, una mayor extensión de flujo y una menor resistencia que las series "b", como consecuencia de la mayor cantidad de agua en las series "a". En consecuencia cara a la planificación de la 2ª campaña se descartan las series tipo "a".

Así pues, las dosificaciones a tomar en cuenta son las series "b" de los HSf y HSc, los cuales presentan valores similares para todos los criterios de diseño. Sin embargo, al ser el objetivo de este estudio la mayor sustitución del árido siderúrgico posible, sin afectar las propiedades físicas y químicas, se determinó que la dosificación HSfb sería la base para el diseño de los hormigones de la 2ª campaña.

4.3 2ª CAMPAÑA: COMPORTAMIENTO DE LOS HORMIGONES

El objetivo de esta 2ª campaña, desarrollada entre Noviembre 2011 y Diciembre 2012, era evaluar el comportamiento físico y mecánico de los hormigones de densidad superior a 2800 kg/m^3 para su utilización con responsabilidad estructural, con una función añadida, relativa a su capacidad para absorción de rayos gamma.

La misma consistió en el diseño de seis dosificaciones: 4 hormigones siderúrgicos (creados a partir de la dosificación HSfb de la primera campaña experimental), un hormigón convencional (considerado como patrón) y un hormigón pesado con árido barítico. Los criterios de diseño para los tres tipos de hormigones fueron los mismos que los definidos en la 1ª campaña. El programa experimental planteado fue muy extenso, incluyendo el estudio de propiedades tales como trabajabilidad, densidad, aire ocluido, resistencia a compresión y tracción, módulos de elasticidad, velocidad de pulso, atenuación de rayos gamma, resistencia al deslizamiento y a la abrasión.

4.3.1 Materiales

En esta 2ª campaña, al igual que en la 1ª campaña, se utiliza cemento CEM II/A-L 42,5 R, agua proveniente de la red de abastecimiento y dos aditivos (polifuncional fluidificante y policarboxilato superplastificante); mientras que para la fabricación de los hormigones siderúrgicos de esta 2ª campaña experimental se utilizaron arenas correctoras de origen calizo y silíceo (fracción 0/2 mm.) en sustitución al filler empleado en la primera campaña. Este pequeño ajuste se realizó con la finalidad de aumentar la densidad del hormigón sin modificar la cantidad de finos, siendo ésta la necesaria para mantener la trabajabilidad de diseño.

En la Tabla 4.5 se presentan las características físicas de los finos utilizados. Como puede observarse, las arenas correctoras tienen valores similares de densidad, sin embargo, la absorción del agua en el caso de la arena silícea es aproximadamente un 50% mayor que para la arena caliza. Las fichas técnicas de las arenas están contenidas en Anejo 1. Para el resto de los hormigones, las características de los áridos utilizados se han presentado con anterioridad en el Capítulo 3.

ARENA CORRECTORA	DENSIDAD (kg/m ³)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)
Silícea	2 600	1,30
Calzárea	2 680	0,89

Tabla 4.5: Propiedades físicas de las arenas correctoras

4.3.2 Dosificaciones

En la Tabla 4.6 se muestran las dosificaciones correspondientes a la 2ª campaña experimental, partiendo como base de la dosificación HSfb de la 1ª campaña experimental, tal como se ha dicho, si bien se introduce un pequeño ajuste de los finos, sustituyendo el filler por arenas correctoras 0/2 mm, con la finalidad de aumentar la densidad de los hormigones. Así pues se hace la 1ª diferenciación entre los hormigones siderúrgicos dependiendo de la arena correctora utilizada, "HSS" con arena silícea y "HSC" con arena caliza. La tipología de la arena tiene como objetivo analizar la repercusión en la trabajabilidad a causa de sus propiedades físicas tal como la absorción de agua y granulometría.

Asimismo, se hizo una variación en la proporción del árido grueso siderúrgico, utilizando la nomenclatura "1" cuando la cantidad de la grava (fracción 10/20 mm) era 831 kg/m³ y "2" cuando se reducía la grava y aumentaba la gravilla (fracción 4/10 mm). Finalmente la nomenclatura "a y b" utilizada en todas las dosificaciones, corresponde a los ajustes realizados en la relación a/c, así como, en la cantidad de aditivo fluidificante (Melcret PF-75) o de ambas. Al igual que en la 1ª campaña esta actuación se tuvo durante la fabricación del hormigón al comprobar su consistencia. Esto tenía como objetivo evaluar la reproducibilidad o corrección de disfunciones.

MATERIALES (Kg/m ³)		HSS1		HSS2		HSC1		HSC2		HC		HAB	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Arena 0-2	Silíceo	295		295		--		--		--		--	
	Calcárea	--		--		300		300		--		--	
Árido Siderúrg. EAF	0/4	1130		1130		1130		1130		--		--	
	4/10	136		300		136		300		--		--	
	10/20	831		667		831		667		--		--	
Árido Calizo	0/4	--		--		--		--		1003		--	
	4/10	--		--		--		--		165		--	
	10/20	--		--		--		--		773		--	
Árido Barítico	0/20	--		--		--		--		--		3204	
CEM II/A-L 42,5 R		275		275		275		275		275		275	
Viscocrete 5940		0,83		0,83		0,83		0,83		0,83		0,83	
Water		152,7		143,2	149,5	140	133	140	146.4	145	155	140	123
PF - 75		1,93	2,75	1,93	2,75	1,93	2,75	1,93	2,75	1,93		1,93	
Total		2822	2823	2813	2820	2815	2809	2815	2822	2364	2374	3622	3605

Tabla 4.6: Dosificaciones 2ª campaña experimental (Noviembre/Diciembre 2011)

4.3.3 Método de fabricación del hormigón

El método de fabricación fue el mismo que el descrito para la 1ª campaña, discrepando solamente en el llenado de moldes, donde la compactación se hizo con mesa vibratoria como se observa en la Figura 4.5a [UNE EN 12390-2:2009]. De igual modo, al terminar el amasado se realizó la comprobación de la consistencia mediante el cono de Abrams y el porcentaje de aire ocluido [UNE-EN 12350-2:2009, UNE-EN 12350-7:2010]. En la Figura 4.5b-c se puede observar que el volumen de hormigón fabricado fue mayor, del orden de 180 litros por amasada, a parte del material preciso para los ensayos de fresco. Con un total de 37 probetas de diferentes medidas por dosificación.

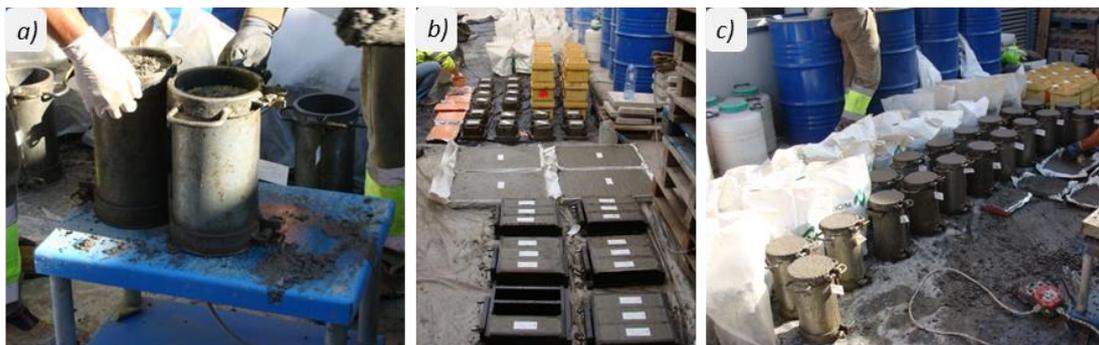


Figura 4.5: a) llenado de moldes (mesa vibratoria) y b) probetas para 4 amasadas

Al ser mucho más extensa esta campaña, la fabricación de los hormigones se realizó en tres fechas diferentes (cuatro amasadas por día). Las fechas de fabricación fueron: las primeras cuatro amasadas, correspondientes a las series “a” de los hormigones siderúrgicos (HSS1a, HSS2a, HSC1a y HSC2a) se realizaron el 23 de Noviembre del 2011, con una temperatura ambiente entre los 16-18°C. La segunda tanda compuesta por la serie “b” de los hormigones siderúrgicos (HSS1b, HSS2b, HSC1b y HSC2b) se elaboró el 29 de Noviembre del 2011 con una temperatura de 17°C. Finalmente la tercera y última tanda respondía a los hormigones convencionales y baríticos (series “a y b”), fabricados el 16 de Diciembre del mismo año, entre los 14 y 16°C.

4.3.4 Propuesta experimental

El objetivo del presente apartado es describir el programa de ensayos realizados en la 2ª campaña experimental. Para la caracterización de los hormigones en estado fresco se realizaron los mismos ensayos que en la 1ª campaña. Sin embargo, el estudio de propiedades mecánicas fue mucho más extenso. Así mismo, ante la posibilidad de emplear los hormigones siderúrgicos en elementos estructurales con protección radiológica, y para su aplicación en capas de rodadura de pavimentos bicapa, se estudiaron propiedades específicas.

En la Tabla 4.7 se presentan las propiedades estudiadas tanto en estado fresco como en estado endurecido, así como las normativas utilizadas en cada uno de ellos, las edades de ensayo y el número de probetas para cada ensayo. Debido a la amplitud del programa, y la complejidad de algunos ensayos y equipos, se mencionan los diferentes laboratorios que se utilizaron a nivel nacional e internacional.

Para los ensayos de resistencias al deslizamiento y desgaste se habían fabricado 5 probetas de 15 x 15 x 3 cm por dosificación, la superficie de éstas era demasiado rugosa por lo que fue imposible utilizarlas, ya que los resultados de éstas serían irregulares y no confiables, por lo que se decidió cortar las losas diseñadas para ensayos de durabilidad (mojado-secado).

El ensayo para determinar el *coeficiente de atenuación de rayos gamma* consiste en evaluar el perfil espacial y temporal de una muestra. El procedimiento de ensayo fue diseñado y desarrollado en el Laboratorio de Física Nuclear Aplicada (LFNA). En este ensayo se utilizaron probetas cúbicas, las cuales fueron cortadas por la mitad mediante un cortador de disco. La Figura 4.6a muestra la zona de corte correspondiente a una probeta de hormigón siderúrgico. Para obtener la espesura media de la probeta, se realizaron dos medidas por cada lateral mediante un pie de rey digital (Figura 4.6b).

PROPIEDAD	NORMATIVA	PROBETAS (cm)	Nº por amasada	EDAD (días)	Lab
Consistencia	UNE-EN 12350-2:2009	---	---	---	PROMSA
Aire ocluido	UNE-EN 12350-7:2010				
Densidad en freso	UNE-EN 12350-6:2009				
Densidad	UNE-EN 12390-7:2009	Cilíndricas 15 x 30	2	28	
Rotura a compresión	UNE-EN 12390-3:2009		6	7, 28,	
Rotura a tracción indirecta	UNE-EN 12390-6:2010		6	90	
Módulo de elasticidad	UNE-EN 12390-13:2014		4	70 y 90	
Módulo de elasticidad dinámico (ultrasonidos)	UNE-EN 12504-4:2006	4	UPC		
		Prismáticas 7,5x7,5x27,5		4	
Coefficiente de atenuación de rayos gamma	Ensayo propio	Cúbicas 10x10x10	2	---	LFNA
Resistencia (RD) al deslizamiento/derrape	UNE-EN 13036-4:2012	Prismáticas 15x20x5	4		LGAJ
Resistencia al desgaste por abrasión	UNE-EN 1339:2004/AC:2006	Cilíndricas 15x30	1		
		Prismáticas 15x20x5	3		

PROMSA: Laboratorio de Promotora del Mediterráneo S.A.; UPC: Laboratorio de Tecnología de Estructuras "Luis Agulló", Universidad Politécnica de Cataluña; LFNA: Laboratorio de Física Nuclear Aplicada, Universidad Estatal de Londrina; LGAJ: Laboratorio General de Ensayos de Applus®

Tabla 4.7: Programa de ensayos en estado endurecido

En la Figura 4.6c se muestra el equipo utilizado, el procedimiento consiste en generar un haz de radiación de rayos gamma con una intensidad conocida (I_0) por un emisor compuesto de: una mesa micrométrica que incluye una fuente de Cesio-137 con una energía de 661 keV. La onda de la radiación alcanza la probeta (fija en un soporte) de espesor x . Una parte de la radiación será atenuada por el material y otra parte, atravesará la muestra para llegar al receptor donde será medida la intensidad final (I_x). El coeficiente de atenuación se calcula a través de la ecuación 4.1, utilizando el promedio de varias mediciones en diferentes puntos sobre la misma muestra.

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I_x)}{x} \quad [4.1]$$

Cuando los hormigones son ensayados para aplicaciones de tipo radiológicas, se utilizan instrumentos nucleares, los cuales comúnmente utilizan energías de rayos X o gamma. El coeficiente de absorción contribuye tanto como reacción de dispersión, llamada dispersión de Compton, así como de absorción, llamada absorción Fotoeléctrica. Las aportaciones relativas de ambas son función de la energía del rayo incidente.

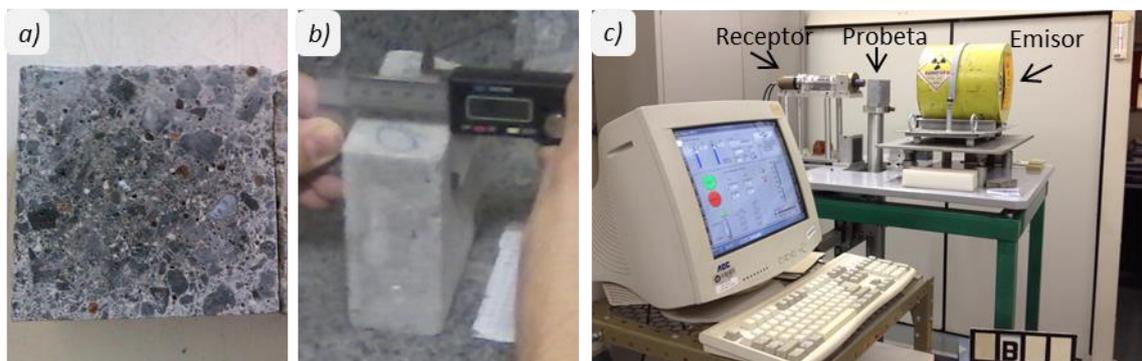


Figura 4.6: a) probeta cortada; b) medición de espesura y c) Equipo de ensayo

La Dispersión de Compton es el proceso dominante para energías de rayos X y gamma en el intervalo de 60 keV a 15 MeV, mientras que la absorción fotoeléctrica domina por debajo de los 60 keV. En la Dispersión de Compton los rayos pierden energía y se desvían en una nueva dirección por la colisión de un electrón libre. Por otro lado, en la absorción fotoeléctrica el rayo es completamente absorbido por un átomo, que después se emite como electrón que ha sido previamente consolidado.

La dispersión de Compton producida en los rayos será función de la densidad de la muestra que está siendo irradiada. En consecuencia, para la energía utilizada en esta investigación, el coeficiente de absorción será función de la densidad del hormigón [Malhotra y Carino 2003].

El ensayo de *resistencia al deslizamiento/derrape (RD)* se realiza pensando en la aplicación de estos hormigones en capas de rodadura de pavimentos de carreteras y aeroportuados. La medida y estudio de esta propiedad es fundamental sobre todo en carreteras con una intensidad de tráfico elevado, debido a que es un valor crítico de cuando el pavimento se encuentra mojado. El valor del RD depende de diferentes factores, algunos propios a la carretera y otros ajenos, tales como la responsabilidad del usuario, ya sea como la velocidad o estado de los neumáticos, así como de la propia naturaleza (lluvia, heladas, entre otras). La demanda de rozamiento es función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera. A su vez la capacidad de responder a esa demanda es en función del tipo y estado del pavimento [Kraemer C. et. al. 2004].

Es necesaria la comprobación periódica de la resistencia al deslizamiento, puesto que los niveles de adherencia de un pavimento evolucionan con el tiempo como consecuencia del pulido de la superficie por la acción repetida de los neumáticos. Existen diferentes equipos y principios de medida. El método utilizado en la presente investigación fue el del péndulo de fricción (TRRL) mostrado en la Figura 4.7, que lleva incorporado un patín, presionado por un muelle, el cual es soltado desde una posición horizontal. La pérdida de energía por el rozamiento del patín al pasar sobre la superficie de ensayo, se mide por la disminución en longitud de la oscilación hacia arriba por medio de una escala graduada. El ensayo de

Resistencia al Deslizamiento (RD) se realizó sobre una longitud neta de 126 mm, con zapata ancha y una temperatura de 20 °C (factor de corrección por temperatura aplicado).

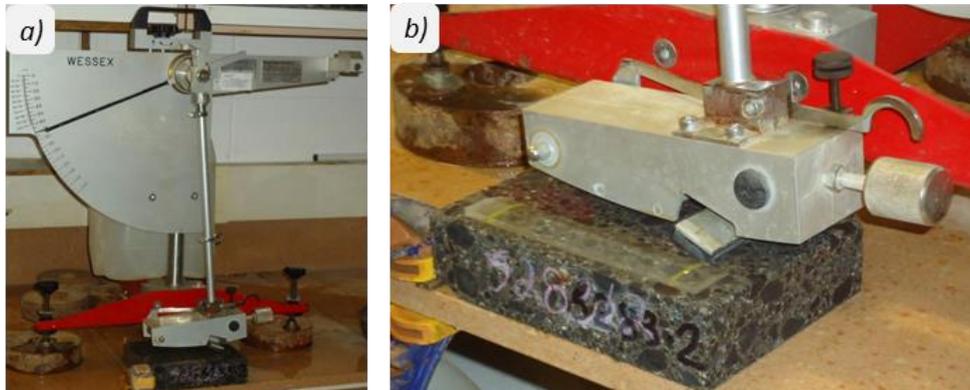


Figura 4.7: Ensayo del péndulo: a) equipo y b) contacto del patín con probeta

En cuanto a la resistencia al desgaste por abrasión, dicha abrasión del hormigón en su superficie se produce cuando sobre ella roza otro cuerpo o cuando sufre percusión. Esto puede ser debido a acciones de tipo mecánico provocada por el aire o por el agua al llevar partículas sólidas en suspensión, así como la acción de elementos granulares deslizando sobre la superficie. En la Figura 4.8 se muestra el equipo utilizado para la realización del ensayo y una muestra durante la realización del ensayo.

En gran medida, la resistencia al desgaste de un hormigón está relacionada con su resistencia a compresión. Cuando se trata de desgaste por rozamiento de pisadas o de tráfico ligero, la resistencia al desgaste de los áridos tiene una influencia superior a la propia resistencia a compresión del hormigón, dejándola en segundo término. Por el contrario, cuando se trata de acciones de percusión de pequeños objetos o partículas sólidas, la resistencia de unión de la pasta al árido es lo más importante a estudiar [Fernández, 1991].

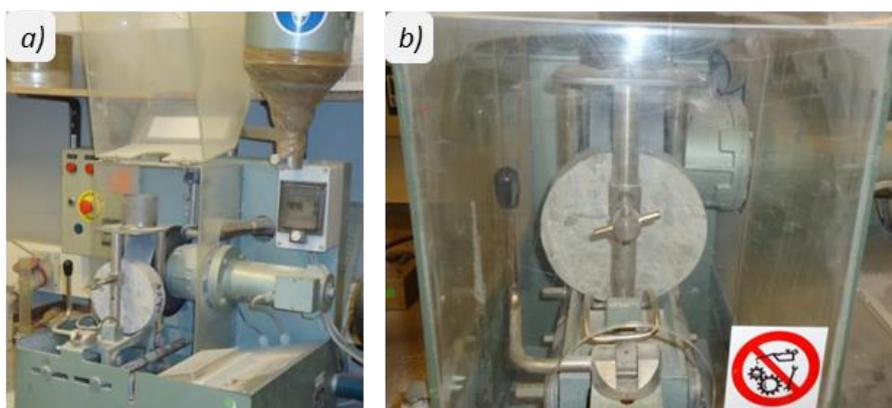


Figura 4.8: Ensayo de abrasión: a) equipo y b) realización del ensayo

4.3.5 Resultados y análisis

Estado en Fresco

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados para las propiedades físicas en estado fresco de cada amasada. En ella puede verse que la consistencia de los hormigones siderúrgicos tienden a ser menores que los obtenidos por los hormigones convencionales y baríticos. Esto se observa claramente en las dosificaciones donde la arena correctora es de origen silíceo (HSS1 y HSS2). Sin embargo, la adición de arena de origen calizo compensa la falta de finos de los áridos siderúrgicos, lo cual mitiga la disminución de la trabajabilidad. Con respecto al aire ocluido, si bien los resultados no tiene grandes variaciones, sí que se aprecia un menor porcentaje, en el caso de las dosificaciones con árido barítico (HAB) (entre un 2,4% al 2,7%). Ello puede responder a que el esqueleto granular del árido barítico sea más cerrada que el resto de las series.

Por otro lado, se puede apreciar que las densidades obtenidas se clasifican en tres grupos de acuerdo con la tipología de dosificación. Por un lado se encuentran las dosificaciones del hormigón convencional HC, con valores comprendidos entre 2350 y 2380 kg/m³, mientras que los hormigones con árido siderúrgicos HS con densidades comprendidas entre 2850 y 2870 kg/m³, un 20% mayor, con excepción de los HSC2 por debajo de los 2800 kg/m³. Por último las dosificaciones con árido barítico con valores en torno a 3420 kg/m³. Las variaciones observadas en la densidad aparente de los diferentes hormigones, son debidas a la propia densidad de los áridos empleados para fabricarlos.

DOSIFICACIÓN		Cono de Abrams (cm)	Aire Ocluido (%)	Densidad (kg/m ³)
HSS1	a	2	3,3	2 853
	b	2	3,0	2 869
HSS2	a	2	3,0	2 851
	b	1	3,1	2 863
HSC1	a	0,5	---	2 872
	b	5	4,0	2 819
HSC2	a	6	3,8	2 799
	b	4	3,7	2 797
HC	a	3	2,9	2 388
	b	7	4,5	2 350
HAB	a	9	2,7	3 420
	b	9	2,4	3 418

Tabla 4.8: Propiedades físicas en estado fresco, 2ª campaña experimental

Estado Endurecido

Los resultados obtenidos para cada una de las propiedades mecánicas presentados a continuación, son el valor medio del total de probetas estudiadas a cada edad. En lo que respecta a *la resistencia a compresión*, la Tabla 4.9 contiene las resistencias a compresión para cada dosificación a las tres edades estudiadas, al mismo tiempo, se presentan el porcentaje de incremento entre ellas.

En ella se aprecia que los valores obtenidos superan, en todos los casos y en gran medida, el valor de diseño de 30 MPa a 28 días. Sin embargo, se aprecian diferencias significativas entre los diferentes hormigones, agrupándose en dos. Por un lado, los hormigones siderúrgicos y convencionales presentan resultados similares con valores que van generalmente desde los 45 hasta los 50 MPa. Por otro lado, los hormigones con barita presentan para la resistencia mecánica valores menores, siendo un 25% inferior al hormigón de referencia, lo cual contrasta con su mayor densidad aparente. Esta diferencia es atribuible a las características particulares del árido barítico, que es propenso a la fragmentación y la exfoliación durante el proceso de mezcla. Esto compromete tanto las propiedades mecánicas, así como la zona de transición interfacial entre el árido y la pasta, mostrando así una repercusión negativa en la resistencia a la compresión.

DOSIFICACIÓN		7 días	28 días	AUMENTO 7 a 28 (%)	90 días	AUMENTO 28 a 90 (%)
HSS1	a	37,1	49,8	34,2	55,4	11,2
	b	40,4	50,7	25,5	59,1	16,6
HSS2	a	39,0	51,2	31,3	57,0	11,3
	b	39,9	50,8	27,3	57,5	13,1
HSC1	a	43,9	56,1	27,8	63,4	13,0
	b	33,2	41,7	25,6	51,2	22,8
HSC2	a	32,8	45,3	38,1	50,7	11,9
	b	35,5	46,4	30,7	54,0	16,4
HC	a	42,7	50,5	18,3	60,7	20,2
	b	36,6	50,4	37,7	53,2	5,6
HAB	a	28,3	37,2	31,5	39,1	5,1
	b	31,1	39,1	25,7	42,2	7,9

Tabla 4.9: Resistencias a compresión para las dosificaciones de la 2ª campaña

Así mismo, se observa que en general los valores de resistencia obtenidos entre los hormigones siderúrgicos, las dosificaciones con arenas correctoras de origen silíceo son mayores, con excepción del HSC1a. Sin embargo, cabe resaltar que las dosificaciones con arena caliza se mantienen por encima del valor requerido, por lo que la decisión de empleo entre una u otra en este caso, puede venir condicionada por razones económicas o de accesibilidad.

En la Figura 4.9 se analizan las tendencias de la resistencia a compresión con la edad del material. Esta figura muestra el promedio de las dosificaciones a y b para cada tipo de hormigón. Se puede ver que el HC y los hormigones con escoria presentan curvas muy similares, excepto por la dosificación HSC2. Así mismo, se observan los valores más pequeños para los HAB en todas las edades. El incremento de resistencia entre los 7 y 28 días presenta un orden de magnitud similar para todas las dosificaciones, situándose en torno al 30%. Esta variación corresponde con el comportamiento esperable, dado que el incremento de resistencias a edades tempranas está influenciado mayoritariamente por el contenido y tipo de cemento, que es la misma en todas las dosificaciones.

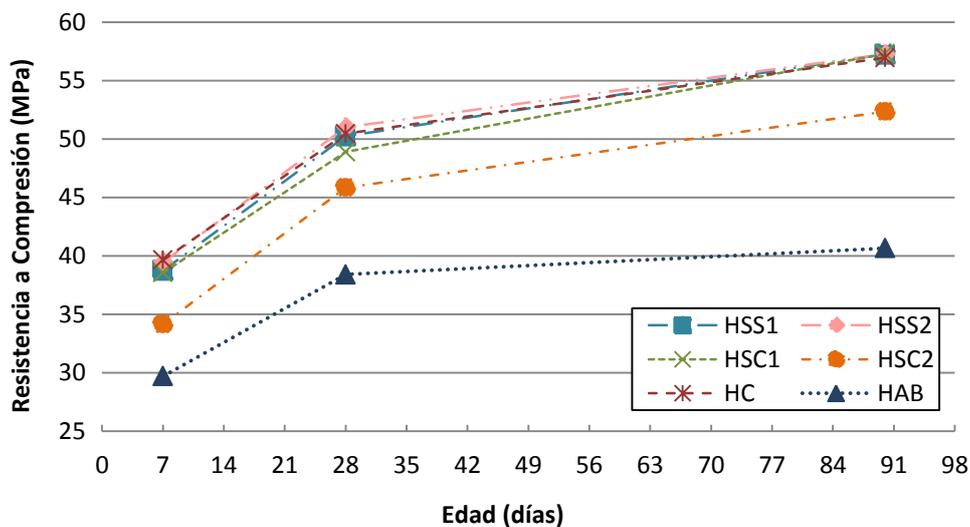


Figura 4.9: Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo

Sin embargo, la variación en la resistencia a compresión a largas edades muestra diferencias significativas con respecto al tipo de material. Las muestras del hormigón de referencia y el de árido siderúrgico presentan un incremento de resistencias entre 28 y 90 días del 15%. Contrasta esta variación con la que se aprecia para las dosificaciones con árido barítico, que apenas muestran un 6% de incremento en la resistencia en el mismo período. La porosidad de las muestras podría utilizarse para explicar la razón de la variación en términos de resistencia a la compresión, dado que debe existir una relación directa entre ambas propiedades. Sin embargo, esta comparación no es factible ya que los datos de porosidad no fueron estudiados en el presente estudio. Como alternativa para explicar la variación observada en las propiedades mecánicas se utiliza el aire ocluido en estado fresco como parámetro de referencia cualitativa.

A pesar de que la relación entre la resistencia y el aire ocluido no es tan evidente o directo en este caso, se espera que al tener un mayor porcentaje de aire ocluido, la porosidad sea mayor y por otro lado, la resistencia a compresión sea menor. La Figura 4.10 muestra la relación entre el aire ocluido y la resistencia mecánica a 90 días. Como se mencionaba, al aumentar el aire ocluido, la resistencia se ve reducida. Esto es especialmente evidente en el

hormigón convencional, que presenta una reducción del 12% en la resistencia cuando el aire ocluido va de 2,9% a 4,5% (diferencia entre rangos 1,6). En el caso de los HAB siguen el mismo comportamiento, sin embargo, la reducción es mayor del 7% en menor rango de diferencia de porcentajes de aire ocluido (diferencia de 0,3), mientras que para los HSS1, la reducción es del 6% en el mismo rango de diferencia (diferencia de 0,3). Finalmente, para los HSC1 la reducción es del 6% en un rango de diferencia del 0,1 entre porcentajes.

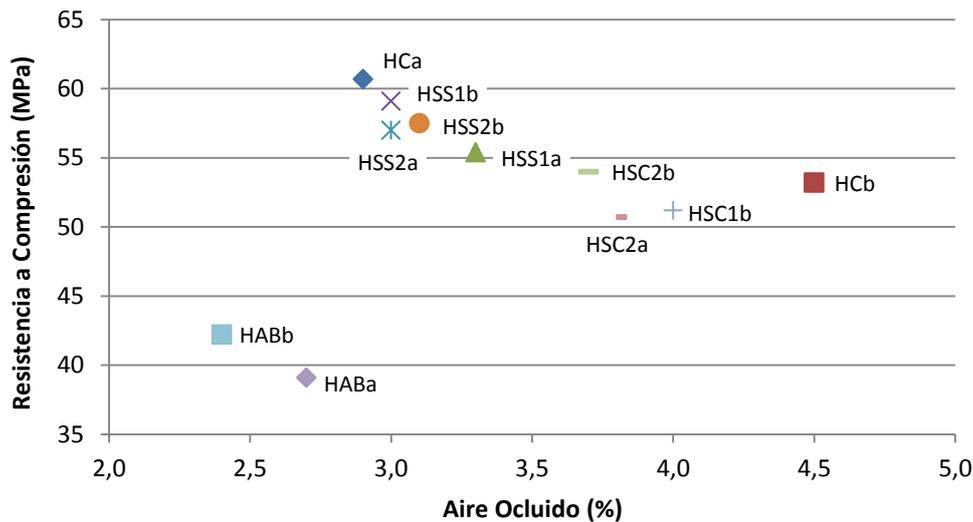


Figura 4.10: Influencia del aire ocluido en la resistencia a la compresión

Por otro lado, las resistencias a tracción indirecta a cada edad y su porcentaje de aumento entre ellas, se presentan en la Tabla 4.10. Las resistencias a tracción a los 28 días, para las series de los hormigones HS y HC se sitúan en un promedio de 3,3 MPa. En el caso de los HAB, se obtienen porcentajes más bajos, con valores de 2,0 MPa.

DOSIFICACIÓN		7 días	28 días	AUMENTO 7 a 28 (%)	90 días	AUMENTO 28 a 90 (%)
HSS1	a	2,5	3,3	32,0	3,8	15,2
	b	2,7	3,3	22,2	3,9	18,2
HSS2	a	2,9	3,4	17,2	3,7	8,8
	b	2,8	3,5	25,0	4,0	14,3
HSC1	a	3,2	4,3	34,4	4,4	2,3
	b	2,5	3,0	20,0	3,6	20,0
HSC2	a	2,6	3,6	38,5	3,7	2,8
	b	3,0	3,3	9,8	3,5	6,1
HC	a	3,4	3,5	2,9	4,2	20,0
	b	3,9	3,1	-20,5	3,5	12,9
HAB	a	2,3	2,0	-13,0	1,8	-10,0
	b	2,3	2,0	-13,0	2,0	0,0

Tabla 4.10 Resistencias a tracción para las dosificaciones de la 2ª campaña

De manera similar a lo observado en el ensayo de resistencia a compresión, el uso de barita también condujo a una reducción de la resistencia a tracción del hormigón. A los 28 días, el hormigón barítico tiene una reducción aproximadamente del 42% y 53% en comparación con el hormigón convencional y siderúrgico, respectivamente. Además, la resistencia a tracción de los hormigones baríticos disminuye o permanece constante en el tiempo (90 días), mientras que la resistencia a tracción del resto de hormigones aumenta para el mismo período.

Respecto a los hormigones siderúrgicos, nuevamente se observan comportamientos similares en todas sus series. Por un lado, los resultados son similares para todos los casos, y por el otro, se observan mayores dispersiones en el caso del empleo de arenas calizas, siendo más uniformes las de origen silíceo. Así mismo, para estos hormigones no se aprecian diferencias reseñables por el diferente esqueleto para una misma tipología, es decir, no presenta diferencias entre los HSS1 y HSS2 o de los HSC1 y HSC2.

En la Figura 4.11a se muestran la resistencia a tracción media para cada tipo de hormigón a las diferentes edades. En el caso de los hormigones convencionales y con árido siderúrgico, la evolución de la resistencia a tracción parece estar regida por la evolución de las propiedades mecánicas de la pasta debido a la hidratación del cemento. Por el contrario, la friabilidad de la barita o la zona de interface deficiente que se produce después de realizar el proceso de amasado (resultados del ensayo de la influencia de amasado en la granulometría), actúan como límite para la evolución de la resistencia a tracción para los hormigones con árido barítico.

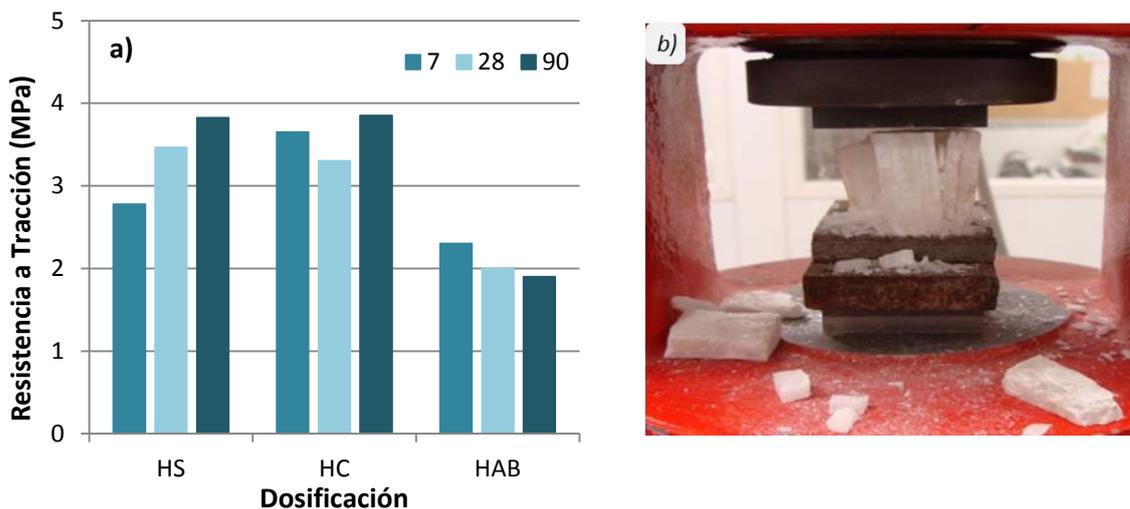


Figure 4.11: a) Resistencias a tracción; b) delaminación por compresión del árido barítico

En cuanto a las resistencias mecánicas, está claro que el rendimiento de los hormigones baríticos es condicionado por la microestructura compuesta de capas adyacentes con interfaces (Figura 3.7, Capítulo 3) y el patrón de craqueo experimentado por la barita bajo compresión. Por lo que, al someter al agregado a una compresión crítica paralela a dichas

capas (cargas reducidas), se produce la fractura debido a la delaminación de éstas (Figura 4.11b). Otra posible razón de sus limitantes es la producción de polvo alrededor del grano generado durante el proceso de amasado, comprometiendo así la zona de interface entre la pasta y el cemento. Esto tiene como resultado las repercusiones negativas observadas en las resistencias mecánicas.

En la Tabla 4.11 se muestran los resultados obtenidos para los *módulos de elasticidad estáticos y dinámicos* sobre probetas cilíndricas, así como los módulos dinámicos de las probetas prismáticas para cada dosificación. El módulo estático está influenciado principalmente por las características de los agregados tales como la resistencia, porosidad y dureza. Esta influencia se revela al analizar la variación de los módulos estáticos entre las diferentes dosificaciones.

DOSIFICACIÓN		MÓDULO ESTÁTICO (GPa)		MÓDULO DINÁMICO (GPa)			
				Cilíndricas		Prismáticas	
Edad (días)		70	90	70	90 ds	70	90
HSS1	a	44,23	43,11	56,76	55,97	58,40	59,39
	b	47,61	46,12	60,55	59,53	58,86	59,41
HSS2	a	44,04	43,72	55,34	54,73	57,29	58,23
	b	47,29	45,23	58,90	57,64	59,14	60,91
HSC1	a	49,27	48,30	61,41	59,91	62,34	59,58
	b	42,60	43,06	55,78	55,40	58,70	59,47
HSC2	a	43,16	43,22	54,16	54,34	55,98	55,07
	b	45,84	44,86	56,94	55,46	55,75	58,77
HC	a	41,50	40,95	51,10	52,07	53,62	56,00
	b	39,18	38,16	50,43	49,41	54,00	55,39
HAB	a	25,84	26,04	34,07	34,13	37,36	37,76
	b	27,00	27,58	36,59	35,29	38,94	38,42

Tabla 4.11: Módulos de elasticidad estáticos y dinámicos, 2ª campaña

Los hormigones baríticos muestran un valor sustancialmente menor, en promedio 40% menos que los hormigones convencionales. Por el contrario, los hormigones siderúrgicos exhiben un valor 10% mayor en comparación con los HC, independientemente del esqueleto granular o arena correctora que se haya empleado. A pesar de que los áridos siderúrgicos presentan una mayor porosidad, éstos son aproximadamente 40% más duros que los áridos calizos. Por consiguiente los áridos siderúrgicos deben proporcionar más rigidez a la matriz, lo que limita la deformación de los hormigones.

Así mismo, los módulos dinámicos calculados con la velocidad de pulso ultrasónico están directamente relacionados con la densidad del material. En la práctica, los materiales con mayor densidad tienden a presentar módulos dinámicos más altos. Por lo tanto, se

esperaba que la adición de barita en hormigones, diera a lugar a un aumento en el módulo dinámico en comparación con el resto de agregados.

No obstante, los resultados obtenidos para los hormigones baríticos contradijeron tal hipótesis, al presentar valores del 40% y 50% menores que los obtenidos para los HC y HS, respectivamente. Por lo que, se puede resumir que al fabricar hormigones con barita, el módulo dinámico no tendrá relación directa con la densidad del material. Dicho de otro modo, el módulo dinámico será el reflejo de la mala conexión entre la pasta de cemento y el árido (mencionado anteriormente), por la capa de polvo fino en los granos que se forma durante el proceso de amasado. Esta afectación en la interface afecta la transmisión de los pulsos ultrasónicos.

Por otro lado, se observa que los módulos de elasticidad dinámicos muestran las mismas tendencias y valores aproximadamente del 30% mayores que los módulos estáticos para todos los casos, esto concuerda con los resultados según Sena y Pazini, 2003. Dicho en otras palabras, la relación entre el módulo dinámico y estático es lineal con una pendiente de 1.274, como se muestra en la Figura 4.12a, con una correlación de $R^2 = 0,996$. Para la correlación se utilizaron los valores medios de los módulos elásticos para los hormigones HSS, HSC, HC y HAB a 90 días (Figura 4.12b).

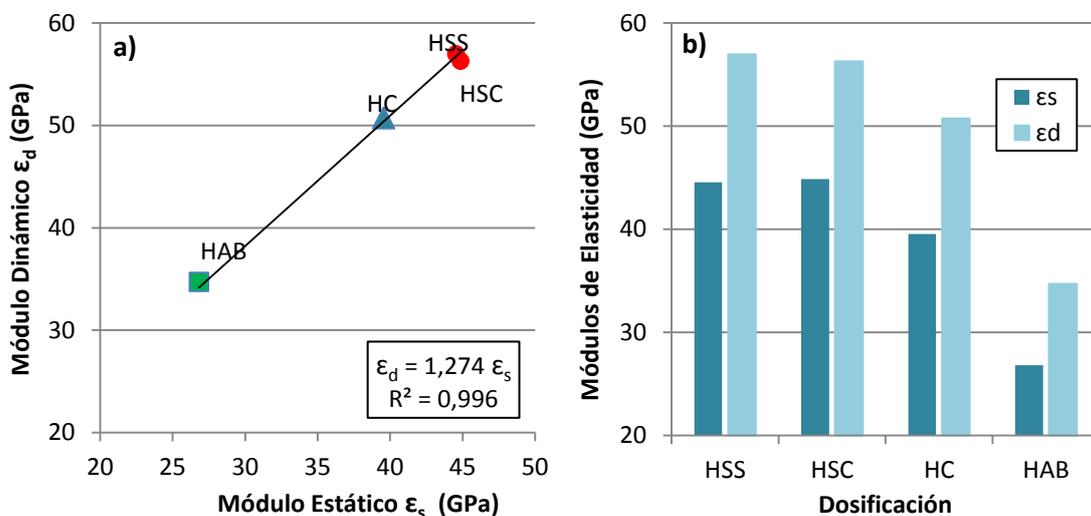


Figura 4.12: a) Correlación entre ϵ_s y ϵ_d ; b) Promedio de los módulos de cada dosificación a 90 días

La Tabla 4.12 se presentan los valores del módulo dinámico experimentales y los calculados con la función lineal propuesta en comparación con la ecuación 4.2 estimada de Popovics 1975, donde se toma en cuenta la densidad. Está ecuación ha sido aplicada exitosamente para hormigones ligeros y normales.

$$\epsilon_s = k \epsilon_d 1.4 \rho - 1 \quad [4.2]$$

Los resultados muestran que la ecuación de Popovics proporciona una predicción razonable para los hormigones siderúrgicos y convencionales. Sin embargo, se sobreestima los valores del módulo dinámico en aproximadamente 38% en el caso de los hormigones con barita. Con esto se corrobora el comportamiento atípico presentado por la barita en comparación con el resto de los áridos utilizados.

DOSIFICACIÓN	ϵ_d EXPERIMENTAL	$\epsilon_d = 1.26 \epsilon_s$	ϵ_d POPOVICS
HSS	56,97	56,13	58,51
HSC	56,28	56,52	58,25
HC	50,74	49,84	46,99
HAB	34,71	33,78	46,25

Tabla 4.12: Comparativa de módulos dinámicos experimentales y ecuación de Popovics

En la Tabla 4.13 se exponen las velocidades de pulso para cada tipo de hormigón, tanto para probetas cilíndricas como prismáticas, a 70 y 90 días. Estos resultados dan soporte a lo observado hasta ahora. La velocidad promedio para los hormigones convencionales y siderúrgicos, son 4,75 y 4,97 km/s, respectivamente. Mientras que para los hormigones baríticos la velocidad promedio es 3,45 km/s, siendo la diferencia entre éstos y los HS y HC de un 39% menor.

DOSIFICACIÓN	Edad (días)	VELOCIDAD DE PULSO (km/s)			
		Cilíndricas		Prismáticas	
		70	90	70	90
HSS1	a	4,70	4,67	4,77	4,81
	b	4,84	4,80	4,77	4,80
HSS2	a	4,64	4,62	4,73	4,76
	b	4,78	4,73	4,79	4,86
HSC1	a	4,87	4,81	4,91	4,80
	b	4,69	4,67	4,81	4,84
HSC2	a	4,64	4,64	4,71	4,68
	b	4,76	4,69	4,71	4,83
HC	a	4,88	4,92	4,99	5,10
	b	4,88	4,83	5,05	5,12
HAB	a	3,33	3,33	3,48	3,50
	b	3,45	3,39	3,56	3,53

Tabla 4.13: Velocidades de pulso ultrasónico de las dosificaciones de la 2ª campaña

Para el diseño de estructuras de hormigón, es necesario contar con ecuaciones simplificadas para estimar las propiedades del propio material. Por esta razón, la Instrucción

Española (EHE-08) y el Model Code proporcionan este tipo de ecuaciones para calcular el módulo elástico en base a parámetros tales como la resistencia a compresión y la edad del hormigón. Las ecuaciones 4.3 y 4.4, respectivamente, muestran la formulación propuesta para hormigón convencional y de alta resistencia. Donde, f_{cm} representa la resistencia a compresión promedio a los 28 días, y α es el factor a tomar en cuenta dependiendo del tipo de árido.

$$\varepsilon = 21.5 \times 10^3 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad [4.3]$$

$$\varepsilon = 8500 \cdot \alpha \cdot (f_{cm})^{1/3} \quad [4.4]$$

En este sentido, dada la ausencia en el caso de hormigones con áridos siderúrgicos, el factor α se estima ajustando las ecuaciones para los resultados experimentales obtenidos para las resistencias a compresión y los módulos de elasticidad. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.14. Los valores para el factor en el caso de los HC son similares a los recomendados por la EHE-08 y el Model Code cuando se utiliza árido calizo. Se observa que el factor α para los HS es similar al del basalto de acuerdo con el Model Code, teniendo un valor promedio de 1,23. Así mismo, es notable el bajo valor obtenido para los áridos baríticos, con un valores promedio de 0,94 para la Instrucción Española y 0,80 con el Model Code.

DOSIFICACIÓN		EHE-08	MODEL CODE
HSS1	a	1.30	1.11
	b	1.22	1.04
HSS2	a	1.38	1.17
	b	1.47	1.25
HSC1	a	1.39	1.18
	b	1.44	1.22
HSC2	a	1.48	1.26
	b	1.46	1.24
HC	a	1.43	1.21
	b	1.47	1.25
HAB	a	0.92	0.78
	b	0.96	0.81

Tabla 4.14: Valores del factor α para las dosificaciones, según la EHE-08 y el Model Code

Propiedad del coeficiente de atenuación de rayos gamma

En la Figura 4.13 se exponen los coeficientes de atenuación obtenidos para las dosificaciones con árido siderúrgico y barítico, por medio de una línea discontinua se representa el valor medio de los hormigones convencionales como referencia. Basándose en

los resultados, se aprecia que la capacidad de protección radiológica para los áridos siderúrgicos es mayor que la de un hormigón convencional. En concreto, se obtiene un incremento del 11% en el valor del coeficiente de atenuación radiológica, por la utilización del árido siderúrgico. Se aprecia así mismo que, los diferentes tipos de esqueletos granulares y arenas correctoras utilizadas no influyen significativamente la atenuación medida.

Por otro lado, el coeficiente de atenuación para los hormigones baríticos es 40% mayor que para los HC y un 25% mayor que el promedio medido por las dosificaciones con árido siderúrgico. La diferencia observada para el caso de los HC se explica únicamente por la mayor densidad de la barita y consecuentemente su capacidad de proveer una mayor protección a la radiación de rayos gamma.

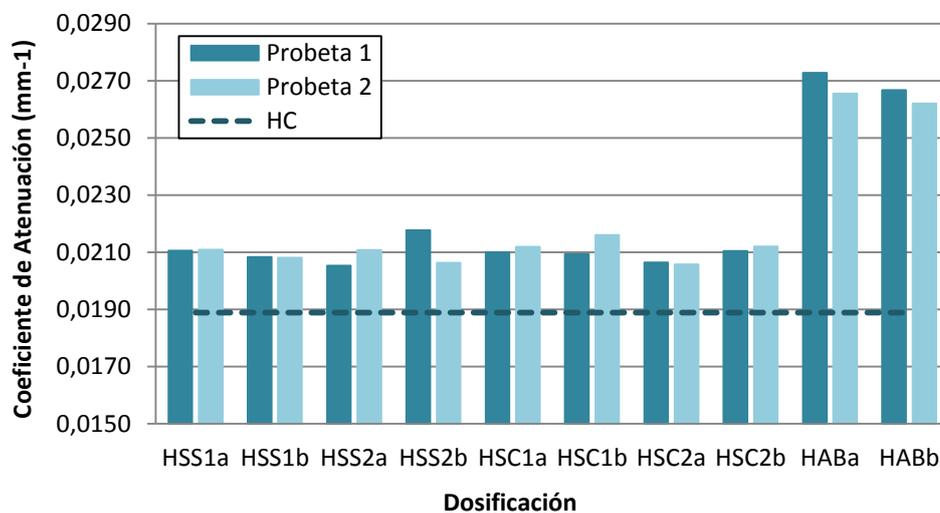


Figure 4.13: Coeficiente de Atenuación de rayos gamma correspondiente a cada dosificación

Por el contrario, en el caso de los HS otras razones tales como el contenido volumétrico de los áridos gruesos son responsables por la diferencia medida. La inclusión de la arena correctora en dichas dosificaciones, dio lugar a un contenido volumétrico de árido siderúrgico 85% más pequeño que el de la barita en los HAB. Por lo tanto, es razonable considerar que al igualar este contenido volumétrico, las diferencias entre los hormigones siderúrgicos y baríticos fueran menores. En dicho escenario y basado en una extrapolación lineal de los resultados, la diferencia se reduciría de 26% a aproximadamente 7%. Sin embargo, esta actuación generaría problemas de trabajabilidad en los hormigones debido a la falta de finos.

Con la finalidad de resaltar la importancia que tiene la densidad de los materiales sobre esta propiedad, se muestra en la Figura 4.14 la variación del coeficiente de atenuación (μ) de acuerdo a la densidad. Dicha figura contiene los datos para las diferentes dosificaciones, así como para diferentes tipos de materiales [Hubbell y Seltzer, 2004]. Independientemente de la naturaleza del resto de materiales incluidos, los resultados de todas las dosificaciones se

aproximan a la tendencia lineal presentada en el gráfico. Como resultado, el coeficiente de correlación (R^2) obtenido de la regresión lineal es igual a 0,9973. Nótese que la ecuación derivada de la regresión considera el coeficiente en mm^{-1} y la densidad en kg/m^3 .

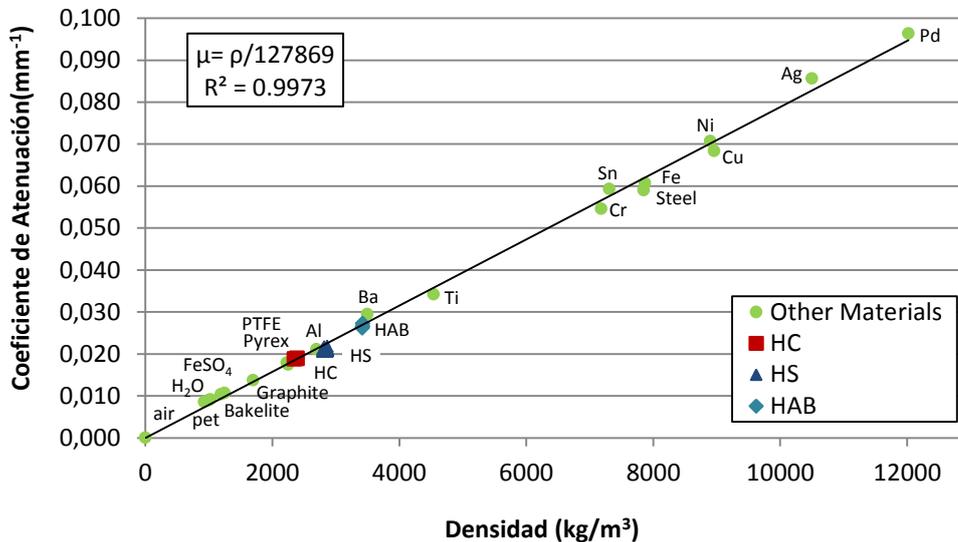


Figure 4.14: Función lineal del coeficiente de atenuación (μ) y la densidad (ρ)

Una medida indirecta de valorar la protección radiológica proporcionada por un material es, determinar el espesor mínimo requerido para atenuar el 50% de la energía incidente de una radiación. Este espesor es conocido por el parámetro HVL (por sus siglas en inglés half-value layer).

El HVL es inversamente proporcional al coeficiente de atenuación (μ) y se calcula de acuerdo a la ecuación 4.4. El HVL se utiliza como referencia en el diseño de las paredes de protección radiológica. En este sentido, el HVL deberá ser superior a mayor energía de rayos a atenuar [Kim et. al. 2012].

$$HVL = x_{1/2} = \ln(2)/\mu = 0.693/\mu \quad [4.4]$$

En la Figura 4.15 se muestran los espesores mínimos (HVL) necesarios para cada tipo de hormigón, en cada caso se muestra también el valor del coeficiente de atenuación, pudiendo comprobarse la relación existente entre ambos valores. En promedio, el hormigón convencional requiere un espesor de 36,5 mm, en comparación con 32,5 y 26 mm para el hormigón siderúrgico y barítico, respectivamente. El aumento en la capacidad de protección en comparación con un hormigón de referencia es evidente. De hecho, si se utilizara en una pared de hormigón siderúrgico o barítico, ésta se podría adelgazar 4 y 10 cm, respectivamente.

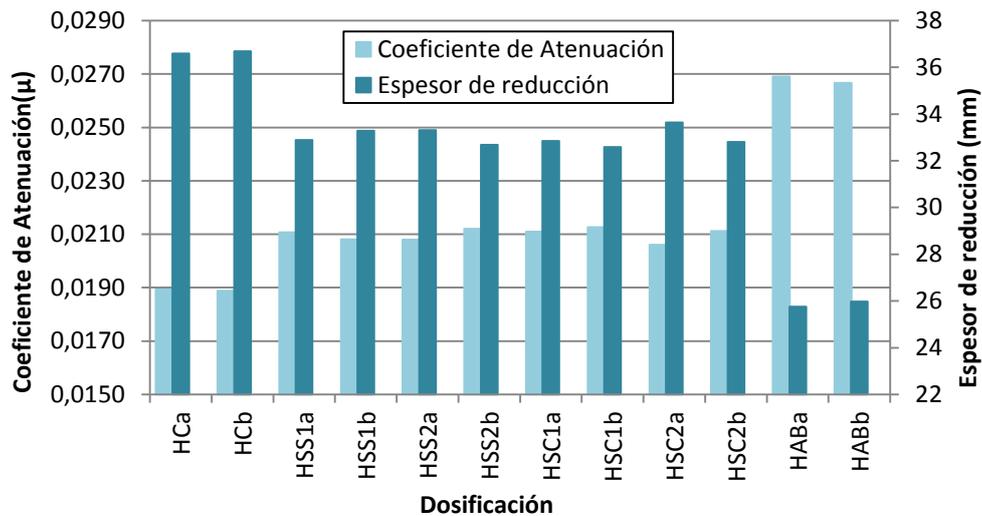


Figure 4.15: Interacción del coeficiente de atenuación (μ) y el espesor mínimo de reducción (HVL)

Propiedades de resistencia al desgaste por abrasión y deslizamiento

Ante la posibilidad de emplear los hormigones siderúrgicos en capas de rodadura de pavimentos bicapa se requirió definir, por un lado, las características de desgaste superficial, y por el otro, la resistencia al deslizamiento/derrape (RD) con el método del péndulo. En la Tabla 4.15 se presentan los resultados obtenidos para cada tipo de ensayo. La resistencia al desgaste por abrasión se representa en milímetros (mm), mientras que, la resistencia al deslizamiento es adimensional, por lo que se expresa en unidades PTV haciendo referencia a las siglas de valor de ensayo del péndulo en inglés.

Los valores mostrados en la tabla son valores medios de 1 probeta cilíndrica (15x30 cm) y 3 prismáticas (15x20x5 cm) para el ensayo de desgaste. En cuanto al ensayo de deslizamiento (RD) es la media de 4 probetas prismáticas (15x20x5 cm). Como puede observarse en la tabla, el resultado de la serie HSC1b para ambos ensayos sobre probetas prismáticas no se presenta, en consecuencia de rotura al desmoldear.

En referencia a la resistencia al desgaste, primeramente ésta dependerá principalmente de la propia resistencia al desgaste de los áridos. Los resultados de las probetas cilíndricas muestran claramente una agrupación de tres grupos, los hormigones siderúrgicos, ya sean con arena correctora de origen silíceo o calizo, tienen valores entre los 18 y 19 mm. Después se ubican los hormigones convencionales con valores entre los 24 y 25 mm y finalmente, los hormigones baríticos con valores entre 29 y 31 mm. En todos los casos se observa que entre probetas cilíndricas y prismáticas hay diferencias poco significativas, si bien se observa que las probetas prismáticas conducen a valores inferiores de desgaste, con reducciones entre 1 y 3 mm.

DOSIFICACIÓN		RESISTENCIAS AL DESGASTE (mm)		RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO RD (PTV)
		Cilíndricas	Prismáticas	
HSS1	a	19	18	74
	b	18	18	64
HSS2	a	19	17	67
	b	18	17	65
HSC1	a	18	14	70
	b	18	-	--
HSC2	a	18	18	70
	b	19	17	65
HC	a	24	23	69
	b	25	22	71
HAB	a	31	27	70
	b	29	27	74

Tabla 4.15: Resistencias al deslizamiento y desgaste por abrasión de cada dosificación

Cuanto menor sea el valor de la resistencia al desgaste mayor será la dureza del material y viceversa. En la normativa de prefabricados UNE-EN 1338:2004, adoquines de hormigón, se clasifican de la siguiente manera: valores mayores de 23 mm son muy altos, entre los 20 y 23 mm discretos y debajo de los 20 están muy bien. De lo anterior, se deduce que el desgaste es menor en los hormigones siderúrgicos que del resto de dosificaciones.

Por otro lado, de acuerdo a la norma UNE-EN 13748-1:2005, baldosas de terrazo para uso interior, en la Tabla 4.16 se clasifican los valores del desgaste de abrasión. Definiendo los hormigones siderúrgicos de uso industrial y los hormigones convencionales de uso intensivo. Sin embargo, los hormigones baríticos están 15% por encima de los valores más altos, por lo que es imposible su aplicación en interiores, aún en pavimentos de uso normal, debido a su mayor desgaste, nuevamente como respuesta a la fragilidad del propio material barítico.

REQUISITOS		TERRAZO INTERIOR (mm)
Desgaste por abrasión	Uso normal	≤ 25
	Uso intensivo	≤ 23
	Uso Industrial	≤ 21

Tabla 4.16: Valores de Desgaste de Abrasión para uso interior

Así mismo, en la Tabla 4.17 se presentan los valores del desgaste de abrasión para baldosas de terrazo en uso exterior de acuerdo a la normativa UNE-EN 13748-2:2005, y para baldosas de hormigón de acuerdo a la norma UNE-EN 1339:2004. En caso de terrazo exterior

nuevamente los hormigones baríticos tienen un desgaste mayor para su posible utilización. Sin embargo, es posible su aplicación como baldosas de hormigón.

REQUISITOS	TERRAZO EXTERIOR		BALDOSA DE HORMIGÓN, LOSAS Y LOSETAS	
	CLASE	VALOR (mm)	CLASE	VALOR (mm)
Desgaste por abrasión	B	≤ 24	G	≤ 30
	D	≤ 20	H	≤ 23
	-	-	I	≤ 20

Tabla 4.17: Valores de Desgaste de Abrasión para uso exterior

Por otra parte, el Código Técnico de Edificación (CTE, 2006) con la finalidad de limitar el riesgo de resbalamiento para los usuarios, clasifica la localización y características de los suelos en función de la *resistencia al deslizamiento* (Rd). Primeramente, para cumplir con lo dicho por el CTE, los suelos de los lugares de trabajo deberán ser fijos, estables y resistentes a deslizamientos, así como estar libres de zonas irregulares y pendientes. Así mismo, las superficies de rampas, escaleras y plataformas deben construirse con materiales resistentes al deslizamiento.

El valor del ensayo de deslizamiento está en el mismo orden de magnitud para todas las series, con valores entre 64 y 74 PTV. Para las series “b” de los hormigones siderúrgicos, los valores del Rd son menores (en torno a 65) por la mayor cantidad del aditivo fluidificante (PF-75) en comparación a los valores obtenidos para las series “a” (valor promedio 70). Para los hormigones baríticos, los resultados del Rd son algo más altos dentro del mismo orden de magnitud, ello puede responder a que el esqueleto es diferente, o bien a que el contenido de pasta es menor, especialmente en la amasada HABB, siendo el valor más alto al igual que el hormigón HSS1a.

En definitiva, en cuanto mayor sea el valor del Rd, más antideslizante será el hormigón. En todos los casos, los valores son altos, lo cual presupone un buen comportamiento frente al riesgo de derrape, situándose en la clase 3, según la clasificación del CTE (ver Tabla 4.18).

RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (Rd)	CLASE
Rd ≤ 15	0
15 < Rd ≤ 35	1
35 < Rd ≤ 45	2
Rd > 45	3

Tabla 4.18: Clasificación de los suelos según la resistencia al deslizamiento Rd

En la Tabla 4.19 se indica la clase que deben tener los suelos, como mínimo, en función de su localización. También define que dicha clase se deberá mantener durante la vida útil del pavimento. Por lo tanto, los hormigones siderúrgicos se podrán utilizar en zonas interiores húmedas con pendientes igual o mayores al 6% y en escaleras. Así como, en zonas de piscinas o duchas, corresponde esta clasificación con la especificada para la resistencia a la abrasión.

LOCALIZACION Y CARACTERISITCAS DEL SUELO	CLASE
Zonas interiores secas	
- Superficies con pendiente menor que el 6%	1
- Superficies con pendiente igual o mayor que el 6% y escaleras	2
Zonas interiores húmedas, tales como las entradas a los edificios desde el espacio exterior (1), terrazas cubiertas, vestuarios, baños, aseos, cocinas, etc.	
- Superficies con pendiente menor que el 6%	2
- Superficies con pendiente igual o mayor que el 6% y escaleras	3
Zonas exteriores. Piscinas ⁽²⁾ . Duchas	3

Tabla 4.19: Clase exigible a los suelos en función de su localización

Por otro lado cuando los hormigones son utilizados en carreteras, también es necesario el estudio de la resistencia al deslizamiento, entre otros. Los accidentes que pueden estar relacionados por la falta de resistencia al deslizamiento, tienden a concentrarse si el pavimento está mojado. Por esta razón, mediante valores mínimos del RD definidos por diferentes normativas, se define la zona donde ha de ser donde es posible utilizar ese tipo de material, en este caso el hormigón siderúrgico.

En la Tabla 4.20 se muestran los valores consignados al Rd utilizados en el Reino Unido y los correspondientes a la Instruction Manual, Skid Resistance and Friction TEster, A113, 2008. En resumen los hormigones siderúrgicos diseñados en esta investigación podrían ser utilizados en carreteras para las siguientes zonas: accesos a semáforos en carreteras con velocidades límites de más de 65 km/h. Accesos a semáforos, pasos de peatones. Salidas difíciles, tales como, rotondas, curvas con radios inferiores a 150 m en autopistas, gradientes altas. Acercamientos a luces de tránsito o pagos de peaje en autopistas.

4.3.6 Conclusiones 2ª campaña experimental

Mediante la propuesta experimental llevada a cabo y del análisis de los resultados, se constata que la aplicación del árido siderúrgico para la fabricación de hormigones estructurales es plenamente factible. Como resultado de la aplicación de dicho material se observaron importantes ventajas. Así mismo, se observaron deficiencias en las resistencias mecánicas de los hormigones con adición de barita. A través de estas ventajas e inconvenientes se concluye lo siguiente:

- Los hormigones con barita demostraron mayor trabajabilidad que los hormigones convencionales y siderúrgicos. La razón principal de esto es la baja absorción de agua de la barita, quedando más agua libre en la mezcla.

INDICE DE RIESGO	TIPO DE SITIO
Muy difíciles* 50-65	Accesos a semáforos en carreteras con velocidades límites de más de 65 km/h. Accesos a semáforos, pasos de peatones, peajes de autopista y otros puntos similares en vías urbanas e interurbanas
Difíciles* 45-60	Accesos a intersecciones importantes en carreteras con IMD > 150. Intersecciones giratorias y sus accesos. Curvas de radio menor a 150 m con velocidad límite superior a 65 km/h. Pendientes superiores al 5% con más de 100 m de longitud.
Medianas* 35-50	Secciones rectas de autopistas y carreteras convencionales, con IMD > 250.
Fáciles* 0-40	Secciones rectas de carreteras con tráfico ligero. Carreteras en que la carretera mojada no aumente el riesgo de accidente.
A 65**	Sitios difíciles, tales como: <ol style="list-style-type: none"> 1. Rotondas 2. Las curvas con radio inferior a 150 m en autopistas 3. Gradientes altas Acercamientos a luces de tránsito o pagos de peaje en autopistas
B** 55	Autopistas y carreteras de alto volumen de tráfico
C** 45	Todos los demás sitios.

* Criterio Inglés ** Instruction Manual, Skid Resistance and Friction Tester, A113, 2008.

Tabla 4.20: Tipo de sitio para la aplicación en carreteras según su índice de riesgo

- La introducción de barita en el hormigón, conduce a la reducción generalizada de las propiedades mecánicas. Las reducciones de 30% y 40% en términos de la resistencia a compresión y los módulos de elasticidad en comparación con los hormigones convencionales y siderúrgicos. Por un lado, esto es resultado de la microestructura de la barita, compuesta por capas adyacentes que presentan planos débiles, propensos a la delaminación. Por otro lado, consecuencia de la pobre actuación en la zona de transición de interface, causada por la deposición de finos alrededor de los granos generados durante el proceso de amasado.
- En relación a la densidad, la adición de árido siderúrgico tiene un impacto positivo hacia la obtención de hormigones pesados. La densidad de este tipo de hormigones son aproximadamente 25% mayores que la de los hormigones convencionales.
- La resistencia a compresión y tracción del hormigón siderúrgico es similar a la de los hormigones convencionales. Sin embargo, es importante señalar que este tipo de

hormigones muestran una resistencia a compresión y tracción, 25% y 65% mayor que la de los hormigones con barita, respectivamente.

- Los módulos de elasticidad de los hormigones siderúrgicos son 10% mayores que los de los hormigones convencionales. Esto responde a la mayor dureza de los áridos siderúrgicos.

Por otro lado, se realizaron ensayos para estudiar la posible aplicación de los hormigones siderúrgicos en muros que ofrezcan protección radiológica, así como, su uso como pavimentos y bases bi-capa en carreteras. A continuación se enlistan las conclusiones de dichos ensayos:

- Para los hormigones siderúrgicos se obtuvieron coeficientes de atenuación de rayos gamma 11% mayores que para los hormigones convencionales. Por otro lado, los hormigones con barita muestran un coeficiente de atenuación 25% más altos que los hormigones siderúrgicos.
- Las estimaciones del espesor mínimo requerido (HVL) mostraron pequeñas diferencias entre el hormigón siderúrgico y barítico. Para lograr la misma capacidad de protección, el primero requeriría una pared de sólo 6,5 cm más gruesa que la segunda.
- Los resultados confirman que el árido siderúrgico es un árido interesante para el hormigón estructural con capacidad de blindaje ya que aumenta la atenuación de la radiación sin comprometer las propiedades mecánicas del material.
- Los hormigones siderúrgicos son 35% y 60% más resistentes a la abrasión en comparación de los hormigones convencionales y baríticos, respectivamente.
- Las series "a" de los hormigones siderúrgicos presentan valores similares de resistencia al deslizamiento que los hormigones de referencia (HC y HAB). Sin embargo, el aumento del aditivo fluidificante en los hormigones siderúrgicos (serie "b") reduce un 7% la resistencia al deslizamiento.
- De acuerdo al CTE son clasificados de Clase 3, lo que significa que pueden ser usados en zonas interiores húmedas con pendientes igual o mayores al 6% y en escaleras. Así como, en zonas de piscinas o duchas, corresponde esta clasificación con la especificada para la resistencia a la abrasión.
- Así mismo, debido a su valor antideslizante se pueden usar en carreteras para las siguientes zonas: accesos a semáforos en carreteras con velocidades límites de más de 65 km/h. Accesos a semáforos, pasos de peatones. Salidas difíciles, tales como, rotondas, curvas con radios inferiores a 150 m en autopistas, gradientes altas. Acercamientos a luces de tránsito o pagos de peaje en autopistas.

CAPÍTULO 5.

ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES

5.1 INTRODUCCION

En capítulos anteriores se ha evaluado el comportamiento de los hormigones con áridos siderúrgicos, baríticos y convencional en cuanto a los principales requerimientos encontrados en aplicaciones con alto valor añadido. Además de atender a estos requerimientos, es importante asegurar que el material se mantenga estable y en condiciones de uso durante la vida útil definida en proyecto.

En este sentido, gana importancia la evaluación de la durabilidad de los hormigones frente a los procesos de degradación que se pueden dar en las diferentes aplicaciones prácticas contempladas. En la práctica, existen diferentes agentes externos e internos al material que pueden desencadenar procesos de degradación que comprometen su integridad. Además, por cuestiones medio-ambientales, es necesario verificar el potencial contaminante del hormigón - especialmente el con árido siderúrgico – cuando sometido a fenómenos de lixiviación.

Así pues, con la finalidad de evaluar la durabilidad de los hormigones siderúrgicos se delimitaron los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar los posibles procesos de degradación, de acuerdo a las condiciones ambientales de exposición, y realizar ensayos para su evaluación.
2. Analizar y comparar el comportamiento de los hormigones siderúrgicos con el de los hormigones patrones, convencional (con árido calizo) y pesado (con árido barítico), frente a los procesos de degradación simulados.

Con la finalidad de dar respuesta a los objetivos propuestos, el presente capítulo está dividido en dos etapas: la *propuesta experimental*, donde se definen los ensayos de acuerdo a los procesos de degradación y los *resultados y análisis de éstos*. Finalmente, se muestran las conclusiones a las que se llegaron mediante dicho estudio.

5.2 PROPUESTA EXPERIMENTAL

La potencialidad de aplicaciones de este tipo de hormigones (muros radiológicos, capas de rodadura) aumenta la diversidad de posibles ataques agresivos del entorno. En consecuencia, la propuesta experimental debe ser amplia para cubrir la gama más completa de posibles ataques.

En la Tabla 5.1 se muestran los ensayos propuestos para estimar directa o indirectamente la durabilidad. Asimismo se indica la normativa utilizada en el ensayo, el tamaño y cantidad de probetas. De la misma manera se presenta la edad de las probetas al momento del inicio del ensayo y el laboratorio donde fueron realizados.

PROPIEDAD	NORMATIVA	PROBETAS (cm)	Nº. por amasada	EDAD (días)	LABORAT.
Penetración de agua bajo presión	UNE-EN 12390-8:2009	Cilíndricas 15 x 30	3	28	PROMSA
Ciclos Mojado-Secado	Ensayo propio	Cubica 10x10	2	117	UPC
Influencia del ambiente de exposición	Ensayo propio	Losas 20x30x5	2	3 años	
Ciclos Hielo-Deshielo	Ensayo propio	Cilíndricas 15 x 15	3		
Lixiviación	NEN 7345	Cilíndrica 10 x 10	2		

PROMSA: Laboratorio de Promotora del Mediterráneo S.A.; UPC: Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, UPC

Tabla 5.1: Programa de ensayos de durabilidad de los hormigones

Todos los hormigones de la segunda campaña experimental descrita en el Capítulo 4 fueron sometidos a los ensayos, a excepción de las lixiviaciones, las cuales solo se llevaron a cabo para dos hormigones siderúrgicos (uno con arena silíceo HSS1b y otro con caliza HSC1a) y

un hormigón convencional (HCa). En los siguientes apartados se explica la razón de ser de cada ensayo, así como, la descripción de los procedimientos para los ensayos no normalizados.

Penetración de agua bajo presión

La penetración de agua bajo presión es un método indirecto para evaluar la facilidad de entrada de agua, lo cual puede relacionarse con la facilidad de entrada de agentes agresivos. La penetración medida estaría relacionada con la durabilidad potencial de los hormigones, siendo más durables aquellos que presenten menores valores.

Ciclos Mojado-Secado

Dado que los pavimentos pueden estar expuestos a la intemperie, se espera que durante su vida útil se produzcan ciclos de mojado-secado. Lo mismo se apreciaría en otros elementos de hormigón visto situados en el exterior de fachadas de edificaciones. El ensayo de mojado-secado tiene como finalidad evaluar el desgaste superficial así como el comportamiento ante posibles expansiones de los hormigones con áridos siderúrgicos en presencia de agua.

La exposición a varios ciclos de este tipo podría favorecer la oxidación de los nódulos de acero incrustados en los áridos (detectados durante la inspección visual realizada en el Capítulo 3) o la hidratación tardía del CaO o MgO remanente en el árido. Ello conllevaría a un aumento de volumen y tensiones internas en el hormigón, lo cual puede dar lugar a fisuras y desperfectos afectando tanto las propiedades mecánicas como de durabilidad del material. Por otro lado, la repetida entrada y salida de agua causada por los ciclos también podría movilizar parte del material oxidado y depositarlo en la superficie en la forma de manchas, comprometiendo la estética de la estructura (hormigón visto) y generando una percepción negativa por parte del usuario.

Los ciclos han sido iniciados 117 días tras la producción de las probetas, cuando la mayor parte de la hidratación del cemento ya había tenido lugar. Con ello, se busca reducir la influencia en los resultados del ensayo de la hidratación del cemento. El ensayo tuvo duración de tres meses (Marzo 2012 a Julio 2012), se realizó en una cámara climática a temperatura de 20°C y humedad relativa de 50% y consistió de 44 ciclos. Cada ciclo constaba de 24 horas de inmersión en agua, seguida de 24 horas de secado. Para la inmersión se preparó una piscina con el volumen necesario de agua para cubrir las probetas 10 cm por encima de la cara superior.

En la Figura 5.1 se muestran las etapas del proceso de ensayo realizado en cada ciclo. Una vez cumplidas las 24 horas de inmersión, se caracterizaban cada una de las probetas. Este paso se hacía de forma sistemática y en el mismo orden, buscando asegurar que la pérdida de agua por evaporación entre la primera y última probeta caracterizada fuera mínima.

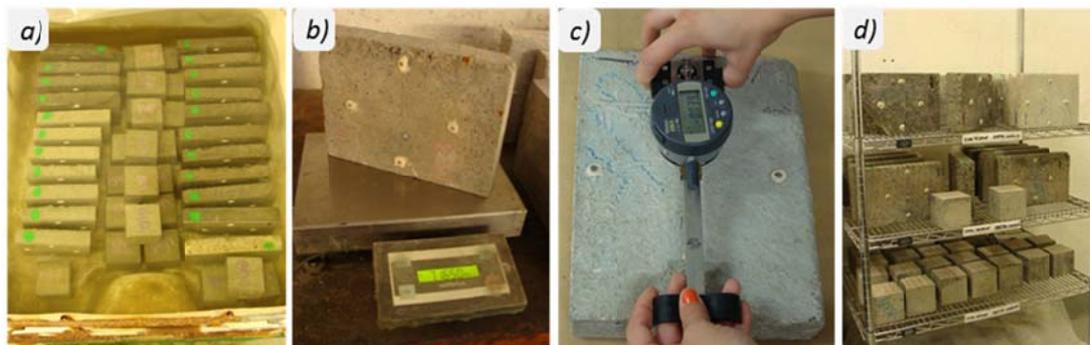


Figura 5.1: Procedimiento de ensayo en los ciclos de mojado-secado: a) probetas sumergidas; b) pesado de probetas; c) medición expansiones y d) secado probetas

Al finalizar las mediciones, las probetas se colocaban sobre estanterías para las 24 horas de secado (Figura 5.1f), después se repetían las caracterizaciones y se sumergían nuevamente. Una vez que las probetas cumplieron los tres meses de ensayo, se mantuvieron en las estanterías de la cámara climática (temperatura de 20 °C y humedad relativa de 50%) durante 8 meses con la finalidad de mantenerlas en condiciones estándares.

Los métodos empleados para caracterizar el estado de las probetas en cada ciclo se describen a continuación.

- a) Inspección visual: Se realizaba una observación visual de las probetas, donde se contabilizaban el número de puntos de oxidación, como apoyo para dichos datos se tomaron fotografías de la cara encofrada de la probeta a 48 horas, 1, 2 y 3 meses. Así mismo, se visualizaban los cambios superficiales de tonalidad y color que presentaba cada probeta.
- b) Evaluación del peso: Todas las probetas tanto las cubicas como las losas eran pesadas para evaluar alteraciones o pérdidas significativas en el peso (Figura 5.2b). Con la finalidad de examinar si los hormigones presentaban pérdida de la pasta superficial.
- c) Evaluación de la variación dimensional: Para medir las deformaciones en las probetas con forma de losas se colocaron 4 puntos, 2 en eje x y 2 en eje y paralelos a los lados, con una separación entre ellos de 15 cm (ver Figuras 5.2a y 5.2b). Después de colocarlos, se dejaron secar durante tres días para evitar el desprendimiento por el contacto constante con el agua. En el lado superior izquierdo se ponía una marca de referencia, para asegurar que el extensómetro se posicionaba siempre de la misma manera (ver Figura 5.2b y 5.2c). Primero se medía la distancia entre puntos en el eje x, como se muestra en la Figura 5.2c, y luego el eje y (Figura 5.2d).

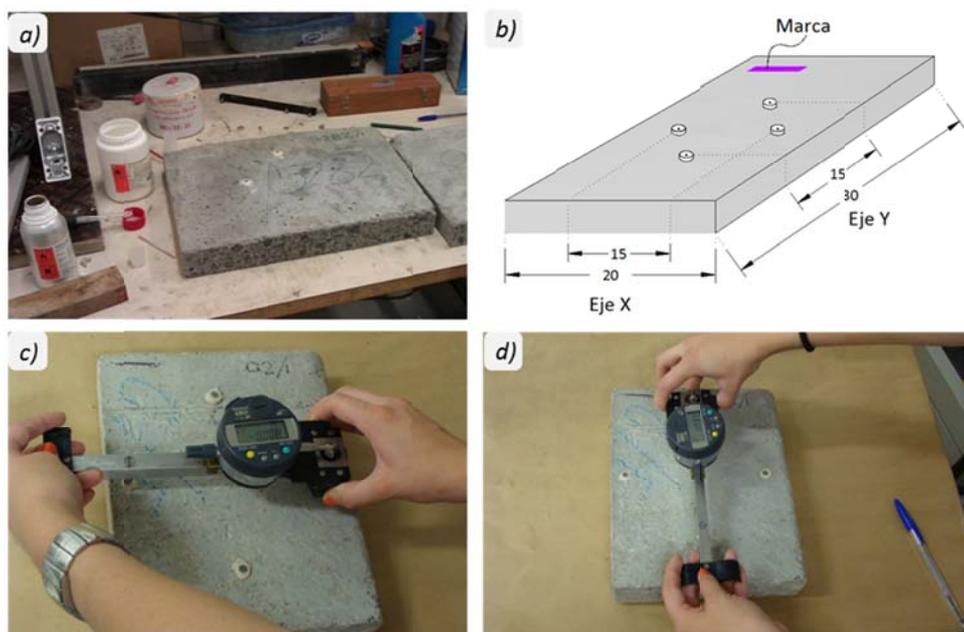


Figura 5.2: a) Colocación de puntos; b) definición de ejes; c y d) ejemplo medición losas

Puesto que las losas correspondientes a la dosificación HSC1b se rompieron durante el proceso de desencofrado, no ha sido posible realizar el seguimiento de las expansiones de esta dosificación. Por otra parte, en la dosificación HABb, las losas ensayadas presentaban un tamaño más pequeño que las demás (11,64 X 30 x 5 cm) dado que habían sido previamente cortadas para generar las muestras necesarias al ensayo de resistencia a la abrasión y deslizamiento. Por ello, tan solo ha sido posible realizar las mediciones en uno de los ejes de la probeta.

Influencia del ambiente de exposición

Una vez realizados los ciclos de mojado y secado, se llevó a cabo un ensayo en las mismas probetas para evaluar la influencia del ambiente de exposición en su variación dimensional y el aspecto visual. Un duplicado de cada dosificación se expuso desde Febrero 2013 hasta Febrero 2014 a las condiciones naturales climatológicas en la azotea del edificio C1 (en la Universidad Politécnica de Cataluña), mientras que el resto de probetas se mantuvieron en la cámara climática. A cada mes cumplido se realizó una inspección visual, seguida de la estimación de la variación dimensional.

Otro de los objetivos de este ensayo, fue evaluar de manera comparativa la profundidad de carbonatación, según la norma UNE-EN 14630:2007, de los hormigones sometidos a dos condiciones de conservación diferentes. Para estimar ese parámetro se forzó la aparición de una fisura en el centro de las probetas cúbicas mediante el ensayo brasileño, conforme la norma UNE-EN 12390-6:2010. Después se aplicó la fenolftaleína sobre las caras expuestas por la fisuración (Figura 5.3c) y se midió profundidad de carbonatación mediante un

pie de rey manual en todos los laterales. Con los valores obtenidos se calculó para cada probeta la profundidad media de carbonatación.

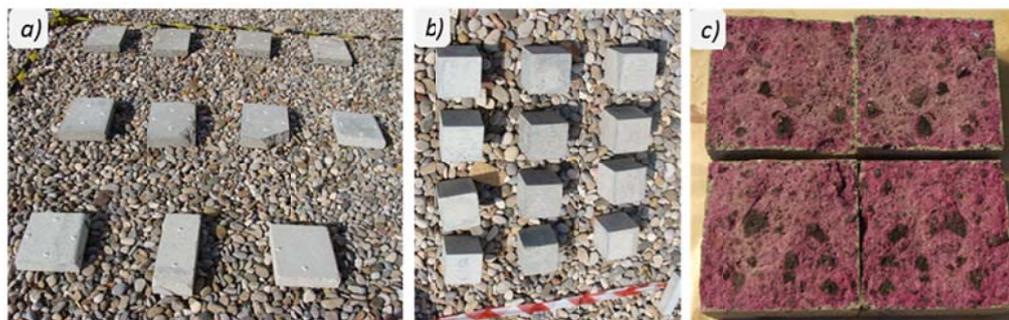


Figura 5.3: Exposición a la intemperie: a) probetas tipo losas y b) cúbicas y c) Resultado de la aplicación de la fenolftaleína

Ciclos hielo-deshielo

Otro problema de gran relevancia especialmente en pavimentos expuestos a la intemperie son los ciclos de hielo-deshielo. Dichos ciclos producen una degradación en la forma de descamación superficial del hormigón. Es sabido que la resistencia del hormigón frente a ciclos de hielo-deshielo está ligada a la porosidad superficial del hormigón. En ese sentido, la mayor porosidad del árido siderúrgico podría ser positiva al generar más cámaras para amortiguar el aumento de presión fruto de la congelación del agua en las capas superficiales. Por el contrario, el material también podría tener un efecto negativo en el caso de que permitiera una mayor entrada y acumulación de agua en las capas superficiales, aumentando las tensiones generadas en esa zona fruto de la congelación.

En la literatura existen diversos procedimientos experimentales para evaluar la durabilidad frente a los ciclos de hielo-deshielo. Basado en la metodología definida por Manso, 2001 y Pellegrino y Gaddo, 2009, cada ciclo consistía en introducir durante 18 horas las probetas cilíndricas (2 por cada amasada) dentro de un congelador a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ para después sumergirlas durante 6 horas en recipientes con agua a temperatura ambiente (Figura 5.4). En total se han aplicado 68 ciclos.

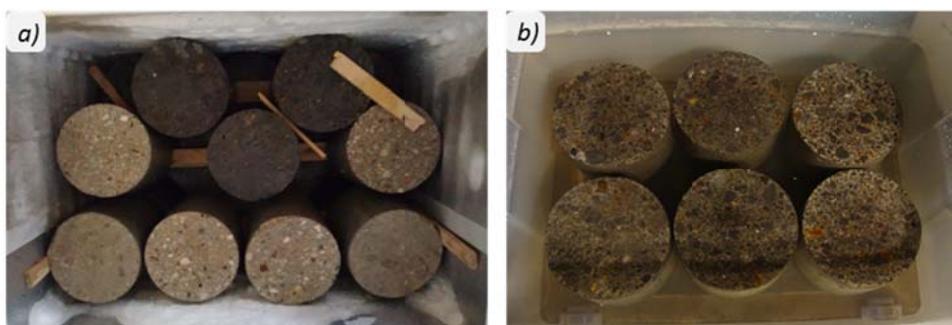


Figura 5.4: Ciclos de hielo-deshielo: a) en congelador (HS, HC, HAB) y b) en agua (HS)

Además de las caracterizaciones ya descritas para los ciclos de mojado y secado (inspección visual y evolución del peso), en este caso también se evaluó la microestructura mediante microscopía electrónica de barrido, la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a compresión, según las normas UNE-EN 12504-4:2006 y UNE-EN 12390-3:2009, respectivamente. Las mediciones correspondientes a la inspección visual, evaluación del peso y velocidades de pulso ultrasónico se realizaron en los ciclos 0, 1, 12, 25, 40, 60 y 68. En cambio, la caracterización de la resistencia a compresión y de la microestructura se llevó a cabo a 0 y 68 ciclos.

Lixiviación

Los ensayos de lixiviación permiten estimar de manera indirecta si alguno de los compuestos presentes en el hormigón podría ser disuelto y arrastrado por el agua hacia el exterior. Si alguno de los componentes solubles fuera contaminante o tóxico, este podría afectar negativamente el medio-ambiente. Por lo tanto interesa controlar la velocidad con la que tiene lugar ese proceso.

Los ensayos de *lixiviación* han sido realizados en dos dosificaciones de hormigón siderúrgico (HSS1b y HSC1a) y una de hormigón convencional (HCa). En cada una de ellas se han ensayado dos probetas, siendo el resultado final igual al promedio de las mediciones realizadas en ambas. El lixiviante empleado ha sido agua desionizada, es decir, químicamente pura, libre de cationes y aniones, con la finalidad de que los elementos solubles que resultasen fueran totalmente provenientes del hormigón estudiado.

La toma de muestras y renovación del lixiviante se realizaron en 7 períodos: 0,25; 1; 2,25; 4; 9; 16 y 36 días. En cada extracción se tomaron tres muestras, una se acidificó con ácido nítrico hasta un pH igual a 2 para la determinación de los siguientes iones y metales por medio de ICP: Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Se, V (elementos considerados contaminantes por la normativa holandesa NEN 7345, 1993) y Fe, Ca, Al, Na, Mg y Mn (elementos presentes en la composición de los áridos siderúrgicos). Las otras dos muestras no se acidificaron y se utilizaron para determinar los contenidos de sulfatos y fluoruros mediante cromatografía iónica, así como para medir el pH y la conductividad.

5.3 RESULTADOS Y ANALISIS

5.3.1 Profundidad de penetración de agua bajo presión

En la Figura 5.5 se muestran los valores medios de la penetración de agua máxima y media para cada dosificación. En la misma también se incluyen los valores dados en la Instrucción EHE (08), según la cual un hormigón se considera suficientemente impermeable al

agua si la profundidad máxima de penetración es menor o igual a 50 mm y la profundidad media es menor o igual a 30 mm.

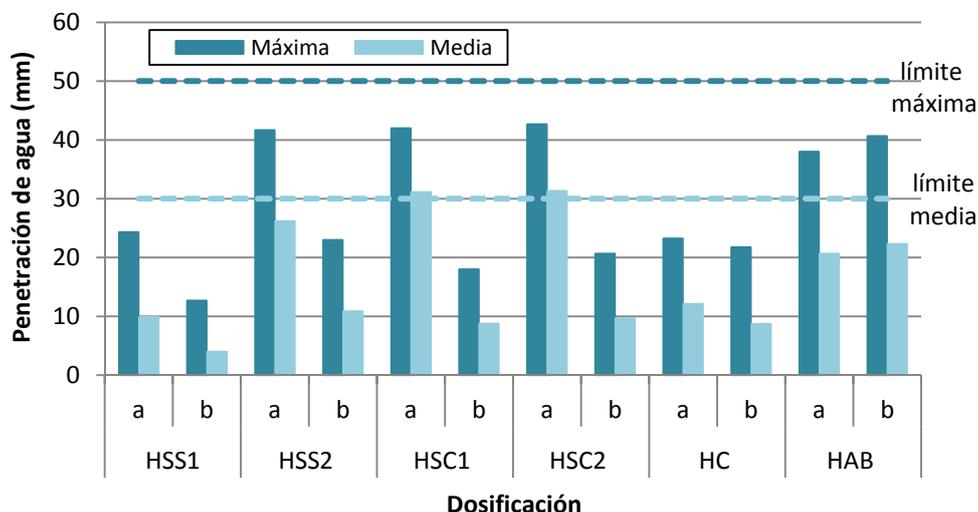


Figura 5.5: Profundidad de penetración de agua bajo presión

De manera general, los hormigones convencionales son los que presentan las menores penetraciones de agua. Valores más altos se aprecian para los hormigones con árido siderúrgico, especialmente en las dosificaciones que incorporan arena caliza. El aumento de la penetración medido en este caso podría estar relacionado con la mayor porosidad del árido siderúrgico, que favorecería la percolación del agua.

A pesar de ello, la mayoría de los hormigones siderúrgicos atiende a los requerimientos de durabilidad de la EHE-08. Las únicas excepciones se encuentran en las dosificaciones de la serie "a" de los hormigones siderúrgicos con arena caliza (HSC1a y HSC2a), las cuales presentan una penetración que sobrepasa ligeramente el límite de penetración media establecido. Por otra parte, los hormigones baríticos se mantienen dentro del rango de los límites establecidos, presentando penetraciones mayores que las medidas para los convencionales. Ello puede responder a que dicha penetración está favorecida por la existencia de una interfaz más porosa.

En todos los hormigones siderúrgicos, los valores de la penetración máxima y de la penetración media son mayores para las series "a" que para las series "b". En el caso de los HSS, las diferencias de la penetración máxima entre la serie "a" y "b" están alrededor del 46% y para la penetración media son del 59%. En los HSC las diferencias son del 54% y del 70%, respectivamente. Esto se debe posiblemente al mayor contenido de aditivo polifuncional fluidificante (Melcret PF-75) usado en las dosificaciones "b", lo que produce una mejor dispersión del cemento y un sistema con menor tamaño de poros..

5.3.2 Ensayo Mojado-Secado

Inspección Visual

En la observación visual de las probetas de hormigones siderúrgicos, se contabilizan el número de manchas de óxido en la cara encofrada de las probetas con la finalidad de observar si ésta experimentaría un aumento con el paso del tiempo y del número de ciclos.

En la Figura 5.6a y 5.6b, se muestran los resultados obtenidos para las losas y probetas cúbicas, respectivamente. Las Figuras 5.6c y 5.6d presentan para las mismas probetas el incremento relativo en el número de puntos de manchas de óxido tomando como referencia el contabilizado antes de empezar los ciclos. En ellas se aprecia un aumento del número absoluto de manchas con el paso de los ciclos. Dicho aumento es fruto de la deposición de óxidos de los áridos localizados cerca de la superficie. La repetida entrada y la salida del agua durante los procesos de mojado y secado moviliza estos óxidos que se depositan en la superficie.

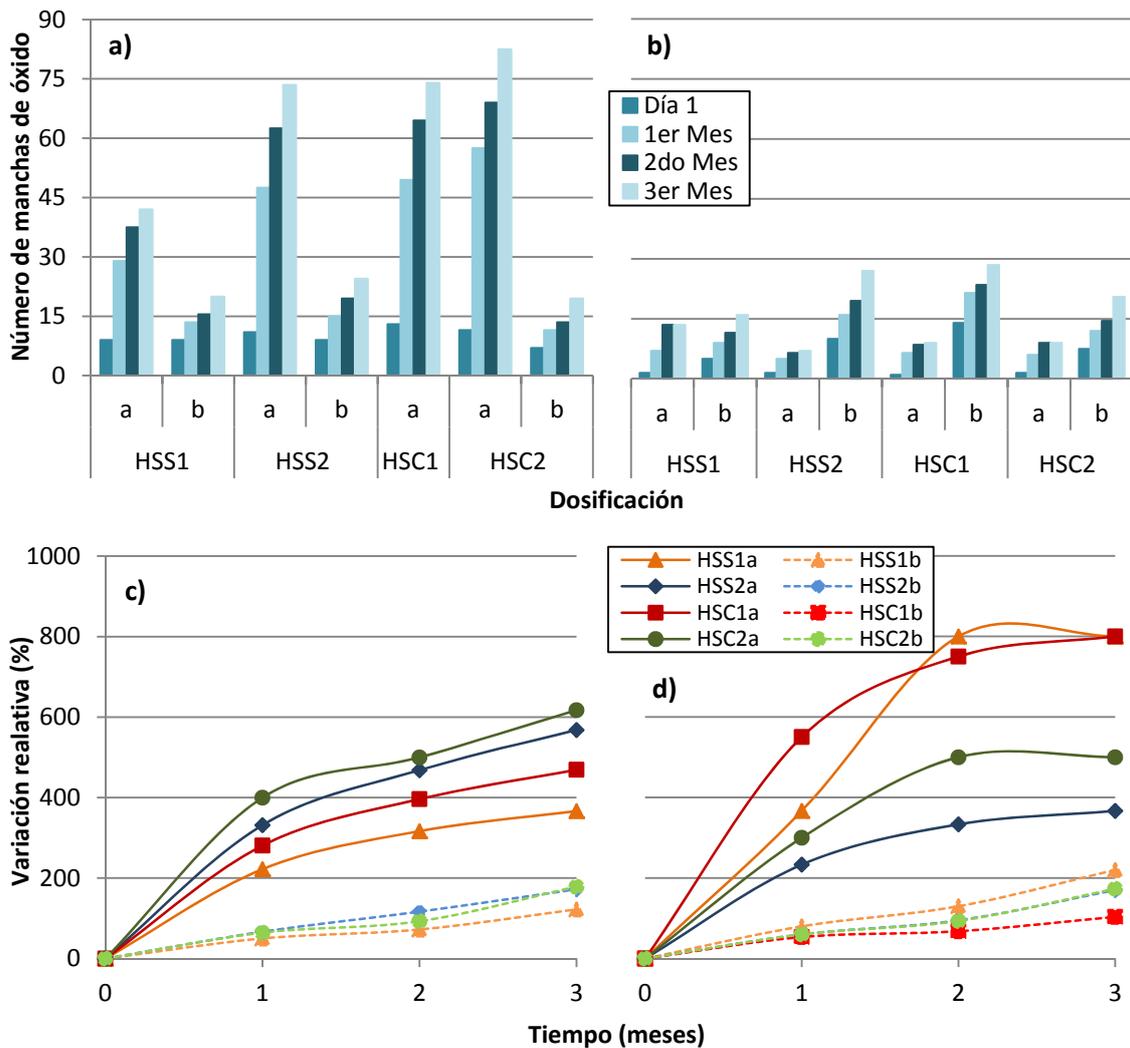


Figura 5.6: Puntos de óxido en: a) losas y b) cúbicas; Variación relativa (%): c) losas y d) cúbicas

Una clara evidencia de ese fenómeno se encuentra al comparar el número de manchas de las probetas cúbicas y de las losas. En estas últimas, la elevada relación superficie volumen y la restricción impuesta por las paredes del molde favorece la colocación de una mayor proporción de los áridos gruesos cerca de la superficie. Por consiguiente, el número de manchas medido al final de los ciclos en las losas es del orden de 3 veces superior al observado en las probetas cúbicas, en las que hay menor relación superficie/volumen y la posición del árido grueso está menos influenciada por las restricciones impuestas por los moldes.

Es interesante observar que, en términos relativos (Figuras 5.6c y 5.6d), el aumento en porcentaje del número de manchas es similar para ambos tipos de probetas. Ello indica que la evolución del fenómeno de deposición ocurre de manera similar en ambos casos, siendo la única diferencia la proximidad de los áridos gruesos con respecto a la superficie. El análisis de los gráficos también pone de manifiesto que el aumento más significativo de las manchas se produce en los ciclos realizados en el primer mes.

Las probetas de las series “b” presentan un menor aumento en las manchas de óxido en comparación con las de la series “a”. Esto posiblemente se debe, al igual que en los resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión, a que las dosificaciones de las series “b” contienen mayor cantidad de aditivo fluidificante, lo que ha contribuido a una mejor dispersión del cemento y a la formación de menores tamaños de poros.

A manera de ejemplo, en la Figura 5.7 se muestran las fotos al 1^{er} día, 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} mes de las losas correspondientes a las dosificaciones HSS2a₂ (a) y HSC2a₁ (b). Las fotografías con el conteo de puntos de óxido del resto de las dosificaciones y probetas se presentan en el Anejo 2. Por medio de un círculo se remarcan los puntos de óxido. En las fotografías, se puede percibir que, en las series “a” de las losas los puntos de óxido se localizan dispersos en toda la superficie, mientras que en las series “b” solo aparecen en el contorno. De igual manera, confirman que el aumento más significativo de puntos se presenta durante el primer mes.



Figura 5.7: Puntos de óxido de las losas: a) HSS2b₁ y b) HSC2a₁

Así mismo, en la Figura 5.8 se muestran las dos probetas cúbicas de los hormigones HSS2b (a) y HSC1b (b) al día 1 y al 3^{er} mes. Es remarcable que desde el primer día se observan puntos de oxidación, lo cual no supone repercusiones estructurales, pero debe tenerse en cuenta para posibles aplicaciones de hormigón visto en las que la aparición de manchas puede comprometer la estética de la estructura.



Figura 5.8: Puntos de óxido probetas cúbicas: a) HSS2b y b) HSC1b

Evaluación del peso

En la Figura 5.9 se presentan los pesos medidos de las losas para los hormigones siderúrgicos (a), baríticos (b) y calizos (c).

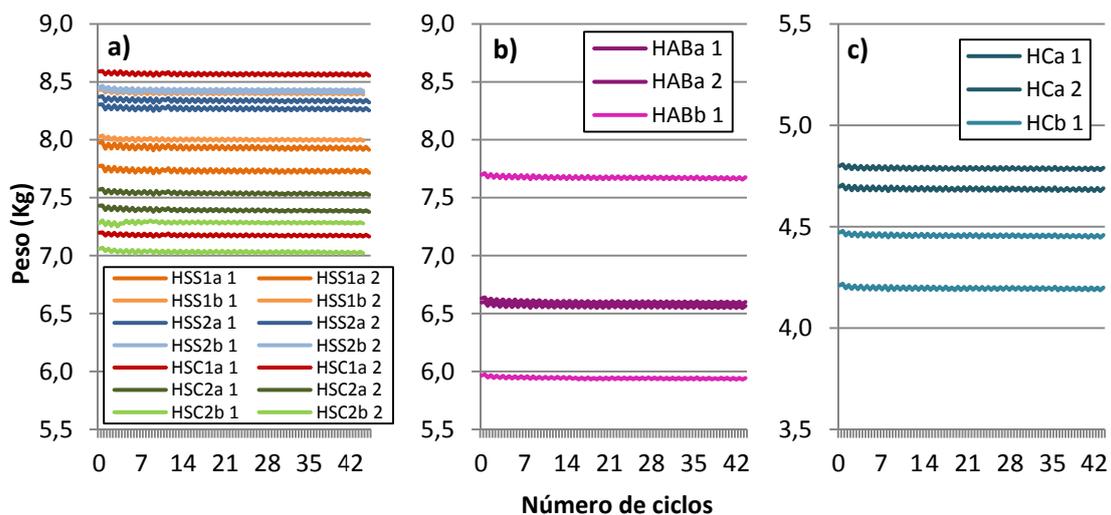


Figura 5.9: Evolución del peso de las losas: a) HS, b) HAB y c) HC

Como puede verse hay unas diferencias significativas que responden a las propias diferencias en las dimensiones de las probetas y la densidad del hormigón. En los resultados se

observa que el comportamiento de todos los hormigones es constante, notándose una ligera reducción en el peso a lo largo del tiempo, lo cual posiblemente es consecuencia a un desgaste natural por manipulación.

Con el fin de facilitar la comparación de los resultados, en la Figura 5.10 se presenta la variación relativa del peso con el número de ciclos para las losas correspondientes a los hormigones siderúrgicos (uno con arena correctora de origen silíceo HSS1b y otro de origen calizo HSC1a) y los de referencia (HCa y HABb).

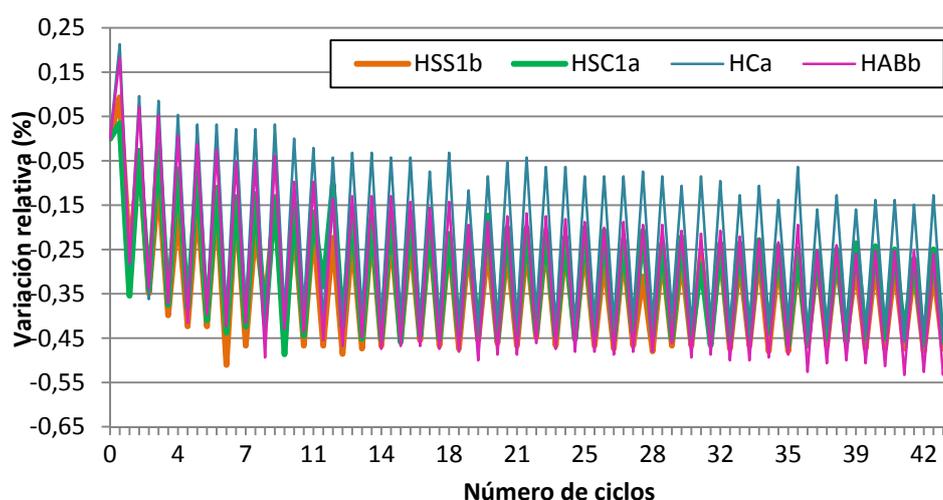


Figura 5.10: Variación relativa (%) del peso de losas de los HSS1b, HSC1a, HCa y HABb

En primer lugar se puede observar, para todos los casos, la tendencia cíclica mediante los picos y valles que corresponden al mojado y al secado, respectivamente. En segundo lugar, durante los primeros ciclos, se observa una reducción del peso, que responde a la situación inicial de una saturación total de las probetas. Hay que tener en cuenta que, previamente a los ciclos de mojado y secado, las probetas se encontraban en cámara con humedad relativa del 100%. Sin embargo, al iniciar los ciclos las probetas pasan a estar expuestas a etapas de secado (humedad del 50%) que obligan alcanzar una nueva condición de equilibrio higrométrico con el medio. Por esta razón, en valores medios se debería apreciar una reducción en el grado de saturación de las probetas con respecto a la situación en la que se encontraban inicialmente. Esto se refleja en una ligera tendencia de reducción de peso hasta que se alcance un equilibrio con la nueva condición.

Una vez alcanzado ese equilibrio, se observa que las variaciones medias son muy pequeñas (en el entorno de -0,23% en el hormigón convencional y de -0,31% para los hormigones siderúrgicos y el barítico). Asimismo, se aprecia que la curva de la variación del peso del hormigón siderúrgico es parecida a las obtenidas para los hormigones convencionales y baríticos, lo que sugiere que todos estos materiales se comportan de manera similar.

En la Figura 5.11 se presenta la evolución del peso de todas las probetas cúbicas para cada dosificación. La Figura 5.11a contiene los pesos de los hormigones baríticos (HAB) y siderúrgicos con arena correctora silíceá (HSS), mientras que en la 5.11b se muestran los hormigones siderúrgicos con arena de origen calizo (HSC) y los hormigones convencionales (HC).

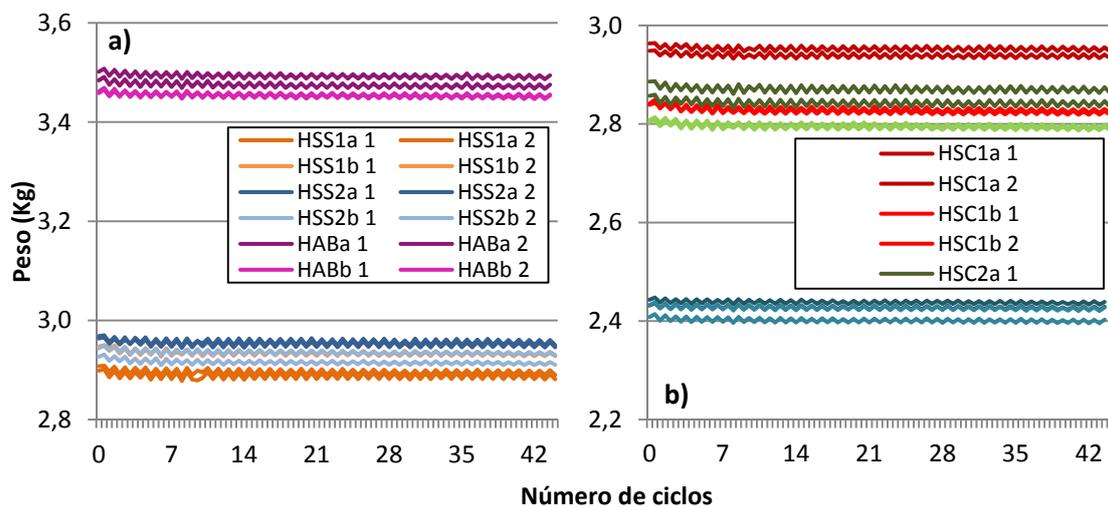


Figura 5.11: Evolución del peso de las probetas cúbicas: a) HSS y HAB; b) HSC y HC

Como puede verse, el peso de las probetas es en función de la densidad de los áridos, diferenciándose en tres grupos: los de menor peso corresponden a los HC (peso promedio de 2,43 kg), seguidos por los HS (2,90 kg) y con mayor peso los HAB (3,48 kg).

Finalmente en la Figura 5.12 se presentan los incrementos relativos correspondientes a los mismos hormigones analizados para las probetas cúbicas. Se puede apreciar un comportamiento similar que el de las losas y variaciones del mismo orden de magnitud (de -0,16% para los hormigones convencionales, -0,21% para los hormigones baríticos y para los HSC y HSS de -0,32% y -0,42%, respectivamente).

Con base en el análisis de los gráficos, no se identifica en ningún caso variaciones de peso que puedan indicar un aumento notable de la porosidad debido a la microfisuración o una disgregación superficial. Todo ello sugiere que el hormigón siderúrgico se conserva de manera similar que el hormigón convencional.

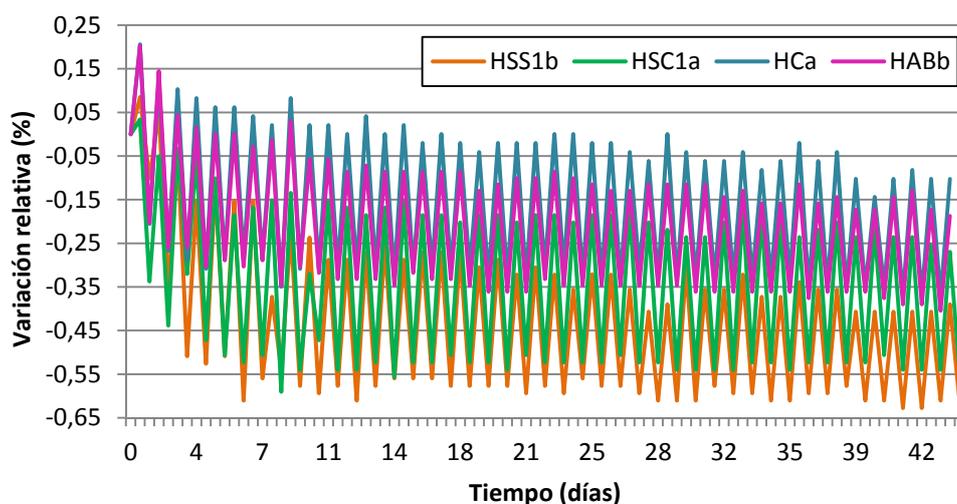


Figura 5.12: Variación relativa (%) del peso de probetas cúbicas de los HSS1b, HSC1a, HCa y HABb

Evaluación de la variación dimensional

En la Figura 5.13 se muestran las deformaciones medidas para cada una de las dosificaciones durante los 44 ciclos. En la citada figura se aprecia la coexistencia de dos fenómenos superpuestos, representados mediante la Figura 5.14, con distintas cinéticas.

En primer lugar, se observa un fenómeno de retracción fruto de la reducción del grado de saturación de la probeta para alcanzar un equilibrio con la nueva condición de conservación, tal y como se ha descrito con anterioridad. De manera análoga a lo observado en las curvas de variación de peso, la consecución del equilibrio y la estabilización de las probetas ante este fenómeno se completaron alrededor de los 14-16 ciclos.

En segundo lugar, se observan unas expansiones o entumecimiento de las probetas, ello podría responder a la aparición de una histéresis, de tal forma que el valor de la retracción durante el ciclo de mojado es superior al que se presenta durante el de secado, es decir, no existe una recuperación total en las probetas. Así como la retracción está condicionada en su mayor parte a un fenómeno de evaporación, el entumecimiento lo está a uno de absorción.

Este fenómeno de entumecimiento es mayor en el caso de los hormigones siderúrgicos debido a la influencia mineralógica de los áridos y de la posible hidratación de compuestos remanentes. Así mismo, los hormigones siderúrgicos aún después de los 44 ciclos se mantienen en un proceso de entumecimiento, contrario al comportamiento de los hormigones convencionales y baríticos, los cuales muestran una segunda retracción o la posible estabilización (aunque ésta no se aprecia claramente en los ciclos planteados).

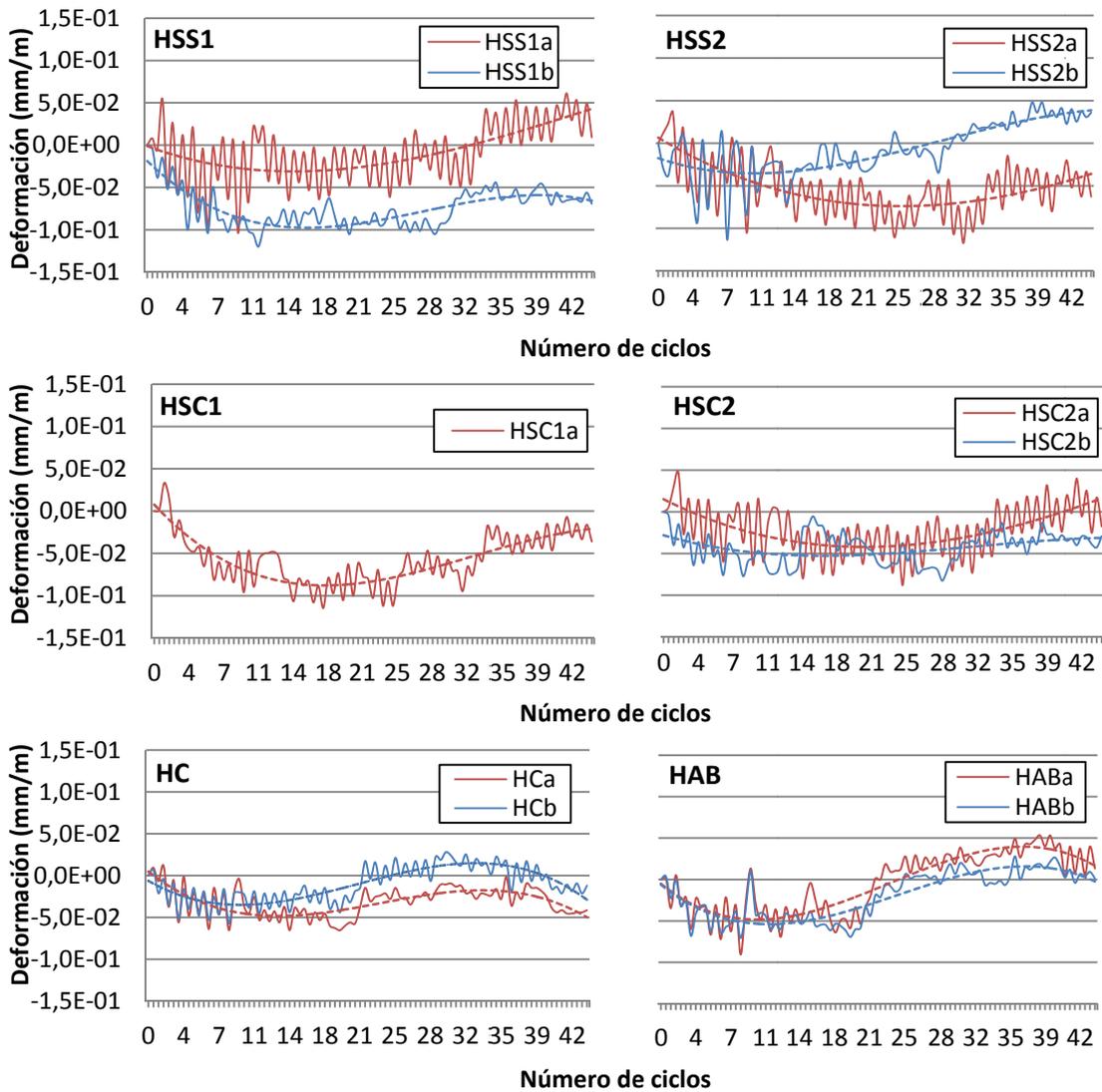


Figura 5.13: Deformaciones de losas, ensayo mojado-secado

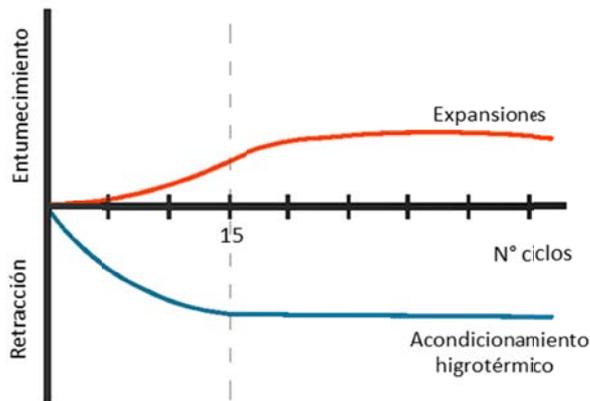


Figura 5.14: Fenómenos presentes durante el ensayo mojado-secado

Es por ello, de gran importancia que, en futuras líneas de investigación se incrementen el número de ciclos de mojado y secado aplicados. Por otro lado, debe ahondarse en el análisis del comportamiento en el hormigón convencional y barítico. No obstante, con la finalidad de medir las expansiones durante los ciclos realizados, en la Figura 5.15 se presentan las expansiones (en mm/m) medidas entre la deformación final (44 ciclos) y la medida a los 15 ciclos (acondicionamiento higrométrico), para todas las dosificaciones.

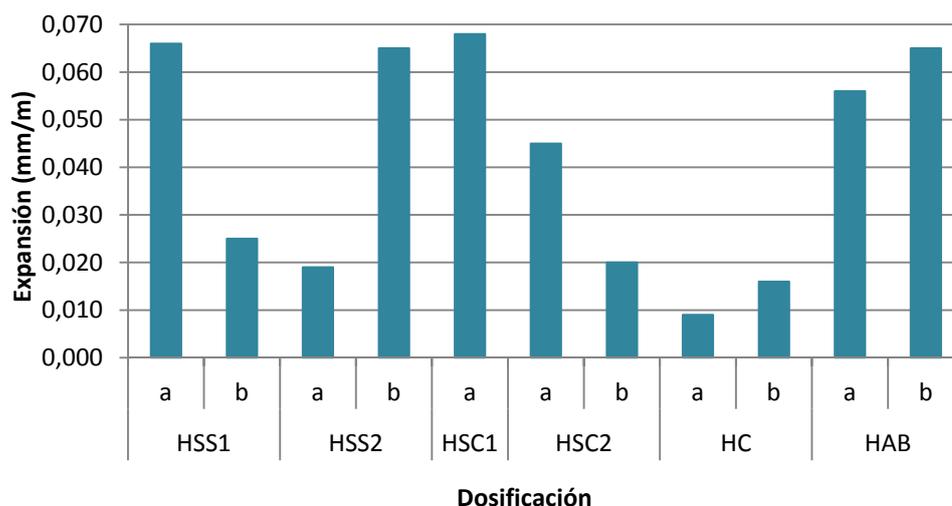


Figura 5.15: Expansiones medidas entre el ciclo 15 y 44 de cada dosificación

De los resultados puede verse que las series “a” y “b” de los hormigones convencionales y baríticos muestran expansiones del mismo orden de magnitud. No obstante, los hormigones baríticos expanden aproximadamente 5 veces más en comparación con los hormigones convencionales. Por otro lado, los hormigones siderúrgicos no muestran una tendencia clara, tendiendo expansiones entre los 0,019 y 0,068 mm/m (en algunos casos similares a los hormigones convencionales y en otros a los hormigones baríticos). Ello responde a la propia dispersión de las características que puede haber entre los áridos siderúrgicos (algunos más estables que otros y/o con menos compuestos remanentes que puedan tener reacciones ante ciclos de mojado-secado).

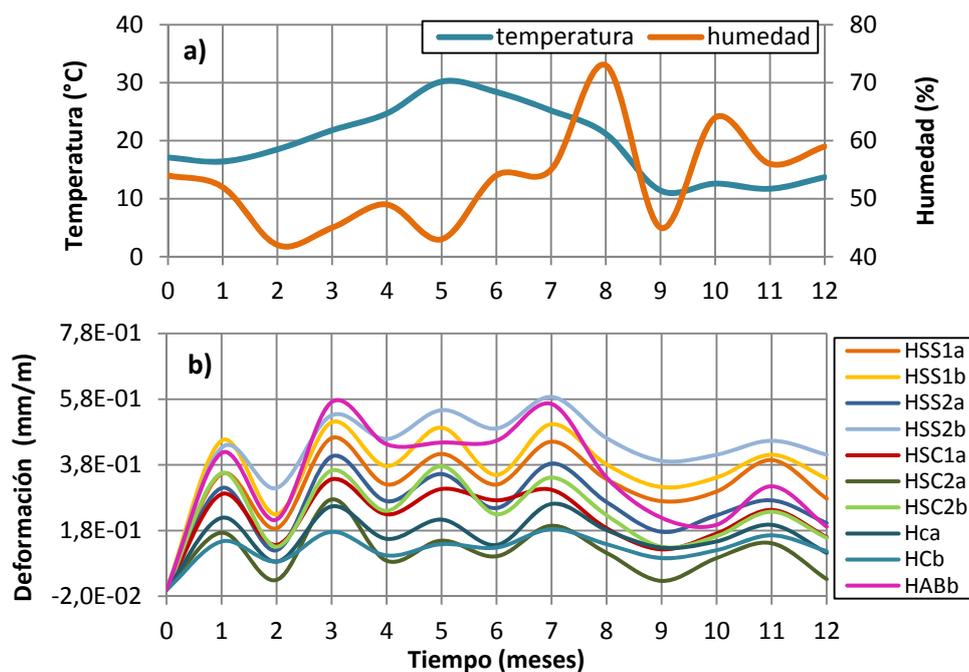
Varios estudios recomiendan una expansión máxima de 1 mm/m como un máximo que el hormigón puede experimentar sin que exista una degradación significativa. Así mismo, después de los 6 meses de producción no se deben superar dichas expansiones [Crammond, 1984; Skalny et. al., 2002]. En definitiva, las expansiones tanto de los hormigones siderúrgicos, como de los baríticos se mantienen por debajo de los límites establecidos, por lo que los ciclos de mojado-secado posiblemente no representan un riesgo para su durabilidad a nivel estructural.

Por último, se observa claramente que la amplitud de variación entre la medición tras el mojado y la medición tras el secado es mayor en las series “a” que en las series “b”. Ello responde al aumento del aditivo fluidificante (series “b”) que, al igual que en el ensayo de penetración de agua bajo presión, refleja una menor accesibilidad del agua. Así pues, el valor medio de la variación entre la medición tras el mojado y la medición tras el secado en las series “b” de los hormigones siderúrgicos (0,016) es similar a la de los hormigones convencionales (0,017) y baríticos (0,016). En cambio, en las series “a” es 2,5 veces mayor (0,040) en los hormigones siderúrgicos.

5.3.3 Influencia del ambiente de exposición

Evaluación de deformación en superficie

En la Figura 5.16 se muestran las alteraciones de temperatura y humedad (a) en los días de medición, así como, las deformaciones (b) de cada losa expuesta a la intemperie.



Contrario a lo observado durante los primeros ciclos del ensayo mojado-secado, las probetas expuestas a la intemperie no presentan una retracción sino un entumecimiento durante su primer mes. Ello responde a que las probetas pasan de un estado que oscila entre sequedad y humedad a la exposición a un ambiente con mayor humedad y contacto directo con agua de lluvia. Por consiguiente, debería haber un aumento de la humedad de las probetas para buscar un mayor equilibrio con el medio. La influencia de la humedad se puede ver reflejada en las oscilaciones puntuales de la curva, mientras que los cambios de la temperatura

influyen directamente en la tendencia general observada. Todas las dosificaciones revelan un comportamiento similar entre sí, aunque los HC muestran oscilaciones menos acentuadas.

Al igual que en el ensayo mojado-secado se midieron las expansiones una vez cumplido el acondicionamiento higrótermico (1 mes) y al final del ensayo (12 meses). Así pues, los hormigones siderúrgicos muestran retracciones (con valores de $-0,08$ mm/m para los HSS y $-0,10$ mm/m para los HSC) similares a las del hormigón convencional ($-0,07$ mm/m), mientras que el hormigón barítico presenta retracciones del doble de magnitud ($-0,22$ mm/m).

Ouyang et. al., 1988, sugieren que la expansión no debe exceder 3 mm/m a lo largo de la vida de servicio de la estructura, con el fin de evitar grietas y pérdidas de resistencia. Por ello y teniendo en cuenta que una vez finalizado el ensayo los hormigones habían cumplido más de 3 años desde su fabricación, se puede concluir que su exposición a la intemperie no compromete la durabilidad del hormigón por expansiones para el período estudiado. Como recomendación, en líneas futuras de investigación sería interesante aumentar el tiempo de exposición de los hormigones baríticos y siderúrgicos para confirmar que no sobrepasan los límites.

Carbonatación

En la Figura 5.17 se muestra la profundidad media de carbonatación para todas las probetas expuestas a diferentes condiciones. Amaral, 1999 menciona que la humedad relativa afecta la carbonatación que en condiciones extremas de sequedad es muy pequeña porque no hay agua para disolver el CO_2 , mientras que en condiciones de saturación de agua en los poros la carbonatación será baja porque la difusión del CO_2 será muy pequeña. También comenta que la carbonatación es máxima para humedad relativa entre un 50% y 70% (Parrot, 1987).

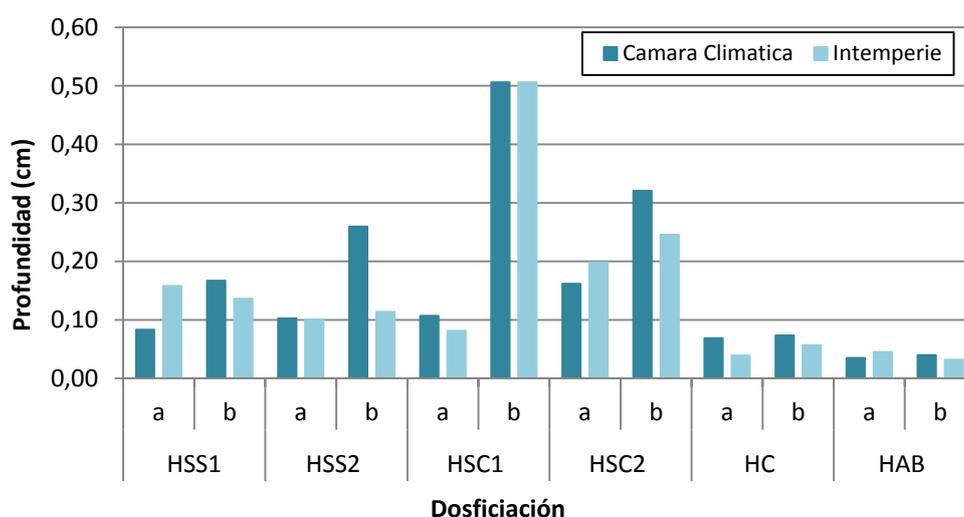


Figura 5.17: Profundidad de carbonatación

En la citada Figura 5.17, se observa que las probetas que estuvieron dentro de la cámara climática tienden a presentar mayor profundidad de carbonatación en comparación a las expuestas a la intemperie. Esto se debe a que en el transcurso del año hubo precipitaciones que ayudaron a mitigar la profundidad de carbonatación, por el efecto de saturación en los poros por el agua de lluvia, lo cual limitó la penetración del CO_2 al interior de las probetas. Dicho efecto de ralentización no se aprecia en las probetas conservadas en cámara climática que han sido mantenidas en un ambiente con humedad constante e igual a 50% durante el mismo período.

En conjunto, los hormigones siderúrgicos indican mayor profundidad de carbonatación que los hormigones convencionales y baríticos. Respecto a los hormigones siderúrgicos, los que contienen arena correctora caliza muestran una mayor carbonatación en comparación con los que contienen arena correctora de origen silíceo, lo que concuerda con los resultados obtenidos para el ensayo de penetración de agua bajo presión. La mayor porosidad del árido siderúrgico puede haber contribuido a la penetración del CO_2 y a un avance más acelerado del frente de carbonatación.

5.3.4 Ensayo de Hielo-Deshielo

Inspección visual

Tras la aplicación de los ciclos de hielo-deshielo, no se ha apreciado ninguna señal de degradación en la inspección visual de los hormigones con áridos siderúrgicos y convencionales. En cambio, los hormigones con árido barítico mostraron deterioro superficial y fisuras que se extendía por la lateral de y la base de la probeta, tal y como se muestra en la Figura 5.18.

La primera aparición de fisuras (a penas percibibles) en las probetas de los hormigones baríticos tuvo lugar a partir de los 45 ciclos, en una de sus caras circulares (base), siendo completamente evidente a los 50 ciclos (Figura 5.18a). Además, después de los 53 ciclos también se observaron fisuras en las caras laterales de la probeta (Figura 5.18b). Finalmente, en la Figura 5.18c se observa como el ancho de fisura una vez cumplidos los 68 ciclos.

Es importante destacar que, a partir de los 40 ciclos, cuando se hacía el cambio del congelador a la inmersión de agua, las probetas de hormigón barítico presentaban un estallido similar a cuando se exponen cubos de hielo al agua. Esto indica posiblemente a la presencia de importantes acumulaciones de agua congelada en las fisuras o alrededor de los áridos. Desde el punto de vista físico, esta acumulación podría generar tensiones fruto del aumento volumétrico experimentado por el agua a temperaturas próximas de su punto de fusión. Esto contribuiría a la formación de nuevas fisuras y a la propagación de las existentes.

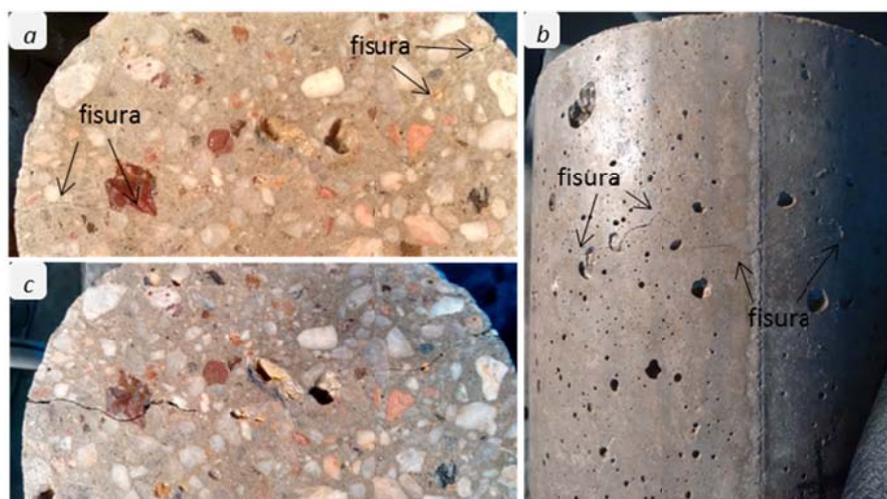


Figura 5.18: Probeta dosificación HABb: a) base 51 ciclos; b) lateral 53 ciclos y c) base 68 ciclos

Evaluación del peso

En la Figura 5.19 se presenta la variación media del peso durante la duración del ensayo. En general, la variación promedio del peso de los hormigones siderúrgicos (-0,31%) es menor en comparación a la de los hormigones convencionales (-0,45%) y mayor a la de los hormigones baríticos (-0,25%). No obstante, la variación en los hormigones resulta ser poco significativa, sin que llegue a indicar un problema ante los ciclos de hielo-deshielo. Así mismo, la pérdida en todos los casos es razonable debido al constante contacto con el agua.

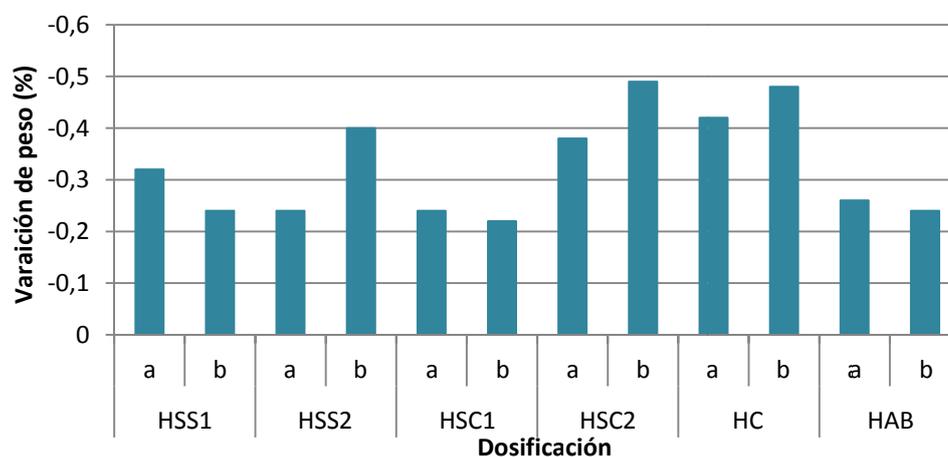


Figura 5.19: Variación del peso por ciclos hielo-deshielo

Velocidades de pulso ultrasónico

En la Figura 5.20 se presenta el valor medio de la velocidad de pulso longitudinal (L) y trasversal (T) para cada dosificación en los ciclos definidos. Primeramente, de los resultados a 0 días en condiciones saturadas, se observa una tendencia parecida a la descrita en el Capítulo 4 (Tabla 4.13). Concretamente, las velocidades de pulso de los hormigones siderúrgicos son

similares a las de los hormigones convencionales, con valores promedios de 5,06 y 5,21 km/s, respectivamente. Las menores velocidades de pulso corresponden a los HAB, siendo aproximadamente un 30% menor que los hormigones siderúrgicos.

En segundo lugar, la velocidad media en los hormigones baríticos presentó un descenso de aproximadamente 8,80% entre el primer y el último ciclo de hielo-deshielo. La mayor reducción por parte de los hormigones HAB es indicio de un posible proceso de degradación fruto de los ciclos. Variaciones menos significativas se observaron en los hormigones siderúrgicos y convencionales, con una reducción promedio de 1,10% para ambos casos. Respecto a los hormigones siderúrgicos, no se perciben diferencias debido al tipo de arena correctora, esqueleto granular o entre las series "a" y "b". Todo esto indica que los hormigones siderúrgicos tiene un comportamiento similar al convencional, manteniéndose en buen estado tras la aplicación de los ciclos.

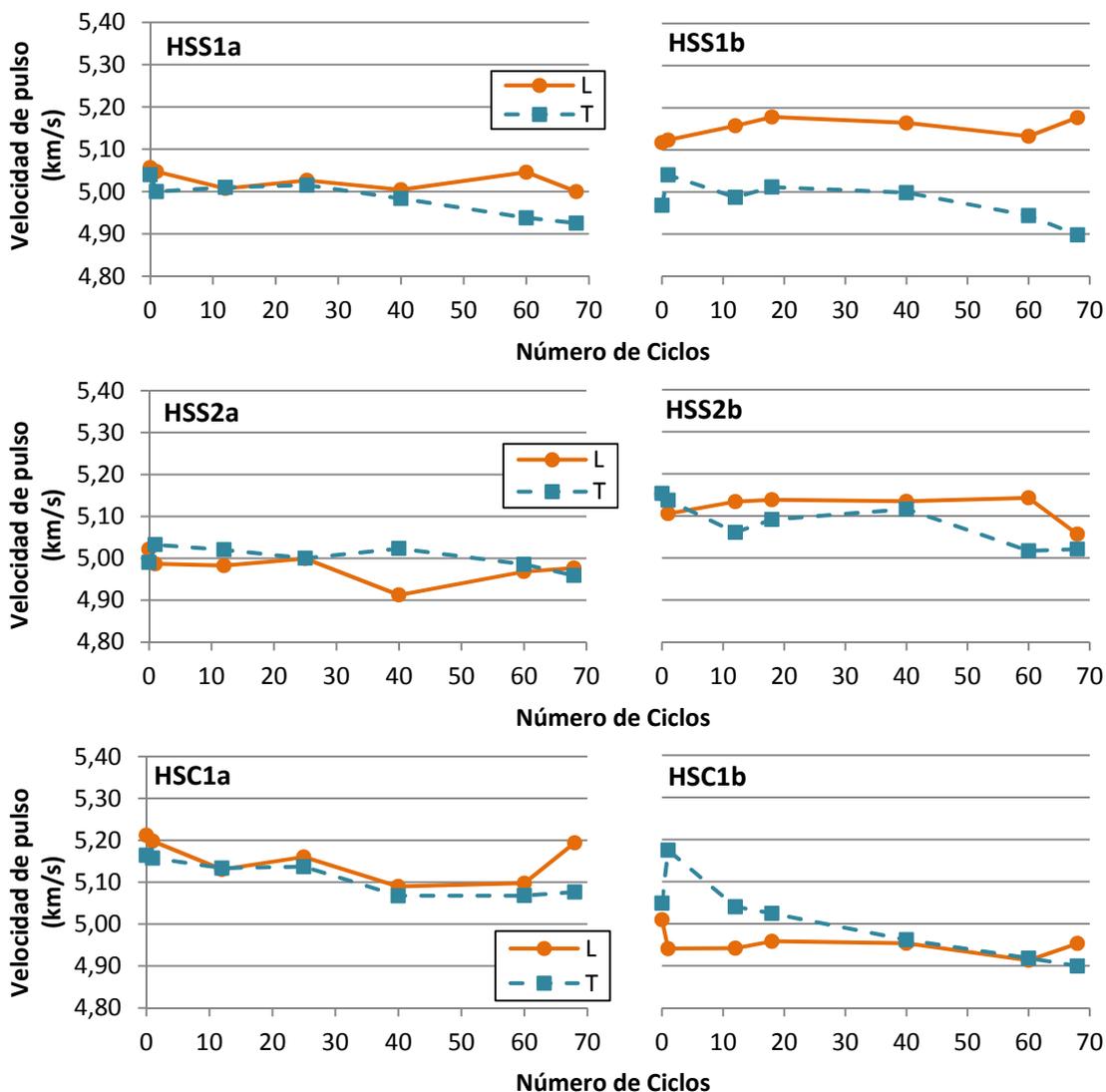


Figura 5.20: Velocidades de pulso sometidos a ciclos de hielo-deshielo

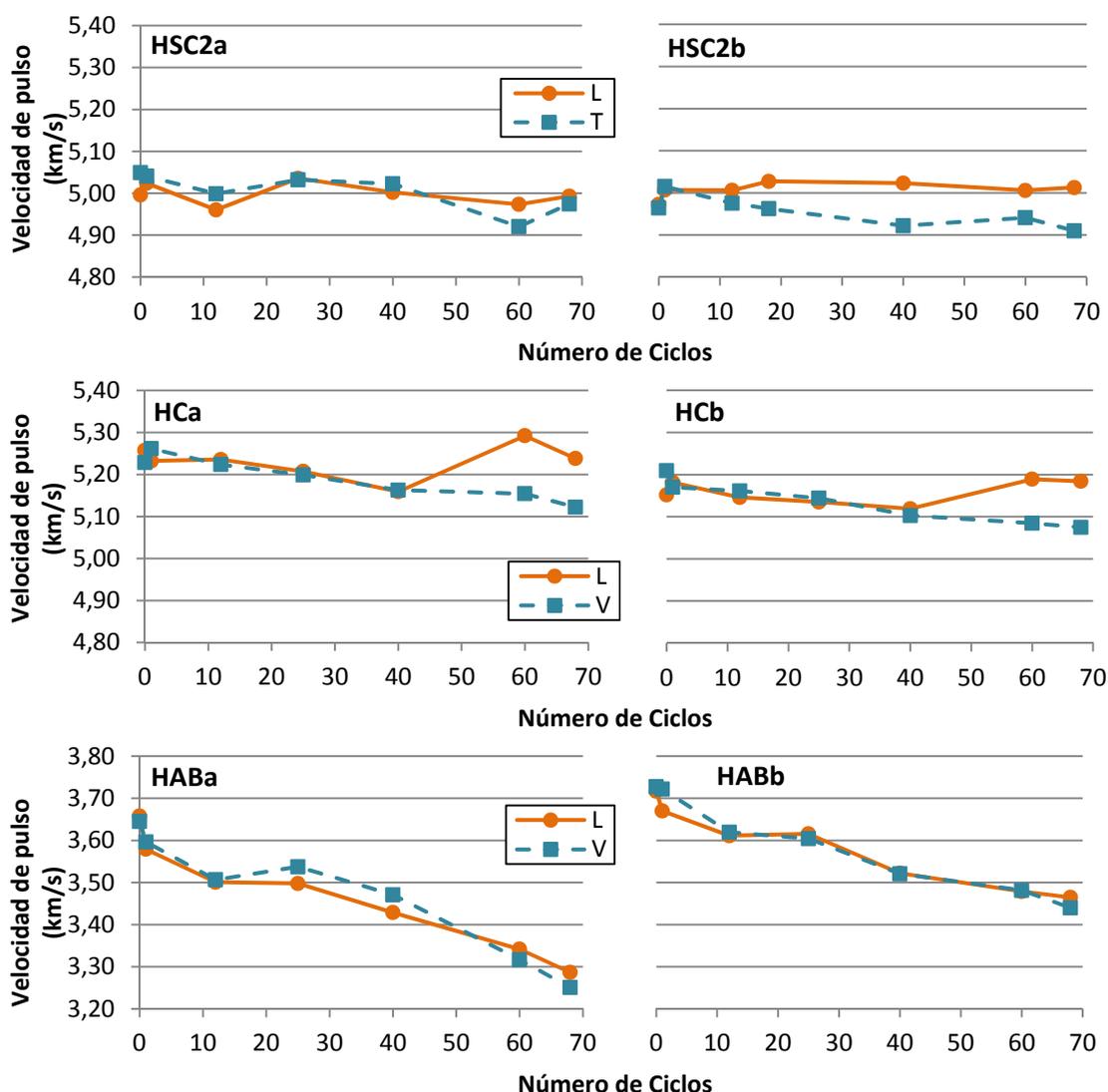


Figura 5.20 (Cont.): Velocidades de pulso sometidos a ciclos de hielo-deshielo

Resistencias a compresión

En la Figura 5.21 se presentan las resistencias a compresión a 0 y 68 ciclos, así como la variación relativa entre ellos. En dicha figura se observa que los hormigones siderúrgicos y convencionales no solo no experimentan una pérdida de resistencia, sino que presentan un aumento en dicha propiedad.

Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Arribas, 2011, siendo la única autora que también observa aumentos en la resistencia a compresión de hormigones siderúrgicos diseñados con sustitución tanto en la fracción fina como la gruesa cuando expuestos a los ciclos de hielo-deshielo. Los incrementos apreciados por la autora son del 19% y 7%, lo que se aprecia hasta después de 300 ciclos.

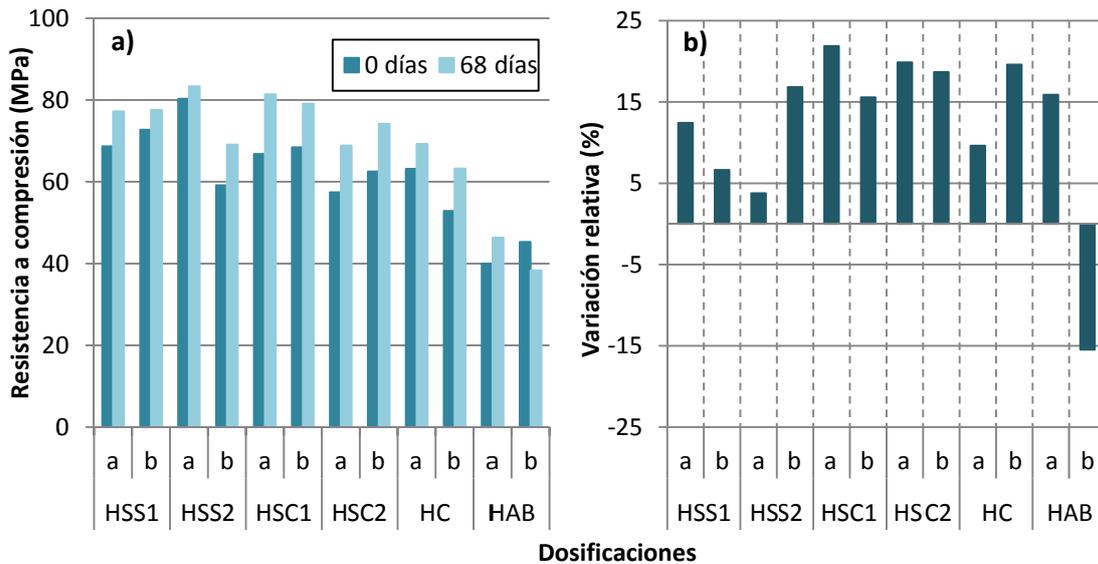


Figura 5.21: a) Resistencia a compresión 0 y 68 ciclos y b) Variación relativa (%)

Así pues, es destacable el comportamiento de los hormigones estudiados en la presente Tesis Doctoral, con incrementos en torno al 9% para los hormigones siderúrgicos con arena sílicea y del 19% para los hormigones siderúrgicos con arena caliza en tan solo 68 ciclos. En cuanto a los hormigones baríticos, la serie “b” muestran una reducción del 15% en la resistencia, lo que posiblemente se debe a la elevada degradación observada en la inspección visual e indicada por los resultados de ultrasonidos. De hecho, el plano de fallo observado en los ensayos de resistencia a compresión de los hormigones baríticos coincide con las fisuras identificadas en la inspección visual de las probetas, como se puede ver en la Figura 5.22a. Así mismo, al realizar las compresiones se observó que en el interior de las probetas los áridos mostraban un desgaste y la pasta presentaba mayor cantidad de poros en comparación con los hormigones convencionales (Figura 5.22b). También se observó que durante el ensayo de compresión se producía una gran cantidad de polvo, residuo tanto de la pasta como, de los áridos (Figura 5.22c), demostrando que la rotura era provocado por ambos.

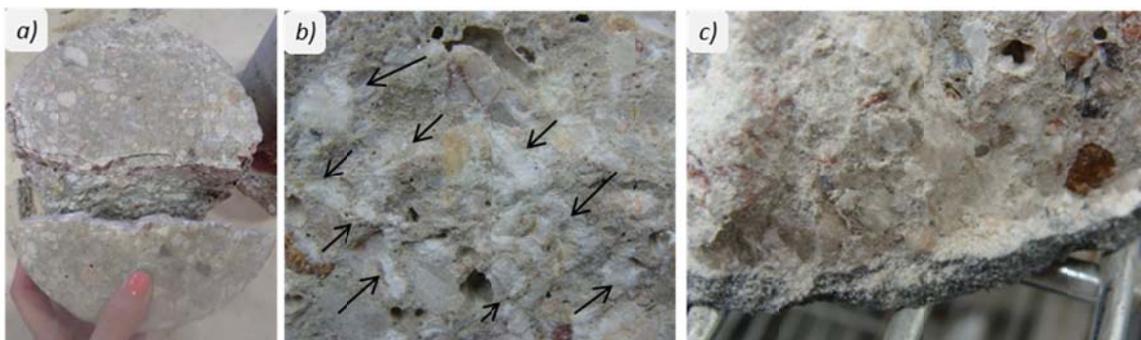


Figura 5.22: Hormigones HAB: a) Fallo a compresión; b) presencia de poros y/o huecos en la pasta y áridos desgastados (flechas); c) polvo acumulado en zona interior de la probeta

Por último, en la Figura 5.23 se muestra el detalle de los áridos baríticos incrustados en la pasta en diferentes probetas, pudiéndose observar que presentan una tendencia de delaminación de forma similar a lo mostrado en el Capítulo 4 (Figura 4.19). La rotura apreciada en los hormigones con árido siderúrgico se produce en la forma de fisuras que atraviesan tanto la pasta como en parte de los áridos gruesos, tal y como muestra la Figura 5.24a y 5.24b. Esto es fruto del formato irregular y alargado de algunos de los áridos, asociado a la buena adherencia superficial con la pasta. En el caso de la dosificación convencional, la rotura se produce fundamentalmente con fisuras que se extienden a través del mortero, contornando los áridos gruesos (ver Figura 5.24c).

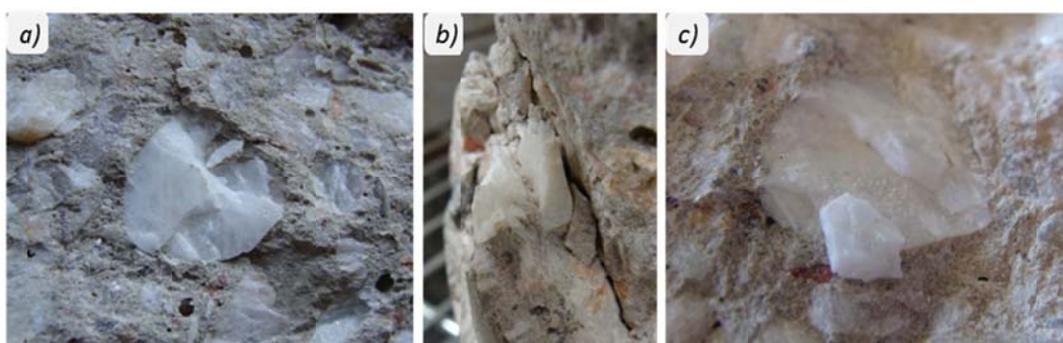


Figura 5.23: Delaminación de los áridos baríticos en una matriz rígida: a, b) HABA y c) HABb

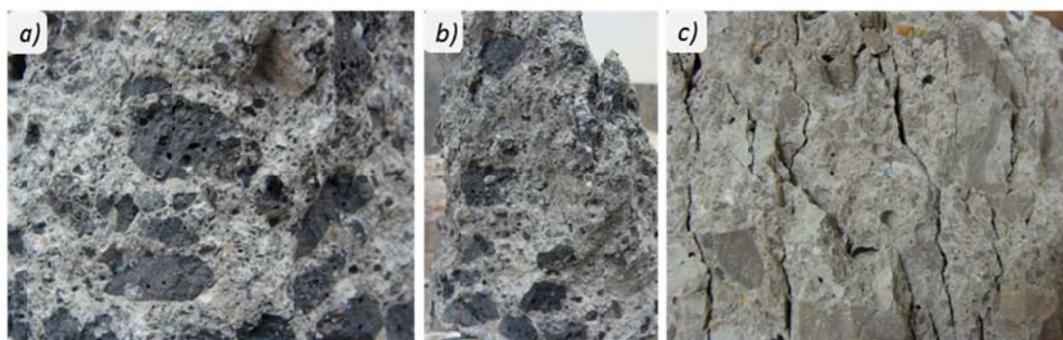


Figura 5.24: Probetas después del ensayo de compresión: a) HSC2b; b) HSS2b y c) HCa

Evaluación microestructural

Con el fin de ahondar en las diferencias a nivel microestructural que justifiquen los comportamientos apreciados, se realizó un análisis mediante microscopia electrónica de barrido de muestras extraídas de probetas antes y después de los ciclos de hielo-deshielo. Dicho análisis se centró fundamentalmente en la caracterización de la zona interfacial de transición y la presencia de microfisuras en la matriz.

La Figura 5.25a y 5.25b muestran las imágenes obtenidas en una muestra extraída de HCa antes y después de ser sometido al ensayo de hielo-deshielo. Es evidente que, a pesar de la aplicación de los ciclos, se mantiene un íntimo contacto entre el árido y la pasta en la zona

interfacial de transición (ver figuras 5.25a y 5.25b). Además, no se identifican microfisuras generadas por la expansión del agua durante el ensayo, lo que sugiere que el hormigón se mantuvo en buen estado tras el ensayo.

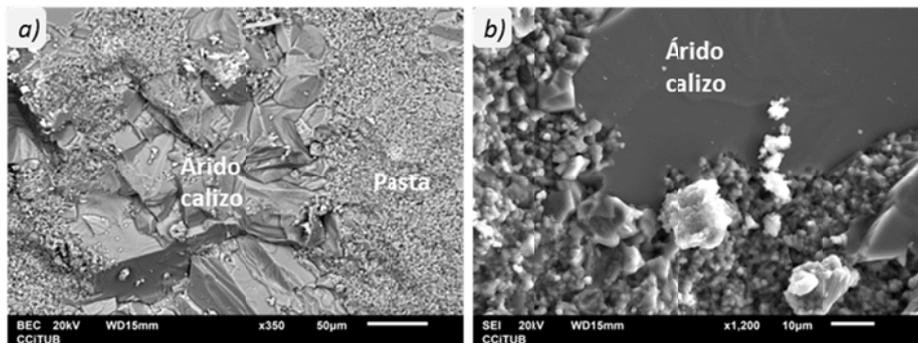


Figura 5.25: Hormigón convencional (HCa) a) antes y b) después de la aplicación de los ciclos de hielo-deshielo

La Figura 5.26, las primeras imágenes (a y b) corresponden a la muestra del hormigón siderúrgico HSS1b extraídas antes de los ciclos de hielo-deshielo. En ellas se observa que, al igual que en el hormigón convencional, los áridos siderúrgicos están completamente envueltos por la pasta. Esto sugiere un contacto íntimo entre los áridos siderúrgicos y la pasta.

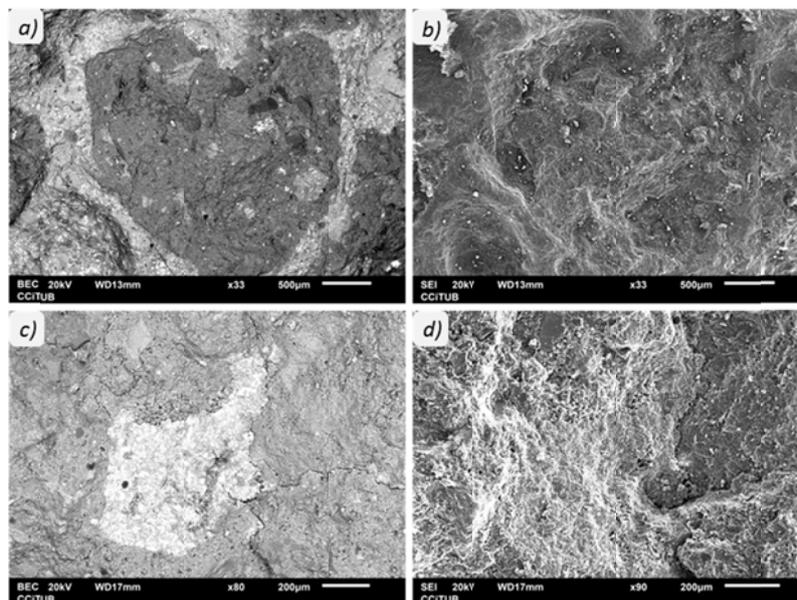


Figura 5.26: Hormigón siderúrgico (HSS1b) antes (a y b) y después (c y d) de los ciclos

La misma conclusión se deriva del análisis de las Figuras 5.26c y 5.26d, referentes a las muestras extraídas de probetas sometidas a los ciclos de hielo-deshielo. Es evidente que los ciclos de hielo-deshielo parecen no haber afectado el aspecto de la zona interfacial de transición. Además, no se identifican microfisuras en la matriz relacionadas con dichos ciclos.

Tampoco se apreció ningún tipo de compuesto nocivo que pudiera indicar algún proceso de degradación, lo que refuerza la apreciación sobre el buen estado de conservación de los hormigones de árido siderúrgico sometido a los ciclos de hielo-deshielo.

La Figura 5.27 presenta las imágenes obtenidas en una muestra extraída de un hormigón barítico no sometido a los ciclos de hielo deshielo. El análisis realizado pone de manifiesto una mala conexión entre los áridos y la pasta, lo que refleja una zona interfacial de transición de mala calidad. En diversos puntos analizados se aprecia la existencia de un espacio de aproximadamente $2\ \mu\text{m}$ entre el árido y la pasta, no habiendo contacto entre ambos. Esto podría ser fruto del fenómeno de desgaste descrito en el Capítulo 3, el cual se caracteriza por una alteración de la curva granulométrica y la deposición de una capa de polvo sobre la superficie del árido barítico durante el proceso de amasado. La capa formada actuaría como una barrera a la formación de una buena zona interfacial de transición. Asimismo, llama la atención la mayor presencia de poros en la pasta ubicada en las cercanías de los áridos.

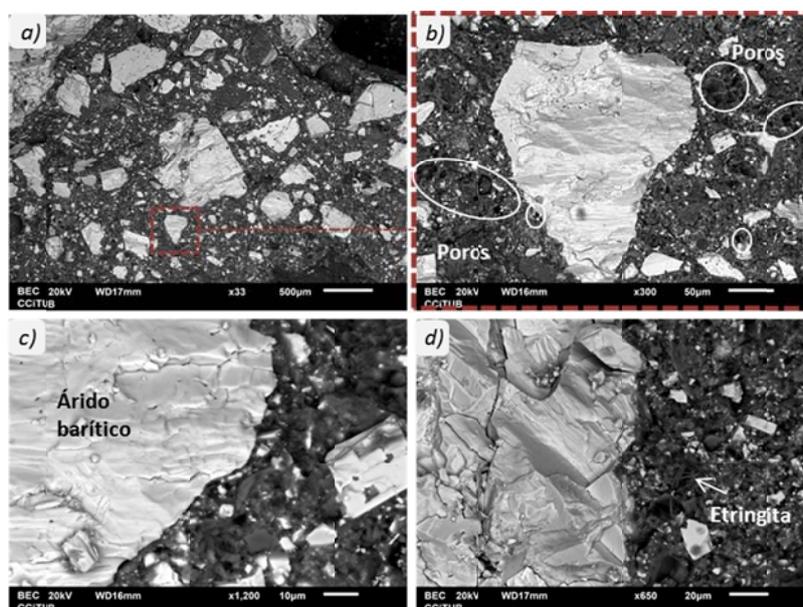


Figura 5.27: Hormigón barítico (HABb) antes del ensayo de hielo-deshielo: a) Aspecto general del hormigón; b) Observación de numerosos poros en la pasta; c) Mala conexión ($1-2\ \mu\text{m}$) entre árido y pasta y d) Porosidad de la pasta alrededor del árido

En la Figura 5.28 se presenta la microscopia de la muestra extraída del hormigón barítico tras la realización de los ciclos de hielo-deshielo. En ella se observa que los espacios existentes entre árido y pasta en la zona interfacial de transición sufren un incremento en número y en abertura, alcanzando valores del orden de $6\ \mu\text{m}$ en diversos puntos. Asimismo se aprecian fisuras en la pasta que podrían deberse a la realización de los ciclos.

El aumento del espacio medido en la zona interfacial de transición con respecto a la muestra no sometida a los ciclos aporta información relevante sobre cómo tiene lugar el

proceso de degradación en los hormigones baríticos. Los espacios originalmente existentes podrían servir como zonas para acumulación de agua que, una vez se acerca de la temperatura de solidificación, genera presiones capaces de incrementar los espacios entre árido y pasta, además de producir fisuras. Ambos fenómenos comprometen la resistencia del hormigón y su durabilidad frente a los ciclos de hielo-deshielo.

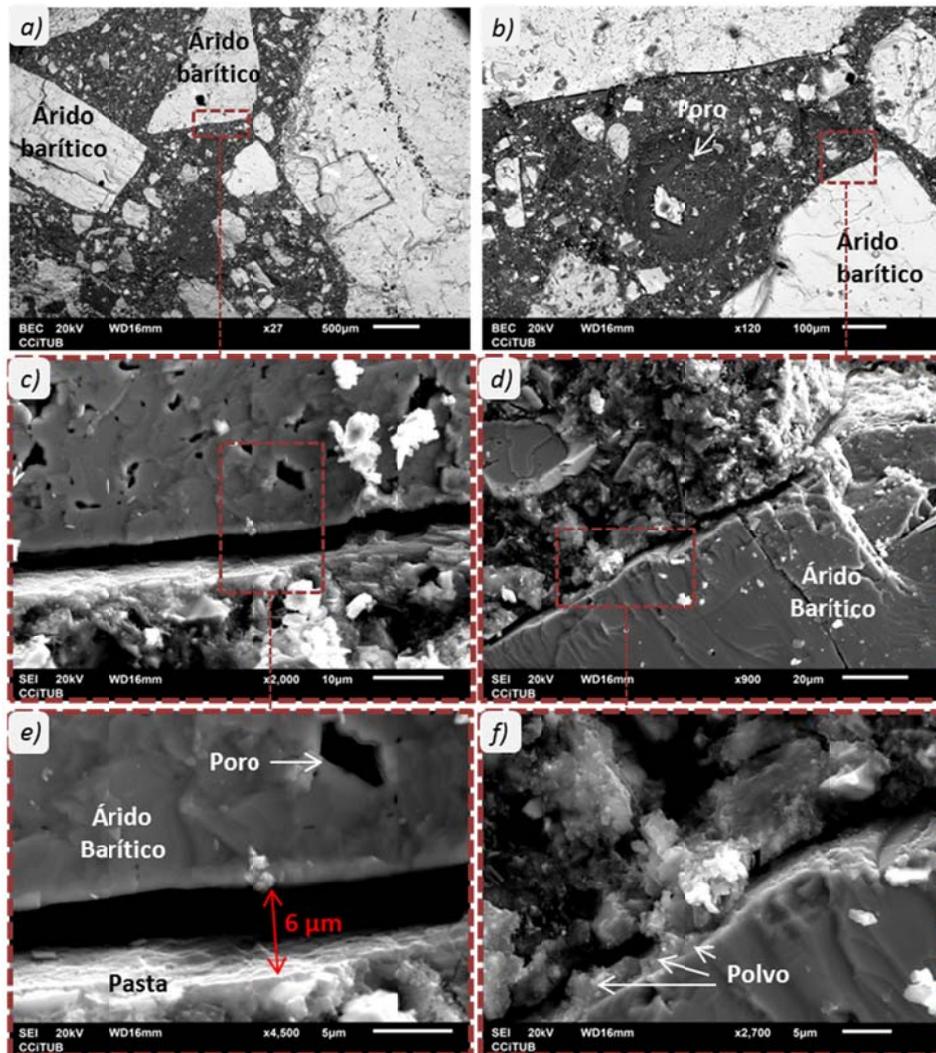


Figura 5.28: Hormigón barítico (HABb) después de ensayo hielo-deshielo: a-b) Aspecto general del hormigón; c-e) Espacio de 6 μm entre árido y pasta y d-f) Interfase con restos de polvo

5.3.5 Lixiviación

En la Tabla 5.2 se muestran los valores medios de concentración de cada componente lixiviado en los períodos de 6 horas, 4 días y 36 días para cada hormigón estudiado. En referencia a los componentes definidos como contaminantes, las concentraciones de Cd, Cu, Cr, Pb, Zn, V resultan ser despreciables, siendo su valor muy próximo al cero. Así mismo, tanto el Níquel como el Selenio están por debajo de los límites de detección. Los contenidos de

Bario, Fluoruros y Sulfatos son inferiores a los límites definidos en la legislación holandesa [NEN 7345, 1993] (600, 1500 y 25000 mg/m², respectivamente).

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN DEL LIXIVIANTE mg/m ²								
	HSS1b			HSC1a			HCa		
	0,25	4	36	0,25	4	36	0,25	4	36
Ba	0,0002	0,0002	0,0001	0,0006	0,0002	0,0002	0,0003	0,0001	0,0001
Cd	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cu	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cr	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ni	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Zn	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Se	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Fe	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
Ca	0,0041	0,0079	0,0178	0,0054	0,0138	0,0463	0,0053	0,0110	0,0945
Al	0,0005	0,0008	0,0032	0,0005	0,0006	0,0020	0,0005	0,0005	0,0033
Mg	0,0003	0,0003	0,0001	0,0004	0,0007	0,0003	0,0003	0,0003	0,0001
Mn	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F	--	--	0,0002	--	--	0,0001	--	--	0,0001
SO ₄	--	--	0,0013	--	--	0,0007	--	--	0,0010

*ND – No detectado

Tabla 5.2: Lixiviante de componentes por períodos (días) para HSS1b, HSC1a y HCa

Los elementos más lixiviados son el Ca. Los contenidos de Ca alcanzados son más altos en el caso del hormigón convencional, lo que se justifica por el mayor contenido de árido calizo presente. Los menores contenidos de Ca se observan para el hormigón siderúrgico con árido silicio, el cual presentaba menor contenido de árido calizo.

En la Figura 5.31 se muestra el valor medio de los resultados del pH y de la conductividad para cada tipo de hormigón. A manera de referencia se presentan los resultados obtenidos por Amaral, 1999 que responden a un hormigón siderúrgico con sustitución solo en la fracción gruesa. Primeramente se observa que ambos parámetros aumentan en función del tiempo y que los valores de los tres hormigones estudiados están por debajo de los obtenidos por Amaral, 1999.

Los hormigones siderúrgicos presentan menores aumentos en comparación al hormigón patrón (HCa). La baja conductividad de los hormigones siderúrgico se debe al bajo contenido de sales solubles y a una escasa presencia iónica. Los resultados del ensayo de lixiviación indican que el hormigón siderúrgico no es potencialmente contaminante.

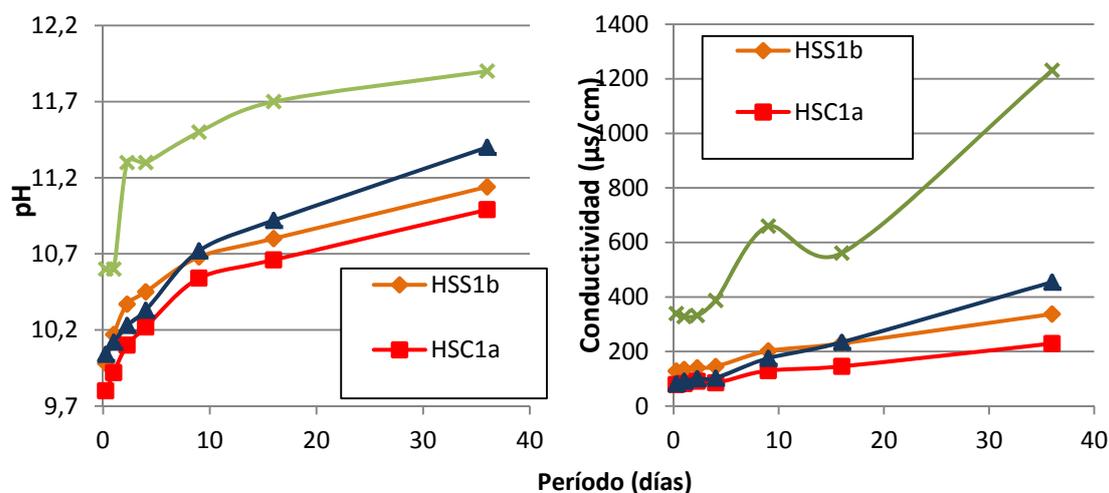


Figura 5.29: Valores para cada tipo de hormigón de: a) pH y b) conductividad

5.4 CONCLUSIONES

Los estudios realizados en el presente apartado muestran que los hormigones siderúrgicos tienen un comportamiento similar al del hormigón convencional desde el punto de vista de la durabilidad. Por otro lado, se observaron posibles problemas de durabilidad en los hormigones baríticos frente a algunos de los procesos de degradación simulados. A continuación se indican las principales conclusiones derivadas del estudio.

Penetración de agua bajo presión

- Los hormigones siderúrgicos con arena caliza y los hormigones baríticos acusan una mayor penetración de agua bajo presión en comparación con los hormigones convencionales y hormigones siderúrgicos con arena silíceo.
- El contenido de aditivo polifuncional tiene una influencia significativa en el resultado de del ensayo de penetración de agua bajo presión de los hormigones siderúrgicos. Esto debe tenerse en cuenta en la definición de las dosificaciones con árido siderúrgico dado que en algunos casos un incremento en el contenido de aditivo puede contribuir a la reducción en la penetración de agua bajo presión. .

Ensayo mojado-secado

- Durante la inspección visual en el transcurso del ensayo mojado-secado se observa la aparición de manchas de óxido en la superficie. Los óxidos provienen de los áridos siderúrgicos ubicados cerca de la superficie. La cantidad de puntos aumenta con el número de ciclos, especialmente en elementos con alta relación superficie/ volumen.

Este fenómeno debe tenerse en cuenta para posibles aplicaciones de hormigón visto en las que la aparición de manchas pueda comprometer la estética de la estructura.

- Tanto en este ensayo como en el ensayo de penetración de agua, se observa un mejor comportamiento por parte de las series “b” de los HS, presentando un menor aumento de puntos. El porcentaje de aumento fue entorno al 60% entre meses, mientras que, las series “a” tan solo el primer mes presentaron una variación de entre 220% y 550%. Por lo tanto, nuevamente se observa que el comportamiento de los hormigones siderúrgicos está bastante influenciado por el contenido de aditivo polifuncional empleado.
- La variación del peso de todos los hormigones (independientemente del tipo de probetas) estuvo por debajo del 0,50%, por lo que los ciclos de mojado-secado no representan una problemática en este aspecto.
- Las mayores variaciones dimensionales medidas durante los ciclos se producen en la dosificación con hormigón siderúrgico, siendo posiblemente fruto del fenómeno de entumecimiento combinado con la reacción de productos expansivos remanentes en los áridos. No obstante, las deformaciones medidas no suponen un riesgo para su durabilidad a nivel estructural.

Influencia del ambiente de exposición

- La variación dimensional apreciada por los hormigones siderúrgicos sometidos a diferentes ambientes de exposición es similar a la de los hormigones convencionales y baríticos. En todos ellos se observan valores que no representan un riesgo a la durabilidad.
- Los hormigones siderúrgicos muestran mayor profundidad de carbonatación que los hormigones convencionales y baríticos. Este resultado se debe posiblemente a la mayor porosidad del árido siderúrgico que favorece una penetración más rápida del CO₂.

Ensayo hielo-deshielo

- Los hormigones HAB mostraron un importante deterioro superficial con la aparición de fisuras a partir de los 45 ciclos en las caras circulares (base) y de los 53 ciclos en las laterales. Por el contrario, ninguno de los hormigones HS o HC presentó degradación superficial debido a los ciclos.
- La variación del peso en todos los hormigones resulta ser poco significativa (valores entre -0,25% y -0,45%) sin que llegue a representar un problema, ya que la pérdida se atribuye al constante contacto con el agua y al manoseo de las probetas.
- Los HAB presentaron un descenso de aproximadamente 8,80% en la velocidad de ultrasonido entre el primer y último ciclo. En el caso de los hormigones siderúrgicos y

calizo, la reducción apreciada es del orden de 1%, no habiendo diferencias en función del tipo de arena correctora, esqueleto granular o entre series.

- El análisis microestructural de la zona interfacial de transición muestra una buena conexión entre el árido y la pasta, tanto en el HS como en el HC. Esto se mantiene tras la realización de los ciclos de hielo-deshielo, no habiendo indicios de fisura que pudieran indicar algún proceso de degradación.
- En el hormigón barítico se observó una interfase débil previa al ensayo de hielo-deshielo, con espacios entre árido y pasta de 2 μm . Los espacios encontrados tras la realización de los ciclos de hielo-deshielo eran del orden de 2 a 3 veces mayores que los existentes originalmente, habiendo además presencia de microfisuras en la pasta. El aumento apreciado podría deberse a la acumulación de agua en esta zona que, al congelarse, genera tensiones y produce daños. Todo ello indica una degradación de los hormigones baríticos frente a los ciclos de hielo-deshielo. Los resultados también confirman la influencia negativa de la capa de polvo que se deposita en la superficie del árido barítico durante el proceso de amasado, la cual podría ser la principal causa de los espacios existentes entre árido y pasta.

Lixiviación

- Las concentraciones de los componentes considerados como contaminantes son inferiores a los límites establecidos en normativa sobre el tema. Ello significa que la incorporación de los áridos siderúrgicos utilizados en la presente investigación no representan ningún riesgo ambiental en la fabricación de los hormigones.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1 INTRODUCCION

El presente Capítulo tiene como objetivo exponer las principales conclusiones derivadas de los estudios realizados a lo largo de esta investigación. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo del presente estudio. Estos, se han dirigido, por una parte, a la determinación de dosificaciones idóneas de árido siderúrgico para la fabricación de hormigones pesados con responsabilidad estructural. Por otra parte, con base en una exhaustiva fase experimental, se ha evaluado el comportamiento de estos hormigones en comparación con otros tipos (convencionales y baríticos) en las diferentes etapas de su ciclo de vida: producción, puesta en servicio y durabilidad.

Las conclusiones específicas obedecen a los distintos estudios realizados para alcanzarlos objetivos específicos propuestos. En último lugar, se presentan las líneas futuras de investigación que podrían derivarse a partir de los trabajos realizados.

6.2 CONCLUSIONES GENERALES

Como se ha podido observar, en la industria de la construcción, la utilización de los áridos siderúrgicos provenientes de las escorias negras de horno de arco eléctrico tiene un amplio campo de aplicación. Una de las aplicaciones más estudiadas en los últimos años es su uso como áridos para la fabricación de hormigones sin responsabilidad estructural. Sin embargo, las características, tales como su alta densidad y resistencia a la fragmentación, señalan que los áridos siderúrgicos tienen potencialidad de uso en aplicaciones estructurales o de alto valor añadido.

Por esta razón, se ha planteado realizar una Tesis Doctoral capaz de responder a 3 temas: evaluar la viabilidad técnica de los áridos siderúrgicos para la fabricación de **hormigones estructurales** con una **sustitución del 100% del árido grueso y 80% del árido fino**, estudiar el posible uso de esos hormigones como material de alta densidad para protección radiológica y en capas de rodadura para pavimentos bi-capa. Así pues, se presentan a continuación las conclusiones generales obtenidas.

1. En cuanto al primer tema, se ha demostrado que es factible fabricar hormigones con responsabilidad estructural, sustituyendo al 100% la fracción fina y gruesa de áridos convencionales por áridos siderúrgicos. En general, el comportamiento de los hormigones con árido siderúrgico es similar o incluso superior al obtenido en dosificaciones equivalentes con áridos convencionales. La inclusión de los áridos siderúrgicos no supone problemas de durabilidad en el hormigón siempre y cuando los mismos estén previamente estabilizados. Para asegurar un buen comportamiento, puede ser necesario añadir arenas correctoras a la mezcla con el fin de suplir la falta de finos en el árido siderúrgico.
2. En el segundo tema, se concluye que por su alta densidad los áridos siderúrgicos son una alternativa viable y sostenible para la fabricación de hormigones pesados. Así mismo, los resultados confirman que el árido siderúrgico es un componente interesante para el hormigón estructural con capacidad de blindaje ante radiación gamma dado que aumenta la atenuación de la radiación sin comprometer las propiedades mecánicas.
3. Respecto al tercer tema, los estudios realizados muestran la posibilidad del uso de los hormigones siderúrgicos para capas de rodadura puesto que los mismos presentan una mayor resistencia a la abrasión que los hormigones convencionales y resistencias al deslizamiento similares.

6.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Con el fin de dar una visión de las principales aportaciones, se indican las conclusiones específicas más relevantes divididas por temas: características de los áridos, influencia en el proceso de producción, comportamiento de los hormigones y durabilidad de los hormigones. En este apartado, también se presentan las conclusiones específicas correspondientes a los áridos calizos y baríticos, así como, las relativas al comportamiento de los hormigones convencionales y baríticos.

Características de los áridos

- Los áridos siderúrgicos poseen forma irregular, de baja esfericidad en comparación con la los áridos calizos. Los primeros tienen una microestructura cavernosa por lo que presentan una mayor porosidad que los áridos calizos y baríticos. Además, se observaron nódulos de hierro embebidos en los áridos siderúrgicos como residuo resultante de la producción de acero.
- Los áridos siderúrgicos son entre 30% y 35% más densos y presentan una absorción de agua 2,5 veces mayor en comparación con los áridos calizos. Ello podría reflejarse en una mayor demanda de agua o aditivo superplastificante para alcanzar una misma trabajabilidad que en el caso de emplear hormigones convencionales. Entre las características de los áridos siderúrgicos también destaca su elevada resistencia a la fragmentación, lo cual podría conducir a una mejora de las propiedades mecánicas del hormigón.
- En relación al árido barítico, se identificó una microestructura cristalina compuesta por capas adyacentes con interfaces de alta friabilidad y propenso a la fragmentación durante la manipulación y proceso de amasado.

Influencia en el proceso de producción

- La alta resistencia a la fragmentación de los áridos siderúrgicos (20%) y calizos (30%) se refleja en un bajo desgaste de los mismos durante el proceso de amasado. Por el contrario, se determinó que la curva granulométrica de los áridos baríticos (40%) se modifica a raíz de por la energía introducida en dicho proceso. Como resultado se presenta un aumento en el contenido de finos con granulometría inferior a 0,125 mm.
- Alrededor de los granos baríticos se evidenció la deposición de una capa de polvo formado durante el proceso de amasado. Esta capa podría comprometer la conexión entre árido barítico y la pasta en la zona interfacial de transición. La capa de polvo en presencia de humedad tiende a reducir la interacción entre granos ya que forma una protección superficial en los mismos. En el caso de los áridos siderúrgicos y calizos no

se observó la formación de la capa de polvo, con lo cual se espera que no se produzca el mismo problema.

- La realización de la mezcla de los áridos baríticos en presencia de agua conduce a una reducción de aproximadamente 50% en el nivel de desgaste apreciado en comparación con la mezcla en seco. Por esta razón, es recomendable realizar el amasado de los áridos baríticos en condición húmeda en aras de reducir la modificación de la curva granulométrica y la deposición de la capa de polvo en la superficie de los áridos.

Comportamiento de los hormigones

- Los hormigones siderúrgicos revelan resistencias a compresión y tracción similares al hormigón calizo, pero módulos de elasticidad 10% mayores, ello responde a una mayor dureza y resistencia por parte de los áridos siderúrgicos. Por otro lado, las resistencias a compresión y tracción de los hormigones siderúrgicos son 25% y 65% mayores que las de los hormigones baríticos, respectivamente.
- En el estudio de la interfase por microscopia electrónica de barrido se constató que los áridos siderúrgicos presentan una mejor adherencia con la pasta (penetración total en las cavidades del árido siderúrgico) que los áridos baríticos. Ello se refleja en las mejores propiedades mecánicas y durabilidad de los hormigones siderúrgicos en comparación con el barítico.
- Por el contrario, la introducción de barita conduce a la reducción generalizada de las propiedades mecánicas. Esto se debe, por un lado, a la facilidad de fragmentación de los áridos baríticos y, por el otro, a la debilitación de la zona de transición fruto de la deposición de una capa de polvo en la superficie del árido.
- Los resultados de ensayos con radiación confirman que la incorporación del árido siderúrgico al hormigón contribuye a la capacidad del material en atenuar radiación gamma. Se ha demostrado que cuando aumenta la densidad del hormigón, el valor del coeficiente de atenuación también incrementa. Por esta razón, los coeficientes de atenuación de rayos gamma de los hormigones siderúrgicos son 11% mayores que los del hormigón convencional, mientras que los hormigones baríticos muestran valores 25% más altos que los hormigones siderúrgicos.
- Las estimaciones del espesor mínimo requerido (HVL) mostraron pequeñas diferencias entre el hormigón siderúrgico y barítico. Para que un muro de hormigón siderúrgico ofrezca la misma capacidad de protección radiológica que el de un hormigón barítico, el espesor del muro debería ser 6,5 cm más grueso.
- La resistencia a la abrasión de los hormigones siderúrgicos es mayor en comparación con los hormigones convencionales y baríticos. Los valores medios de desgaste de los hormigones siderúrgicos son de 18,3 mm, mientras que para los hormigones convencionales y baríticos son de 24,5 y 30 mm, respectivamente. En cuanto a la

resistencia al deslizamiento/derrape, los hormigones siderúrgicos muestran valores del mismo orden de magnitud (70 PTV) que los del hormigón convencional y barítico (72 PTV).

Durabilidad de los hormigones

- De manera general, todos los hormigones producidos presentan una penetración de agua bajo presión inferior a los límites establecidos en la EHE-08, siendo por lo tanto aptos para la aplicación estructural. La única excepción se presenta en el caso de los hormigones siderúrgicos con arena correctora caliza de la serie “a”, que sobrepasa ligeramente el valor máximo definido en la instrucción.
- El comportamiento de los hormigones siderúrgicos en cuanto a la penetración de agua bajo presión está sensiblemente influenciada por la cantidad de aditivo polifuncional incorporado. Mezclas con una mayor cantidad de aditivo presentaron una profundidad de penetración de agua similar a la de los hormigones convencionales, mientras que mezclas con menor contenido de aditivo tienen profundidad de penetración hasta dos veces superiores. Ello puede estar relacionado con la necesidad de una pasta con mayor fluidez que sea capaz de envolver y adentrar en las irregularidades superficiales existentes en el árido siderúrgico, reduciendo así la presencia de vacíos que sirvan como camino preferente para la penetración de agua.
- En los ciclos mojado-secado se ha observado la aparición de manchas de óxido en la superficie de las probetas de hormigones siderúrgicos. El número de manchas se incrementa con la aplicación de los ciclos. Ello es más notable en elementos con alta relación superficie/volumen que presentan una deposición del árido cerca de la superficie. Este fenómeno debe tenerse en cuenta en elementos ejecutados con hormigón visto y expuestos a la intemperie.
- Durante los ciclos de mojado-secado los hormigones siderúrgicos presentan una expansión ligeramente superior a la de los hormigones convencionales, alcanzando valores entre 0,019 y 0,068 mm/m. Esas variaciones son posiblemente fruto de la combinación de un efecto de entumecimiento y la reacción de compuestos remanentes en los áridos siderúrgicos. Cabe destacar que las expansiones observadas pueden ser consideradas bajas, siendo además varias veces inferiores a los límites establecidos en la literatura. Por todo ello se concluye que los hormigones siderúrgicos ensayados no representan un riesgo a la durabilidad estructural.
- Después de un año de exposición a la intemperie (3 años desde su fabricación), las variaciones dimensionales medidas en los hormigones siderúrgicos son similares a las del hormigón convencional. Una vez más se observa que el uso del hormigón siderúrgico no supone un riesgo a la durabilidad de la estructura.

- Los hormigones siderúrgicos HSS y HSC presentan una profundidad de carbonatación 2,5 y 5 veces mayor que la de los hormigones convencionales. Ello podría deberse a la mayor porosidad del árido siderúrgico que podría contribuir a la difusión de CO₂.
- Los hormigones siderúrgicos tienen un comportamiento similar a los hormigones convencionales ante los ciclos de hielo-deshielo. Tras la realización de los ciclos, no se ha apreciado ningún tipo de desgaste o descamación superficial. Los hormigones siderúrgicos revelan una reducción de tan solo 1,10% en las velocidades de pulso y un incremento de la resistencia a compresión de 9% y 19% para los HSS y HSC. El buen estado de conservación se confirma en el análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido que indica la ausencia de fisuras y la existencia de un íntimo contacto entre árido y pasta.
- Respecto al hormigón barítico, la aparición de fisuras en las probetas y el descenso del 8,80% en las velocidades de pulso delatan una degradación debido a los ciclos de hielo-deshielo. Ello se confirma con una reducción de la resistencia a compresión del 15% y un aumento del espacio entre el árido y la pasta en la zona interfacial de transición después de los 68 ciclos.
- Finalmente respecto al comportamiento ambiental (lixiviaciones), se ha observado que la incorporación de áridos siderúrgicos no representan un riesgo de contaminación dado que las concentraciones de los componentes definidos como contaminantes están muy por debajo de los límites establecidos y en la mayoría de los casos cercanos a cero.

6.4 PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de los avances descritos en la sección anterior, aún existe un gran espacio para nuevos estudios, considerando el poco valor añadido que se le ha atribuido al uso de áridos siderúrgicos para la fabricación de hormigones. Por ello, a continuación se presentan las posibles líneas de investigación a partir del trabajo realizado en la presente Tesis Doctoral.

- Desarrollar un ensayo o método acelerado “in situ” para evaluar la estabilidad de los áridos siderúrgicos, con la finalidad de asegurar al técnico o supervisor de obra, que los mismos cumplen con los requisitos recogidos en la normativa correspondiente (dependiendo del país donde se construya).
- En cuando a la influencia del proceso de amasado, sería interesante realizar una campaña experimental que evaluara la influencia otras variables de amasado que afectan el desgaste experimentado por el árido barítico. En ese sentido, se deberían identificar procedimientos que permitan reducir dicho desgaste.
- Realizar ensayos para evaluar la fluencia y la fatiga del hormigón siderúrgico, así como, las ecuaciones constitutivas correspondientes.

- Incrementar el número de ciclos de mojado-secado tanto de los hormigones convencionales y baríticos, como de los siderúrgicos. El objetivo en los primeros es confirmar si la segunda retracción medida corresponde a la estabilización, mientras que en los hormigones siderúrgicos es observar si llegan a presentar una segunda retracción como se ha visto en el caso de los convencionales y baríticos.
- Aumentar el tiempo de exposición a la intemperie de los hormigones baríticos para confirmar que las expansiones no sean mayores a los 3 mm/m.
- Ampliar la campaña de durabilidad para evaluar el comportamiento de hormigones siderúrgicos a altas temperaturas.
- Plantear el diseño de los elementos constructivos que garanticen su adecuación al uso previsto (muros radiológicos) y a las condiciones específicas de puesta en obra.
- Analizar los métodos de colocación y transporte de los hormigones siderúrgicos en función del elemento constructivo al que esté destinado.
- Desarrollar nuevos campos de aplicación de los hormigones siderúrgicos como, por ejemplo, losas y pavimento de aceras.

BIBLIOGRAFÍA

Abdulaziz I, Al-Negheismish Faisal H, Al-Sugair, Rajeh Z. (1996). *Utilization of local steelmaking slag in concrete.* Department of Civil Engineering. Collage of Engineering, King Saud University 1996; 9: 39-55

Abu-Eishah SI, El-Dieb AS, Bedir MS. (2012). *Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region.* Construction and Building Materials 2012; 34: 249-256

ACI Committee 304. *Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete.* ACI 304R-00. American Concrete Institute; 2009. pp 33

Akinmusuru JO. (1991). *Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes.* Resources, Conservation and Recycling 1991; 5: 73-80

Akkurt I, Basyigit C, Kilincarslan S, Mavi B, Akkurt A. (2006). *Radiation shielding of concretes containing different aggregates.* Cement & Concrete Composites 2006; 28: 153-157

Akkurt I, Altindag R, Basygit C, Kilincarslan S. (2008). *The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete under F-T cycles.* Materials and Design 2008; 29: 1793-1795

Al Mutlaq FM, Page CL. (2013). *Effects of electric arc furnace dust on susceptibility of steel to corrosion in chloride-contaminated concrete.* Construction and Building Materials 2013; 39: 60-64

Alexander KM, Ivanusec I. (1982). *Long term effects of cement SO₃ content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength.* Cement & Concrete Research 1982; 12: 51-60

Allen T. (1997). *Particle Size Measurement.* 5ª edición. Chapman & Hall

Alonso-Santurde R, Coz A, Viguri JR, Andrés A. (2012). *Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks.* Construction and Building Materials 2012; 27: 97-106

Amaral de Lima L. (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental.* Tesis Doctoral. Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya, 1999

Arribas García I. (2011). *Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica.* Tesis Doctoral. Bilbao. Universidad del País Vasco, 2011

Arribas I, Vegas I, San-José JT, Manso JM. (2014). *Durability studies on steelmaking slag concretes.* Materials and Design 2014; 63: 168-176

Bakker RFM. (1988). *Initial period. Report of the Technique Committee.* RILEM 60-CSC-Corrosion of steel in Concrete. P. Shiessl, 1988

Bäverman C, Aran F. (1997). *A study of the potential of utilising electric arc furnace slag as filling material in concrete.* Waste Materials in Construction. Putting Theory into Practice. Elsevier Science 1997

Bäverman C, Sapiej A, Moreno L, Neretnieks I. (1997). *Serial batch test performed on municipal solid waste incineration bottom ash and electric arc furnace slag, in combination with computer modelling.* Waste Management & Research 1997; 15: 55-71

Bantsis G, Sikalidis C, Betsiou M, Yioultsis T, Bourliva A. (2011). *Ceramic building materials for electromagnetic interference shielding using metallurgical slags.* *Advances in Applied Ceramics* 2011; 110: 233-237

Bantsis G, Mavridou S, Sikalidis C, Betsiou M, Oikonomou N, Yioultsis T. (2012). *Comparison of low cost shielding-absorbing cement paste building materials in X-band frequency range using a variety of wastes.* *Ceramics International* 2012; 38: 3683-3692

Beshr H, Almusallam AA, Maslehuddin M. (2003). *Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete.* *Construction and Building Materials* 2003; 17: 97-103

Best NF. (1987). *Volumetric stability of weathered LD slags containing both free lime and periclase.* Final report British Steel Corporation. Commission of the European Communities, Eds. EUR 10753 EN. 1987

Binici H, Aksogan O, Sevinc AH, Kucukonder A. (2014). *Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag.* *Construction and Building Materials* 2014; 50: 177-183

Calmon JL, Avancini F, Giacometti M, Meneguelli M, Moratti M, Lutfi JES. (2013). *Effects of BOF steel slag and other cementitious materials on the rheological properties of self-compacting cement pastes.* *Construction and Building Materials* 2013; 40: 1046-1053

Carretero JG, González ES. (1992). *Medida del grado de envejecimiento de escoria de acería.* *Ingeniería Civil* 1992; 83: 89-93

Código Técnico de la Edificación, CTE. (2006). *DB-SUA: Seguridad de Utilización y accesibilidad.* Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento. Madrid. 2006

Comisión Permanente del Hormigón. Instrucción de Hormigón Estructural EHE. (2008): Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento. Madrid. 2008

Crammond NJ. (1984). *Examination of mortar bars containing varying percentages of coarsely crystalline gypsum as aggregate.* *Cement and Concrete Research* 1984; 14: 225-230

Demir F, Budak G, Sahin R, Karabulut A, Oltulu M, Un A. (2011). *Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV γ -rays.* *Annals of Nuclear Energy* 2011; 38: 1274-1278

Dreux G. (1981). *Guía Práctica del Hormigón. 1ª. Ed. Editores Técnicos Asociados, S. A. Barcelona, 1981*

Etxeberria M, Pacheco C, Meneses JM, Berridi I. (2010). *Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates.* Construction and Building Materials 2010; 24: 1594-1600

Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. (2007). *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.* Cement and concrete Research 2007; 37: 735-742

Fernández Cánovas MF. (1996). *Hormigón.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 4ª edición.

Fernández M. (1991). *Hormigón.* 2ª Ed. Madrid. 1991

FIB Model Code. (2010). Comité Euro-Internacional du Beton-Federation International de la Precontrainte. Paris. 2010

Frías M, Sánchez MI, Uría A. (2002). *Study of the instability of black slags from EAF steel industry.* Materiales de Construcción 2002; 52: 79-83

Frías M, Sánchez de Rojas MI. (2004). *Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds.* Cement and Concrete Research 2004; 34: 1881-1888

Frías M, San-José JT, Vegas I. (2010). *Steel slag aggregate in concrete: the effect of ageing on potentially expansive compounds.* Materiales de Construcción 2010; 60: 33-45

Fronek B, Bosela P, Delatte N. (2012). *Steel slag aggregate used in Portland cement concrete. U.S. and International Perspectives.* Transportation Research Board of National Academies, No. 2267. Washington 2012. pp 37-42

Geiseler J, Schlösser R. (1986). *Kriterien zur Verwertung von Elektroofenschlacken.* Preprints, 2nd European Electric Steelmaking Congress, Florence, 1986

Gencil O, Brostow W, Ozel C, Filiz M. (2010). *An investigation on the concrete properties containing colemanite.* International Journal of Physical Sciences 2010; 5 (3): 216-225

George CM, y Sorrentino FP. (1982). *New concrete based on oxygen steel slag containing alumina.* Silicates Industriels

Geyer RMT, Geyer A, DalMolin DCC, Vilela ACF. (1997). *Uso de escorias de aciaria como substituição ao cimento portland – uma análise da melhoria das propriedades do concreto.* IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Porto Alegre. Brasil, 1997

González JJ. (1999). *Estudio del hinchamiento de la escoria de horno eléctrico de arco. Valoración como material de construcción.* Informe final Proyecto de Investigación Universidad-Empresa UE 97-19

González-Ortega MA, Cavalaro SHP, Aguado A. (2015). *Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties concrete.* Construction and Building Materials 2015; 74: 169-175

González-Ortega MA, Segura I, Cavalaro SHP, Toralles-Carbonari B, Aguado A, Andrello AC. (2014). *Radiological protection and mechanical properties of concrete with EAF steel slags.* Construction and Building Materials 2014; 51: 432-438

Hernández J. (2007). *Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico.* Tesis de Máster. Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya, 2007

Herrero T. (2015). *Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA: aplicación en pastas y morteros de cemento.* Tesis Doctoral. Bilbao. Universidad del País Vasco, 2015

Hoffmann C, Schubert S, Leeman A, Motavalli M. (2012). *Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material.* Construction and Building Materials 2012; 35: 701-709

Hogg R. (1980). *Characterization of mineral surfaces.* In: Somasundaran, P. (Ed.), Fine Particle Processing, vol. 1. Society of Mining Engineers of AIME, New York: 492-524

Huang L-S, Lin D-F, Luo H-L, Lin P-C. (2012). *Effect of field compaction mode on asphalt mixture concrete with basic oxygen furnace slag.* Construction and Building Materials 2012; 34: 16-27

Hubbell JH, Seltzer SM. (2004). *Tables of X-Ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients (version 1.4).* <<http://physics.nist.gov/xaamdi>> [2013, 06/20]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD; 2004

Instruction Manual. (2008). Skid Resistance and Friction Tester, A113. 2008

Jigar PP. (2008). *Broader use of steel slag aggregates in concrete.* Tesis de Máster. India. Maharaja Sayajirao University of Baroda, 2006

Jones NC. (2001). *The Successful use of EAF slag in Asphalt.* Proceedings of 2nd European Slag Conference. October 2000. Dusseldorf. ISSN 1617-5867. EUROSLAG EDS. Publication N^o: 1: 111-121

Jones R, Kaplan MF. (1957). *The effects of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure.* Magazine of Concrete Research 1957; 9: 89-94

Kakizaki M, Edahiro H, Tochigi T, Niki T. (1992). *Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete.* Katri Report N° 90: 19

Kilincarslan S, Akkurt I, Basyigit C. (2006). *The effect of barite rate on the physical and mechanical properties of concretes.* Materials Science and Engineering 2006; 424: 83-86

Kim S-C, Dong K-R, Chung W-K. (2012). *Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds.* Ann Nucl Energy 2012; 47: 1-5

Knab LI, Clifton JR, Inge JB. (1983). *Effects of maximum void size and aggregate characteristics on the strength of mortar.* Cement & Concrete Research 1983; 13: 383-390

Kollar J, Gunkel P. (1983). *Untersuchungen an LD-Schlacken, insbesondere im Hinblick auf die Verwertung in Straßenbau.* Abschlussbericht FEhS. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, EDS. EUR 10308 DE. 1986

Kou S-C, Poon C-S, Etxeberria M. (2011). *Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete.* Cement and Concrete Composites 2011; 33: 286-291

Kraemer C, Pardillo JM, Rocci S, Romana MG, Blanco VS, del Val MA. (2004). *Ingeniería de Carreteras. Vol. II.* Madrid. 2004. pp 385-397

Kuehn M. (2009). *Visionary Outlook towards Dry Quenching of Slags and Heat Recovery.* Slag Valorisation Symposium. Proceedings of the First International Slag Valorisation Symposium. Leuven, Belgium, 2009. Pp 135-142

Lauber M. (2009). *Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las probetas de hormigón.* Tesina de Especialidad. Barcelona. Universidad Politècnica de Catalunya, 2009

Lee SY, Daugherty AM, Broton DJ. (2013). *Assessing Aggregates for Radiation- Shielding Concrete.* Concrete International 2013; 35: 31-38

Losañez M. (2005). *Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil.* Tesis Doctoral. Bilbao. Universidad del País Vasco, 2005

Luxán MP. (1995). *Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, como material utilizable en la construcción. Caracterización previa de las escorias.* Informe

Técnico 16.939-II. CSIC – Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid, 1995

Luxán MP, Sotolongo R, Dorrego F, Herrero E. (2000). *Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace.* Cement and Concrete Research 2000; 30: 517-519

Machado AT, Valenzuela-Diaz FR, de Souza CAC, de Andrade LRP. (2011). *Structural ceramics made with clay and steel dust pollutants.* Applied Clay Science 2011; 51: 503-506

Mahieux PY, Aubert JE, Escadeillas G. (2009). *Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders.* Construction and Building Materials 2009; 23: 742-747

Malhotra VM, Carino NJ editors. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete.* 2ª Ed. CRC Press; Chapter 12

Mancio M. (2001). *Contribuição ao estudo do fenómeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica.* Tesis Doctoral. Porto Alegre. Universidad Federal de Río Grande del Sur, 2001

Manso Villalain JM. (2001). *Fabricación de hormigón hidráulico con escorias de horno eléctrico de arco.* Tesis Doctoral. Burgos. Universidad de Burgos, 2001

Manso JM, Polanco JA, Losañez M, González JJ. (2006). *Durability of concrete made with EAF slag as aggregate.* Cement & Concrete Composites 2006; 28: 528-534

Manso JM, Hernández D, Milagros Losañez M, González JJ. (2011). *Design and elaboration on concrete mixtures using steelmaking slags.* ACI Materials Journal 2011; 108-M72: 673-681

Maslehuddin M, Alfarabi M, Sharif MS, Ibrahim M, Barry MS. (2003). *Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes.* Construction and Building Materials 2003; 17: 105-112

Matsunaga H, Tanishiki K, Tsuzimoto K. (2009). *Environment-Friendly Block, "Ferroform", Made from Steel Slag.* JFE GIHO 2008; 19: 13-17

Mehta PK, Monteiro PJM. (1994). *Concrete. Structure, properties and materials.* Editora Pini, São Paulo, 1a. ed.

Merchant Research & Consulting Ltd. (2014). *Barite: 2014 Market Review and Forecast.* Jan 2014, 81 pp

Mills-Beale J, You Z. (2010). *The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates.* Construction and Building Materials 2010; 24: 230-235

Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports. (1995). *Utilisation des matériaux de reemploy dans les travaux routiers.* Circulaire AWAI/17895/150 du 10.07.1995. Belgium

Monteiro P. (1985). *Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties.* University of California, Berkeley

Mostofinejad D, Reisi M, Shirani A. (2012). *Mix design effective parameters on γ -ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete.* Construction and Building Materials 2012; 28: 224-229

Muhmood L, Vitta S, Venkateswaran D. (2009). *Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags.* Cement and Concrete Research 2009; 39: 102-109

Mun-Hwan L, Jong-Chan L. (2009). *Study on the cause of pop-out defects on the concrete wall and repair method.* Construction and Building Materials 2009; 23: 482-490

Murphy JN, Meadowcroft TR, Barr PV. (1997). *Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag.* Canadian Metallurgical Quarterly 1997; 36: 315-331

Neville AM. (1995). *Properties of concrete.* 4^{ta} Ed. Longman. England, 1995

Netinger I, Bjegović D, Vrhovac G. (2011). *Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete.* Materials and Structures 2011. DOI 10.1617/s11527-011-9719-8

Oliver S. (2012). *Las escorias siderúrgicas: áridos diseñados para el presente y el futuro.* Zuncho 2012; 31: 13-23

Ortiz G, Castro M, Elías X, San Martín R. (1996). *Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico.* Residuos (Bilbao) 1996; 6: 66-70

Orumwense OA, Forssberg E. (1991). *Surface and structural changes in wet ground minerals.* Powder Technology 1991; 68: 23-29

Oto B, Gür A, Kaçal MR, Doğan B, Arasoğlu A. (2013). *Photo attenuation properties of some concretes containing barite and colemanite in different rates.* Annals of Nuclear Energy 2013; 51: 120-124

Ouyang C, Naani A, Chang WF. (1988). *Internal and external sources of sulfate ions in Portland cement mortar: two types of chemical attack.* Cement and Concrete Research 1984; 14: 225-230

Papayianni I, Anastasiou E. (2010). *Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products.* Construction and Building Materials 2010; 24: 1412-1417

Paranavithana S, Mohajerani A. (2006). *Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete.* Resources Conservation & Recycling 2006; 48: 1-12

Passetto M, Baldo N. (2011). *Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag.* Construction and Building Materials 2011; 25: 3458-3468

Pellegrino C, Gaddo V. (2009). *Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slags as aggregate.* Cement & Concrete Composites 2009; 31: 663-671

Pellegrino C, Cavagnis P, Faleshini F, Brunelli K. (2012). *Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate.* Cement & Concrete Composites 2012; 37: 232-240

Perry C, Gillott JE. (1977). *The influence of mortar-aggregate bond strength on the behavior of concrete in uniaxial compression.* Cement & Concrete Research 1977; 7: 553-564

Piret J, Lesgardeur A, Delmarcelle A. (1982). *Utilisation de la scorie LD en construction routiere.* Reporte Final CRM. Commission des Communautés Européenes, EDS. EUR 7631, FR, 1982

Piret J, Willemijns K, Lete E, Chavet J. (1988). *Recherche pour une meilleure valorization du laitier de haut fourneau et de la scorie LD. Partie B: Développement d'une technique permettant de mieux connaitre la stabilité volumique de la scorie LD.* Reporte Final. Commission des Communautés Européenes, EDS. EUR 11750 FR. Luxemburgo, 1988

Polanco JA, Manso JM, Setián J, González JJ. (2011). *Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag.* ACI Materials Journal 2011; 108-M22: 196-203

Popovics S. (1975). *Verification of relationships between mechanical properties of concrete like-materials.* Matériaux et Constructions 1975; 8: 183-191

Prieto Barrio MI. (2012). *Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cemento por escorias blancas de horno de cuchara.* Tesis Doctoral. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, 2012

Proctor DM, Fehling KA, Shay EC, Wittenborn JL, Green JJ, Avent C, Bigham RD, Connolly M, Lee B, Shepker TO, Zak MA. (2000). *Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags.* Environmental Science & Technology 2000; 34: 1576-1582

Qasrawi H, Shalabi F, Ibrahim A. (2009). *Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate.* Construction and Building Materials 2009; 23: 1118-1125

Rubio AR, Carretero JG. (1991). *La aplicación de las escorias en carreteras.* Ingeniería Civil 1991; 80: 5-9

Sakr K, El-Hakim E. (2005). *Effect of high temperature or fire on heavyweight concrete properties.* Cement and Concrete Research 2005; 35: 590-596

Salihoglu G, Pinarli V, Salihoglu NK, Karaca G. (2007). *Properties of steel foundry electric arc furnace dust solidified/stabilized with Portland cement.* Journal of Environmental Management 2007; 85: 190-197

San José JT, Uría A. (2001). *Escorias de horno eléctrico en mezclas bituminosas.* Arte Cemento 2001; 1905: 122-125

Sawaddee A. (1997). *A study of properties of Portland cement containing electric furnace slag microsilica and superplasticizer.* Doctoral Thesis 1997. Thailand

Sena Rodrigues GS, Pazini Figueiredo E. (2003). *Static modulus of elasticity of concrete measured by the ultrasonic method.* Mater Constr 2003; 53: 47-58

Shaaban I, Assi N. (2011). *Measurement of the leaching rate of radionuclide ¹³⁴Cs from the solidified radioactive sources in Portland cement mixed with microsilica and barite matrixes.* Journal of Nuclear Materials 2011; 415: 132-137

Sheen Y, Wang H, Sun T. (2013). *A study of engineering properties of cement mortar with stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials.* Construction and Building Materials 2013; 40: 239-245

Shi C. (2004). *Steel slag – its production, processing, characteristics, and cementitious properties.* Journal of Materials in Civil Engineering 2004; 16: 230-236

Siddique R, de Schutter G, Noumowe A. (2009). *Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete.* Construction and Building Materials 2009; 23: 976-980

- Siddique R, Singh G. (2011).** *Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing.* Resources, Conservation and Recycling 2011; 55: 885-892
- Skalny J, Marchand J, Odler I. (2002).** *Sulfate attack on concrete.* Modern Concrete Technology: Spon Press; 2002
- Srinivas YM, Gupte KA, Rau RHG. (1987).** *Use of oxidising slag from basic arc furnace for cement concrete production.* Transactions of the Indian Institute of Metals 1987; 40: 431-433
- Thomas C, Setién J, Polanco JA, Alaejos P, Sánchez de Juan M. (2013).** *Durability of recycled aggregate concrete.* Construction and Building Materials 2013; 40:1054-1065
- Thomas GH. (1983).** *Investigations on LD slag with particular reference to its use for road construction. Final report British Steel Corporation. Commission of the European Communities. EDS. EUR 8622 EN, 1983*
- Topçu IB. (2003).** *Properties of heavyweight concrete produced with barite.* Cement and Concrete Research 2003; 33: 815-822
- Tovar-Rodríguez G, Barra M, Pialarissi S, Aponte D, Vázquez E. (2013).** *Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates.* Construction and Building Materials 2013;38: 1211-1220
- UNESID. (2013).** *IRIS 2013, Informe 2013 sobre el RECICLAJE DEL ACERO en la Industria Siderúrgica Española.* Madrid 2013.
- Vallet B, Comeau Y, Bouvrette J, Parent S. (2002).** *Dephosphatation de l'eau par des scories d'aciérie.* Biodôme de Montreal, Canada 2002
- Vázquez-Ramonich E, Barra M. (2001).** *Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción.* Materiales de Construcción 2001; 51: 137-148
- Villaverde A. (2009).** *Procesos de obtención del acero y otros productos ferrosos.* <http://adriantecnologia2.blogspot.com.es/2009/02/procesos-de-obtencion-del-acero-y-otros.html> (consulta 03/04/2012)
- Wang G, Wang Y, Gao Z. (2010).** *Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria.* Journal of Hazardous Materials 2010; 184: 555-560
- Worldsteel Association. (2014).** *Steel Statistical Yearbook 2014.* Worldsteel Committee on Economic Studies – Bruselas, 2014.

NORMATIVAS

NLT-361 (1991). *Determinación del grado de envejecimiento de escoria de acería.* Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. Ingeniería Civil. CEDEX, Madrid

NEN 7345 (1993). *Determination of the release of inorganic constituents from construction materials and stabilized waste products.* Standard Committee 390 11, Delft. Formerly draft NEN 5432

UNE 146508:1999 EX. *Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-silice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero*

UNE-EN 933-1:2012. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*

UNE-EN 932-2:1999. *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras del laboratorio*

UNE-EN 1097-2:2010. *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*

UNE-EN 1097-6:2014. *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.*

UNE-EN 1338:2004. *Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo*

UNE-EN 1339:2004 / AC: 2006. *Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo*

UNE-EN 12350-2:2009. *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*

UNE-EN 12350-6:2009. *Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad*

UNE-EN 12350-7:2010. *Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión*

UNE-EN 12390-2:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*

UNE-EN 12390-3:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*

UNE-EN 12390-6:2010. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas

UNE-EN 12390-7:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*

UNE-EN 12390-8:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*

UNE-EN 12390-13:2014. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión*

UNE-EN 12504-4:2006. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*

UNE-EN 13036-4:2012. *Características superficiales de carreteras y superficies aeroportuarias. Métodos de ensayo. Parte 4: Método para la medición de la resistencia al deslizamiento/derrape. Ensayo del péndulo.*

UNE-EN 13043:2003 (EN 13043/AC:2004). *Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas*

UNE-EN 13748-1:2005. *Baldosas de terrazo. Parte 1: Baldosas de terrazo para uso interior*

UNE-EN 13748-2:2005. *Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior*

UNE-EN 14630:2007. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína.*

ANEJO 1.

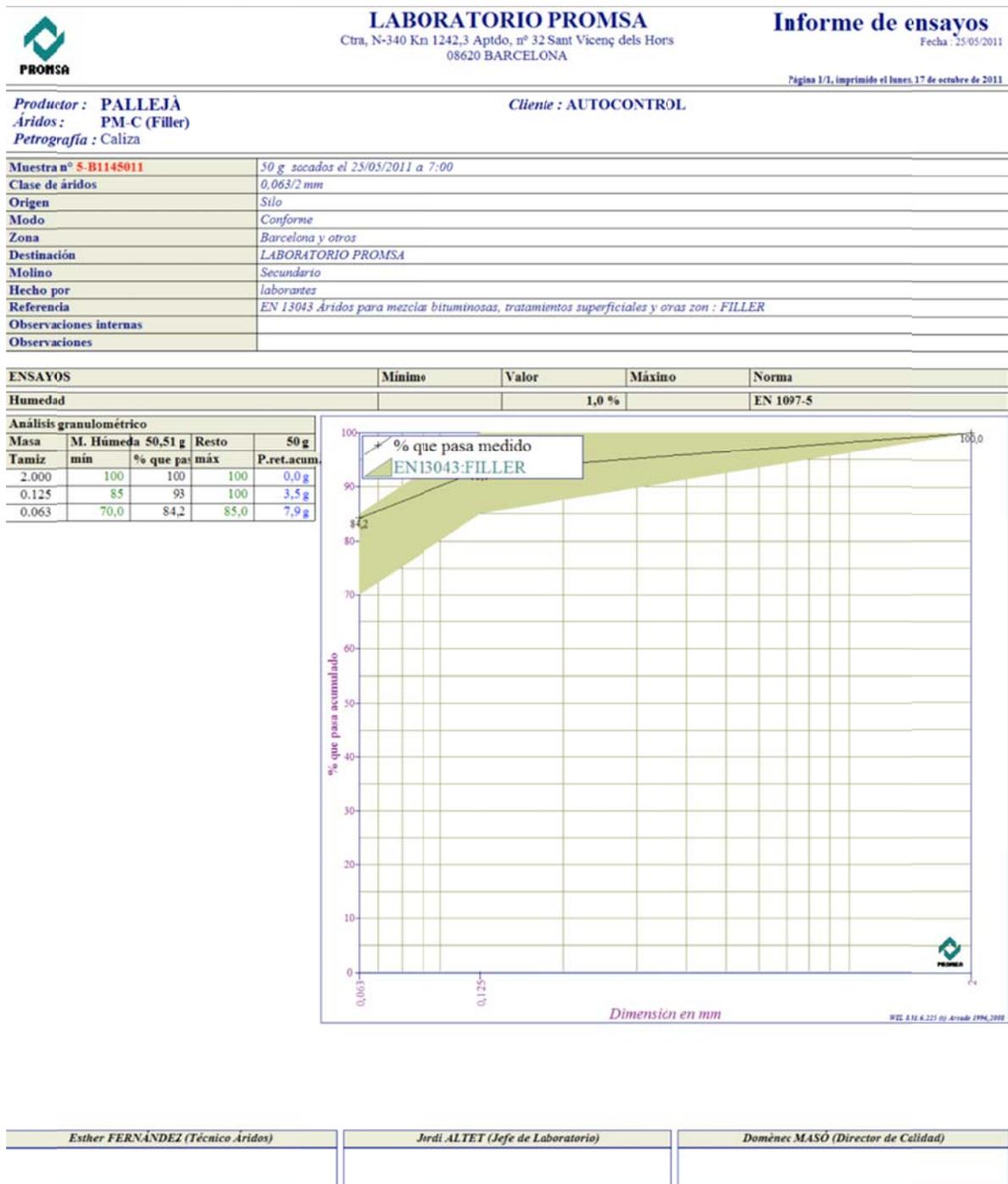
FICHA TÉCNICA DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

A1.1 INTRODUCCION

En el Capítulo 3 se estudia el comportamiento de los áridos, con el fin de determinar las características físicas, químicas y mineralógicas de los áridos siderúrgicos, calizos y baríticos. Así mismo, se analiza si los áridos siderúrgicos utilizados en la presente investigación presentan estabilidad volumétrica. Por otro lado, en el Capítulo 4, comportamiento a nivel hormigón, se dan a conocer los materiales empleados para la fabricación de los diferentes tipos de hormigones.

Es por ello que el objetivo principal de este anejo es facilitar las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes, con las especificaciones de cada material para la posible reproducción de los hormigones estudiados en la presente Tesis. Primeramente, se muestran las fichas correspondientes a los áridos y después las fichas de los aditivos utilizados en la fabricación del hormigón.

A1.2 FILLER



A1.3 ARENA 0/2 SILICEA

àrids manlleu s.a.	FITXA TÈCNICA DE CARACTERÍSTIQUES
---------------------------	------------------------------------------

ÀRIDS MANLLEU, S.A.
Ctra. C-17, Km. 68,280
08580 Les Masies de Voltregà (BCN)

Origen: Còdol Rodó
Norma: UNE-EN 13139 “Àrids per morter”



Descripció del producte i característiques requerides:

AF-T-0/2-C/G

Forma de les partícules	No aplica
Mida de les partícules (Granulometria)	0/2 mm
Contingut en fins	Categoria 4
Equivalent de sorra	≥ 40
Contingut en conquilles	No aplica
Densitat de partícules.....	2,60 g/cm ³
Absorció d'aigua	1,30 %
Durabilitat enfront al gel-desgel	No aplica
Estabilitat en volum, retracció per secat	No aplica
Solubilitat en aigua	<1%
Contingut en clorurs	0,0% Cl
Contingut en Humus	Negatiu
Contingut en àcid Fúlvic.....	No aplica
Assaig de resistència comparativa	No aplica
Sofre total	<1%
Sulfats solubles en àcid.....	AS _{0,2}
Emissions radioactives	No aplica
Alliberació de metalls pesants, carbonis poliaromàtics i altres substàncies perilloses	No aplica
Reactivitat àlcal-silice	No reactiu
Descripció petrogràfica	Àrid d'origen poligènic. Roca sedimentària i metamòrfica. -Roques metamòrfiques (74.8%) -Gneis (37.1%) -Esquist (10.6%) -Filita (10.7%) -Quarsita (10.4%) -Roques sedimentàries (25.2%) -Gres de color marró (19.1%) -Roca carbonatada de color gris-ocre (6.1%)

Data última actualització: 19-01-2011

Revisió: 4

A1.4 ARENA 0/2 CALIZA

		LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 08520 Sant Vicenç dels Horts		Documento Acompañamiento CE	
imprimido el martes, 01 de mayo de 2012					
Última revisión 02/05/2012					
					
0370 PALLEJÀ Ctra, N-340 Km 1242,3 Aptdo, nº 32 Sant Vicenç dels Horts 08620 BARCELONA					
04 0370-CPD-0262 AF-0/2 (0/2) AF-T-0/2-C					
EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Hormigón					
GRANULOMETRIA	Designación	0/2			
Granulometría	Categoría/Tolerancia	Gf 85			
Coefficiente de forma (Di<2di)	Denominación	N.A.			
Índice de lajas	Denominación	N.A.			
Contenido en finos	Valor declarado	f 20			
Equivalente de arena	Valor declarado	45 - 70			
Azul de metileno (0<2mm)	Valor declarado	N.A.			
Contenido en conchas (D<2d)	Categoría	N.A.			
Los Angeles	Categoría	N.A.			
Micro-Deval	Categoría	N.A.			
Coefficiente pulimento acelerado (capa roñadura)	Categoría	N.A.			
Coefficiente de abrasión superficial del árido	Categoría	N.A.			
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados	Categoría	N.A.			
Descripción petrográfica	Valor declarado	Caliza			
Contenido en cloruros para áridos marinos	Valor declarado	0,0002 %			
Contaminantes ligeros	Valor declarado	0,03 %			
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Categoría	AS 0,2			
Contenido total en Azufre (%S)	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple			
Contenido en carbonato cálcico	Valor declarado	N.A.			
Constituyentes que alteran el fraguado del cemento	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple			
Estabilidad en volumen. Retracción por secado	Cumple/No cumple el valor umbral	N.A.			
Reactividad álcali-carbonat	Valor declarado	No reactivo			
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (0,063-4 mm)	Valor declarado	2,68 Mg/m3	0,89 %		
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo	Categoría	MS 18			

A1.5 ARENA 0/4 CALIZA

		LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 08520 Sant Vicenç dels Horts		Documento Acompañamiento CE	
		imprimido el martes, 05 de mayo de 2012			
<i>Última revisión 02/05/2012</i>					
					
0370 PALLEJÀ Ctra, N-340 Km 1242,3 Aptdo, nº 32 Sant Vicenç dels Horts 08620 BARCELONA					
04 0370-CPD-0262 AF-T-0/4-C (0/4)					
AF-T-0/4-C					
EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Hormigón					
GRANULOMETRIA		Designación	0/4		
Granulometría		Categoría/Tolerancia	Gf 85		
Coefficiente de forma (Di<2di)		Denominación	N.A.		
Índice de lasjas		Denominación	N.A.		
Contenido en finos		Valor declarado	f 16		
Equivalente de arena		Valor declarado	68 - 75		
Azul de metileno (0<2mm)		Valor declarado	N.A.		
Contenido en conchas (D<2d)		Categoría	N.A.		
Los Angeles		Categoría	N.A.		
Micro-Deval		Categoría	N.A.		
Coefficiente pulimento acelerado (capa rodadura)		Categoría	N.A.		
Coefficiente de abrasión superficial del árido		Categoría	N.A.		
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados		Categoría	N.A.		
Contaminantes ligeros		Valor declarado	0,05 %		
Descripción petrográfica		Valor declarado	Caliza		
Contenido en cloruros para áridos marinos		Valor declarado	0,0002 %		
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)		Categoría	AS 0,2		
Contenido total en Azufre (%S)		Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple		
Contenido en carbonato cálcico		Valor declarado	N.A.		
Reactividad álcali-carbonat		Valor declarado	No reactivo		
Constituyentes que alteran el fraguado del cemento		Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple		
Estabilidad en volumen. Retracción por secado		Cumple/No cumple el valor umbral	N.A.		
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (0,063-4 mm)		Valor declarado	2,69 Mg/m ³	0,90 %	
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo		Categoría	N.A.		

A1.6 ÁRIDO 4/10 CALIZO

 LABORATORIO PROMSA		Documento Acompañamiento CE	
Ctra. N-340 Km 1242,3 08620 Sant Vicenç dels Horts		imprimido el martes, 03 de mayo de 2012	
Última revisión 02/05/2012			
CE			
0370 PALLEJÀ Ctra. N-340 Km 1242,3 Aptdo, nº 32 Sant Vicenç dels Horts 08620 BARCELONA			
04 0370-CPD-0262 AG-4/10 (4/10) AG-T-4/10-C			
EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Hormigón			
GRANULOMETRIA	Designación	4/10	
Granulometría	Categoría/Tolerancia	Gc 85/20	
Coefficiente de forma (Di<2di)	Denominación	N.A.	
Índice de lajas	Denominación	FI 10	
Contenido en finos	Valor declarado	f 4	
Equivalente de arena	Cumple/no cumple valor umbral	N.A.	
Azul de metileno (0<2mm)	Categoría	N.A.	
Contenido en conchas (D<2d)	Categoría	N.A.	
Los Angeles	Categoría	LA 30	
Micro-Deval	Categoría	N.A.	
Coefficiente pulimento acelerado (capa roñadura)	Categoría	CPA 44 (CPA = 49)	
Coefficiente de abrasión superficial del árido	Categoría	N.A.	
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados	Categoría	N.A.	
Descripción petrográfica	Valor declarado	Caliza	
Contenido en cloruros para áridos marinos	Valor declarado	0,0002 %	
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Categoría	AS 0,2	
Contaminantes ligeros	Valor declarado	0,03 %	
Contenido total en Azufre (%S)	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple	
Contenido en carbonato cálcico	Valor declarado	N.A.	
Constituyentes que alteran el fraguado del cemento	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple	
Estabilidad en volumen. Retracción por secado	Cumple/No cumple el valor umbral	N.A.	
Reactividad álcali-silice	Valor declarado	No reactivo	
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (4-31,5 mm)	Valor declarado	2,64 Mg/m ³	0,74 %
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo	Categoría	MS 18	

A1.7 ÁRIDO 10/20 CALIZO

		LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 08520 Sant Vicenç dels Horts		Documento Acompañamiento CE	
				imprimido el martes, 04 de mayo de 2012	
<i>Última revisión 02/05/2012</i>					
					
0370 PALLEJÀ Ctra, N-340 Km 1242,3 Aptdo, nº 32 Sant Vicenç dels Horts 08620 BARCELONA					
04 0370-CPD-0262 AG-10/20 (10/20) AG-T-10/20-C					
EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Homigón					
GRANULOMETRIA	Designación	10/20			
Granulometría	Categoría/Tolerancia	Gc 85/20			
Índice de lajas	Denominación	FI 10			
Contenido en finos	Valor declarado	f 4			
Equivalente de arena	Cumple/no cumple valor umbral	N.A.			
Azul de metileno (0<2mm)	Categoría	N.A.			
Contenido en conchas (D<2d)	Categoría	N.A.			
Los Angeles	Categoría	LA 30			
Micro-Deval	Categoría	N.A.			
Coefficiente pulimento acelerado (capa rodadura)	Categoría	CPA 44 (CPA = 49)			
Coefficiente de abrasión superficial del árido	Categoría	N.A.			
Resistencia a la abrasión por neumáticos claveteados	Categoría	N.A.			
Descripción petrográfica	Valor declarado	Caliza			
Contenido en cloruros para áridos marinos	Valor declarado	0,0002%			
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Categoría	AS 0,2			
Contaminantes ligeros	Valor declarado	0,05 %			
Contenido total en Azufre (%S)	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple			
Contenido en carbonato cálcico	Valor declarado	N.A.			
Constituyentes que alteran el fraguado del cemento	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple			
Estabilidad en volumen. Retracción por secado	Cumple/No cumple el valor umbral	N.A.			
Reactividad álcali-silice	Valor declarado	No reactivo			
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (4-31,5 mm)	Valor declarado	2,60 Mg/m ³	0,91 %		
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo	Categoría	MS 18			

A1.8 ARENA 0/6 SIDERÚRGICA

		LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 08520 Sant Vicenç dels Horts		Documento Acompañamiento CE	
<small>imprimido el martes, 04 de mayo de 2012</small>					
<i>Última revisión 02/05/2012</i>					
					
0370 ZARAGOZA (Arcelor) PARCELA C1-11 PARQUE TEC. DE RECICLADO LOPEZ SORIANO (INST. ARCELOR MITAL) 50013 CARTUJA BAJA-ZARAGOZA					
10 0370-CPD-0949 AF-0/6 (0/6,3) AF-T-0/6-R ÁRIDO SIDERÚRGICO EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Homigón					
GRANULOMETRIA	Designación	0/6,3			
Granulometría	Categoría/Tolerancia	GF 85			
Coefficiente de forma (Di<2di)	Denominación	N.A.			
Índice de lajas	Denominación	N.A.			
Contenido en finos	Valor declarado	f 12			
Equivalente de arena	Valor declarado	75 - 90			
Descripción petrográfica	Valor declarado	Árido Siderúrgico			
Micro-Deval	Categoría	MDE 15			
Contenido en cloruros para áridos marinos	Valor declarado	0,00 %			
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Categoría	AS 0,8			
Contaminantes ligeros	Valor declarado	0,00 %			
Determinación de la expansión (árido siderúrgico)	Categoría	N.A.			
Contenido total en Azufre (%S)	Cumple/No Cumple	S 1			
Composición	Categoría	N.A.			
Índice granulométrico envejecimiento escoria	Valor declarado	< 1%			
Desintegración por el hierro (árido siderúrgico)	Valor declarado	Estable, no desintegra.			
Constituyentes que alteran el fraguado del cemento	Cumple/No cumple el valor umbral	Cumple			
Desintegración por Silicato Bicálcico (árido siderúrgico)	Valor declarado	Estable, no desintegra.			
Reactividad álcali-silice	Valor declarado	No reactivo			
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (0,063-4 mm)	Valor declarado	3,31 Mg/m ³	2,47 %		
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo	Categoría	N.A.			
Emisión radioactividad	Cumple/No Cumple Va.or Umbral	No radiactivo			
Liberación de otras sustancias peligrosas (org. e inorg.)	Cumple/No Cumple Va.or Umbral	Cumple			
Liberación de metales pesados	Cumple/No Cumple Va.or Umbral	Cumple			
Lixiviación en materiales para carreteras	Cumple/No cumple valor umbral	Cumple			

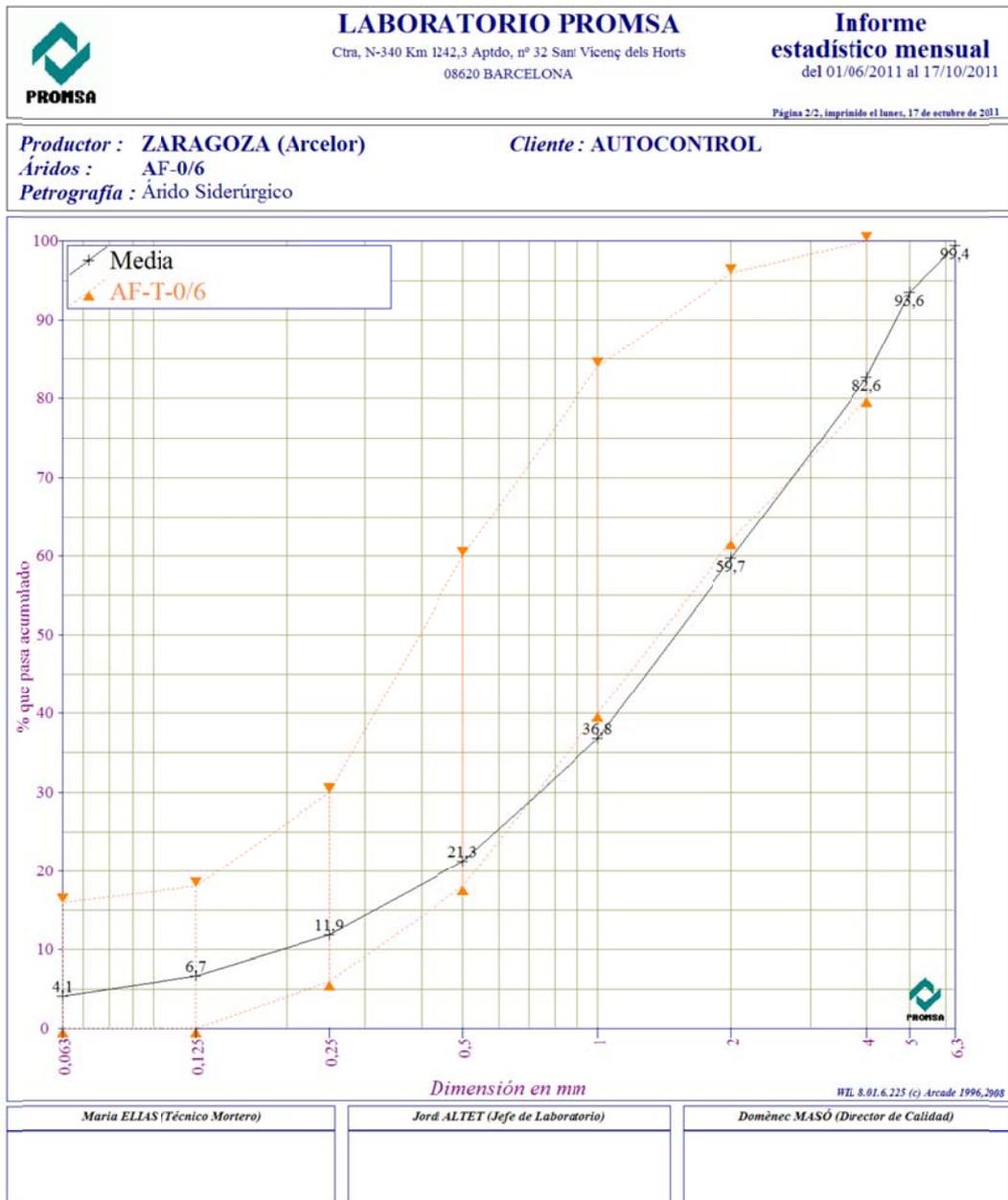
 PROMSA	LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 Apto, nº 32 Sant Vicenç dels Horts 08620 BARCELONA	Informe estadístico mensual del 01/06/2011 al 17/10/2011
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------

Página 1/1, impreso el lunes, 17 de octubre de 2011

Productor : ZARAGOZA (Arcelor) Áridos : AF-0/6 Petrografía : Árido Siderúrgico	Cliente : AUTOCONTROL
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------

CONSIGNAS														
<i>Valores especificados en los cuales el productor se compromete</i>														
Clase de áridos														Categoría
0	6,3													AF-T-0/6
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5	6,3	MF	SE	W	f
V.S.S.+U		16,00	18,00	30,00	60,00	84,00	96,00	100,00						
V.S.S.		16,00	18,00	30,00	60,00	84,00	96,00	100,00			3,4			16,0
V.S.I.		0,00	0,00	6,00	18,00	40,00	62,00	80,00			2,8	68		
V.S.I.-U		0,00	0,00	6,00	18,00	40,00	62,00	80,00						

Parte informativa															
<i>Resultados de producción</i>															
del 06/06/11 a 06/10/11															
	FaitLe	Designación Producto	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5	6,3	MF	SE	W	f
96-S-B1159019	06/06/2011	AF-0/6	4,55	7,02	11,77	19,58	32,74	53,41	78,24	90,80	99,01	4,0	89	1,1	4,5
96-S-B1166026	10/06/2011	AF-0/6	3,70	6,03	10,70	18,68	32,10	63,62	80,74	92,80	99,42	3,9	95	1,1	3,7
96-S-B1173009	17/06/2011	AF-0/6	4,98	8,78	16,98	29,85	49,07	71,71	88,48	95,61	99,51	3,3	91	0,8	5,0
96-G-B1183040	22/06/2011	AF-0/6	4,23	7,29	11,22	19,05	32,31	55,34	81,5	95,04	99,22	3,9	89	0,8	4,2
96-S-B1181013	28/06/2011	AF-0/6	5,15	8,48	15,16	25,55	41,09	62,15	83,70	93,52	99,62	3,6	90	0,8	5,1
96-S-B1187003	01/07/2011	AF-0/6	3,63	6,20	12,40	24,05	42,75	65,65	86,74	95,32	99,62	3,6	93	0,9	3,6
96-S-B1193003	05/07/2011	AF-0/6	4,65	7,79	14,06	23,46	37,89	59,45	82,41	93,35	99,62	3,7	95	1,0	4,7
96-S-B1193013	08/07/2011	AF-0/6	3,44	5,63	10,11	18,04	31,80	54,95	80,41	92,81	99,58	4,0	92	0,2	3,4
96-S-B1200013	13/07/2011	AF-0/6	4,27	7,08	13,00	22,60	37,63	60,43	84,09	93,79	99,71	3,8	91	0,7	4,3
96-S-B1202008	15/07/2011	AF-0/6	3,18	4,97	8,84	16,58	31,08	55,41	81,33	93,05	99,21	4,0	94	0,3	3,2
96-S-B1202026	20/07/2011	AF-0/6	3,13	4,93	9,19	18,01	33,93	58,01	83,49	93,93	99,53	3,9	92	0,5	3,1
96-S-B1221003	04/08/2011	AF-0/6	2,83	4,58	8,19	15,50	29,73	53,70	80,99	93,18	99,03	4,1	93	0,2	2,8
96-S-B1224012	09/08/2011	AF-0/6	2,22	3,29	6,76	18,16	38,07	62,61	83,9	93,04	99,13	3,9	92	0,1	2,2
96-S-B1235001	12/08/2011	AF-0/6	3,93	7,09	13,41	23,28	39,85	59,39	81,3	91,76	99,23	3,8	88	0,6	3,9
96-S-B1257015	13/09/2011	AF-0/6	3,54	6,12	11,20	19,62	33,11	54,35	77,40	91,00	99,23	4,0	86	0,3	3,5
96-S-B1259027	15/09/2011	AF-0/6	2,50	4,91	10,50	20,62	37,28	62,43	85,45	94,89	99,61	3,8	90	0,2	2,5
96-S-B1288026	05/10/2011	AF-0/6	5,21	8,02	12,71	21,46	35,52	57,08	82,08	94,90		3,8	76	2,3	5,2
96-G-B1283032	05/10/2011	AF-0/6	5,06	6,92	10,12	19,11	36,16	57,44	79,16	93,60	98,86	3,9	96	0,7	5,1
96-S-B1284008	06/10/2011	AF-0/6	7,92	11,98	19,50	30,69	46,44	67,92	87,43	95,45	99,70	3,4	78	1,0	7,9
Máximo			7,92	11,98	19,50	30,69	46,44	67,92	87,43	95,45	99,71	4,1	96	2,3	7,9
Xf-1,25xDesviaciones estándar			5,72	9,10	15,74	26,42	43,36	66,09	86,16	95,34	99,71	4,1	97	1,3	5,7
Media Xf			4,11	6,69	11,89	21,26	36,77	59,74	82,65	93,57	99,38	3,8	90	0,7	4,1
Xf-1,25xDesviaciones estándar			2,50	4,28	8,03	16,09	30,17	53,39	78,94	91,80	99,05	3,6	83	0,1	2,5
Mínimo			2,22	3,29	6,76	15,50	29,73	53,41	77,40	90,80	98,86	3,3	76	0,1	2,2
Desviación estándar			1,287	1,926	3,081	4,133	5,273	6,966	9,145	11,815	15,500	0,267	5,0	0,50	1,30
Número de resultados			19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Última			06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011



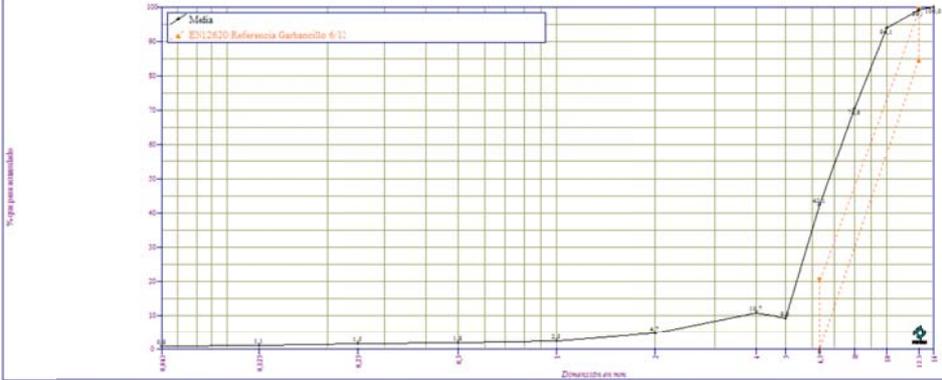
Maria ELLAS (Técnico Mortero)

Jord ALTET (Jefe de Laboratorio)

Domènec MASÓ (Director de Calidad)

A1.9 ÁRIDO 6/12 SIDERÚRGICO

		LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 08520 Sant Vicenç dels Horts		Documento Acompañamiento CE	
		<small>imprimido el martes, 04 de mayo de 2012</small>			
<small>Última revisión 02/05/2012</small>					
					
0370 ZARAGOZA (Arcelor) PARCELA C1-11 PARQUE TEC. DE RECICLADO LOPEZ SORIANO (INST. ARCELOR MITAL) 50013 CARTUJA BAJA-ZARAGOZA					
10 0370-CPD-0949 AG-6/12 (6,3/12,5) AG-T-6/12-R ÁRIDO SIDERÚRGICO EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Homigón					
GRANULOMETRIA	Designación	6,3/12,5			
Granulometría	Categoría/Tolerancia	Gc 80/20			
Índice de las	Denominación	FI 10			
Caras de fractura (D<2d)	Categoría	C 100/0			
Contenido en finos	Valor declarado	f 2			
Los Angeles	Categoría	LA 20			
Micro-Deval	Categoría	MDE 15			
Coefficiente pulimento acelerado (capa rodadura)	Categoría	CPA 59			
Descripción petrográfica	Valor declarado	Árido siderúrgico			
Contenido en cloruros para áridos marinos	Valor declarado	0,00 %			
Contaminantes ligeros	Valor declarado	0,00 %			
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Categoría	AS 0,8			
Contenido total en Azufre (%S)	Cumple/No cumple el valor umbral	S 1			
Índice granulométrico envejecimiento escoria	Valor declarado	IGE < 1 %			
Desintegración por el hierro (árido siderúrgico)	Valor declarado	Estable, no desintegra			
Desintegración por Silicato Bicálcico (árido siderúrgico)	Valor declarado	Estable, no desintegra			
Determinación de la expansión (árido siderúrgico)	Categoría	N.A.			
Reactividad álcali-silice	Valor declarado	No reactivo			
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (4-31,5 mm)	Valor declarado	3,57 Mg/m ³	0,81 %		
Composición	Categoría	N.A.			
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo	Categoría	MS 18			
Emisión radioactividad	Cumple/No Cumple Va.or umbral	No radiactivo			
Liberación de otras sustancias peligrosas (org. e inorg.)	Cumple/No Cumple Va.or umbral	Cumple			
Liberación de metales pesados	Cumple/No Cumple Va.or umbral	Cumple			
Lixiviación en materiales para carreteras	Cumple/No Cumple Va.or umbral	Cumple			

 PROMSA	LABORATORIO PROMSA Ctra, N-340 Km 1242,3 Aptdo, nº 32 Sant Vicenç dels Horts 08620 BARCELONA	Informe estadístico mensual del 01/01/2011 al 17/10/2011																																																																																																																																																																																																															
Página 1/1, imprimido el lunes, 17 de octubre de 2011																																																																																																																																																																																																																	
Productor : ZARAGOZA (Arcelor)		Cliente : AUTOCONTROL																																																																																																																																																																																																															
Áridos : AG-6/12																																																																																																																																																																																																																	
Petrografía : Árido Siderúrgico																																																																																																																																																																																																																	
CONSIGNAS <i>Valores especificados en los cuales el productor se compromete</i>																																																																																																																																																																																																																	
Clase de áridos 6,3 12,5	Norma EN 12520 Áridos para Hormigón	Categoría Referencia Garbancillo 6/12																																																																																																																																																																																																															
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="10">d</th> <th colspan="2">D</th> <th rowspan="2">COM. GRAY</th> <th rowspan="2">MG</th> <th rowspan="2">W</th> <th rowspan="2">f</th> </tr> <tr> <th>0,063</th><th>0,125</th><th>0,25</th><th>0,5</th><th>1</th><th>2</th><th>4</th><th>5</th><th>6,3</th><th>8</th><th>10</th><th>12,5</th><th>14</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V.S.S.+U</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>V.S.S.</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20</td><td></td><td></td><td>99</td><td></td><td>1,00</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>V.S.I.</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>81</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>V.S.I.-U</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table>				d										D		COM. GRAY	MG	W	f	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5	6,3	8	10	12,5	14	V.S.S.+U																		V.S.S.									20			99		1,00				V.S.I.								0				81						V.S.I.-U																																																																																																																										
	d										D		COM. GRAY	MG	W					f																																																																																																																																																																																													
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5	6,3	8	10	12,5				14																																																																																																																																																																																																	
V.S.S.+U																																																																																																																																																																																																																	
V.S.S.									20			99		1,00																																																																																																																																																																																																			
V.S.I.								0				81																																																																																																																																																																																																					
V.S.I.-U																																																																																																																																																																																																																	
Parte informativa <i>Resultados de producción</i>																																																																																																																																																																																																																	
del 17/02/11 al 13/04/11																																																																																																																																																																																																																	
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>FaltLe</th> <th>Designación Producto</th> <th>0,063</th><th>0,125</th><th>0,25</th><th>0,5</th><th>1</th><th>2</th><th>4</th><th>5</th><th>6,3</th><th>8</th><th>10</th><th>12,5</th><th>14</th> <th>COM. GRAY</th> <th>MG</th> <th>W</th> <th>f</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>96-S-B1053022</td> <td>17-02-2011 AG-6/12</td> <td>0,5</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td>9</td><td>30</td><td>62</td><td>91</td><td>99</td><td>100</td> <td></td><td>6,00</td><td>0,8</td><td>0,5</td> </tr> <tr> <td>96-G-B1110012</td> <td>13-04-2011 AG-6/12</td> <td>1,1</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>8</td><td>18</td><td></td><td>54</td><td>79</td><td>97</td><td>100</td><td></td> <td>0,11</td><td>5,67</td><td>0,8</td><td>1,1</td> </tr> <tr> <td>Máximo</td> <td></td> <td>1,1</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>8</td><td>18</td><td></td><td>54</td><td>79</td><td>97</td><td>100</td><td></td> <td></td><td>6,00</td><td>0,8</td><td>1,1</td> </tr> <tr> <td>Xf=1,64xDesviaciones estándar</td> <td></td> <td>1,5</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>6</td><td>13</td><td>27</td><td></td><td>69</td><td>90</td><td>100</td><td>100</td><td></td> <td></td><td>6,22</td><td>0,8</td><td>1,5</td> </tr> <tr> <td>Media X'</td> <td></td> <td>0,8</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>5</td><td>11</td><td>9</td><td>42</td><td>71</td><td>94</td><td>99</td><td>100</td> <td>0,11</td><td>5,84</td><td>0,8</td><td>0,8</td> </tr> <tr> <td>Xf=1,64xDesviaciones estándar</td> <td></td> <td>0,2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>15</td><td>51</td><td>87</td><td>98</td><td></td><td></td> <td></td><td>5,45</td><td>0,8</td><td>0,2</td> </tr> <tr> <td>Mínimo</td> <td></td> <td>0,5</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td></td><td>30</td><td>62</td><td>91</td><td>99</td><td></td> <td></td><td>5,67</td><td>0,8</td><td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Desviación estándar</td> <td></td> <td>0,40</td><td>0,6</td><td>0,8</td><td>1,1</td><td>2,0</td><td>4,8</td><td>10,1</td><td></td><td>16,5</td><td>12,0</td><td>4,1</td><td>1,1</td><td></td> <td></td><td>0,234</td><td>0,00</td><td>0,40</td> </tr> <tr> <td>Número de resultados</td> <td></td> <td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td> <td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td> </tr> <tr> <td>Última</td> <td></td> <td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>17-02-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>17-02-2011</td> <td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td><td>13-04-2011</td> </tr> </tbody> </table>	FaltLe	Designación Producto	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5	6,3	8	10	12,5	14	COM. GRAY	MG	W	f	96-S-B1053022	17-02-2011 AG-6/12	0,5	1	1	1	1	1	4	9	30	62	91	99	100		6,00	0,8	0,5	96-G-B1110012	13-04-2011 AG-6/12	1,1	2	2	3	4	8	18		54	79	97	100		0,11	5,67	0,8	1,1	Máximo		1,1	2	2	3	4	8	18		54	79	97	100			6,00	0,8	1,1	Xf=1,64xDesviaciones estándar		1,5	2	3	4	6	13	27		69	90	100	100			6,22	0,8	1,5	Media X'		0,8	1	1	2	2	5	11	9	42	71	94	99	100	0,11	5,84	0,8	0,8	Xf=1,64xDesviaciones estándar		0,2	0	0	0	0	0	0	15	51	87	98				5,45	0,8	0,2	Mínimo		0,5	1	1	1	1	1	4		30	62	91	99			5,67	0,8	0,5	Desviación estándar		0,40	0,6	0,8	1,1	2,0	4,8	10,1		16,5	12,0	4,1	1,1			0,234	0,00	0,40	Número de resultados		2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	Última		13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	17-02-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	17-02-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011
FaltLe	Designación Producto	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5	6,3	8	10	12,5	14	COM. GRAY	MG	W	f																																																																																																																																																																																															
96-S-B1053022	17-02-2011 AG-6/12	0,5	1	1	1	1	1	4	9	30	62	91	99	100		6,00	0,8	0,5																																																																																																																																																																																															
96-G-B1110012	13-04-2011 AG-6/12	1,1	2	2	3	4	8	18		54	79	97	100		0,11	5,67	0,8	1,1																																																																																																																																																																																															
Máximo		1,1	2	2	3	4	8	18		54	79	97	100			6,00	0,8	1,1																																																																																																																																																																																															
Xf=1,64xDesviaciones estándar		1,5	2	3	4	6	13	27		69	90	100	100			6,22	0,8	1,5																																																																																																																																																																																															
Media X'		0,8	1	1	2	2	5	11	9	42	71	94	99	100	0,11	5,84	0,8	0,8																																																																																																																																																																																															
Xf=1,64xDesviaciones estándar		0,2	0	0	0	0	0	0	15	51	87	98				5,45	0,8	0,2																																																																																																																																																																																															
Mínimo		0,5	1	1	1	1	1	4		30	62	91	99			5,67	0,8	0,5																																																																																																																																																																																															
Desviación estándar		0,40	0,6	0,8	1,1	2,0	4,8	10,1		16,5	12,0	4,1	1,1			0,234	0,00	0,40																																																																																																																																																																																															
Número de resultados		2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2																																																																																																																																																																																															
Última		13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	17-02-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	17-02-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011	13-04-2011																																																																																																																																																																																															
																																																																																																																																																																																																																	
María ELLAS (Técnico Mortero)	Jordi ALTET (Jefe de Laboratorio)	Domènec MASÓ (Director de Calidad)																																																																																																																																																																																																															

A1.10 ÁRIDO 12/20 SIDERÚRGICO

		LABORATORIO PROMSA Ctra. N-340 Km 1242,3 08520 Sant Vicenç dels Horts		Documento Acompañamiento CE	
				imprimido el martes, 05 de mayo de 2012	
Última revisión 02/05/2012					
					
0370 ZARAGOZA (Arcelor) PARCELA C1-11 PARQUE TEC. DE RECICLADO LOPEZ SORIANO (INST. ARCELOR MITAL) 50013 CARTUJA BAJA-ZARAGOZA					
10 0370-CPD-0949 AG-12/20 (12,5/20)					
AG-T-12/20-R ÁRIDO SIDERÚRGICO EN 12620 Áridos para Hormigón Áridos para Hormigón					
GRANULOMETRIA		Designación	12,5/20		
Granulometría		Categoría/Tolerancia	Gc 80/20		
Índice de lajas		Denominación	FI 10		
Caras de fractura (D<2d)		Categoría	C 100/0		
Contenido en finos		Valor declarado	f 0,5		
Los Angeles		Categoría	LA 20		
Micro-Deval		Categoría	MDE 15		
Coefficiente pulimento acelerado (capa roñadura)		Categoría	CPA 59		
Descripción petrográfica		Valor declarado	Árido siderúrgico		
Contenido en cloruros para áridos marinos		Valor declarado	0,00 %		
Contaminantes ligeros		Valor declarado	0,00 %		
Sulfatos solubles en ácido (%SO3)		Categoría	AS 0,8		
Contenido total en Azufre (%S)		Cumple/No cumple el valor umbral	S 1		
Índice granulométrico envejecimiento escoria		Valor declarado	IGE < 1 %		
Determinación de la expansión (árido siderúrgico)		Categoría	V 5		
Composición		Categoría	N.A.		
Estabilidad en volumen. Retracción por secado		Cumple/No cumple el valor umbral	N.A.		
Desintegración por el hierro (árido siderúrgico)		Valor declarado	Estable, no desintegra		
Reactividad álcali-silice		Valor declarado	No reactivo		
Desintegración por Silicato Bicálcico (árido siderúrgico)		Valor declarado	Estable, no desintegra		
Densidad de partículas y ABSORCIÓN AGUA (4-31,5 mm)		Valor declarado	3,53 Mg/m ³	1,18 %	
Resistencia a ciclos de hielo y deshielo		Categoría	MS 18		
Emisión radioactividad		Cumple/No Cumple Va.or umbral	No radiactivo		
Liberación de otras sustancias peligrosas (org. e inorg.)		Cumple/No Cumple Va.or umbral	Cumple		
Liberación de metales pesados		Cumple/No Cumple Va.or umbral	Cumple		
Lixiviación en materiales para carreteras		Cumple/No Cumple Va.or umbral	Cumple		

A1.11 ÁRIDO 0/20 BARÍTICO



Technical Data Sheet R6 \ BF 0120 \ 1 \ 01 - E7 \ VALORES ESTADÍSTICOS MEDIOS \ STATISTICAL AVERAGE VALUES

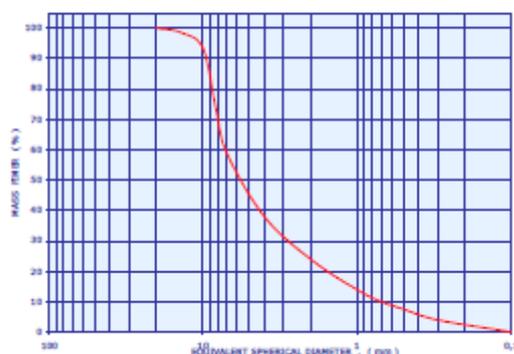
Bariflor® 0120

SULFATO DE BARIO de gran pureza utilizable como árido en hormigones de alta densidad.

BARIUM SULPHATE of high purity to be used as aggregate in high density concretes.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS / PHYSICAL AND CHEMICAL SPECIFICATIONS

Ba SO₄	96 ' 00 %	Al₂ O₃	0 ' 10 %	Fe₂ O₃	0 ' 08 %
Si O₂	2 ' 10 %	Sr O	1 ' 10 %	Ca O	0 ' 24 %
TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS		Denominación (d/D)	0/16	UNE-EN 933-1:1998	
GRANULOMETRÍA		Categoría/Tolerancia	G ₁₆₀	UNE-EN 933-2:1998	
FORMA DE LAS PARTÍCULAS		Categoría	F ₁₂₀	UNE-EN 933-3:1997	
DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS < 4 mm		Valor declarado	4,41	UNE-EN 1097-6:2001	
DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS > 4 mm		Valor declarado	4,41	UNE-EN 1097-6:2001	
LIMPIEZA (Contenido en finos)		Categoría	/3	UNE-EN 933-2:1998	
RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN DE LOS ÁRIDOS GRUESOS (LOS ANGELES)		Categoría	LA ₁₀	UNE-EN 1097-2:1999	
COMPOSICIÓN QUÍMICA		Valor declarado	Sulfato Bario		
CONTENIDO QUÍMICO (Cloruros)		Valor declarado	0,003 %	UNE-EN 1744-1:1999 Apdo. 7	
CONTENIDO QUÍMICO (Sulfatos solubles en ácido)		Categoría	A _{5,3}	UNE-EN 1744-1:1999 Apdo. 12	
CONTENIDO QUÍMICO (Azufre total)		Cumple o no cumple el valor umbral	1 % 5	UNE-EN 1744-1:1999 Apdo. 11	
CONTENIDO QUÍMICO (Substancias que alteran vel. Fraguado y endurecimiento)		Cumple o no cumple el valor umbral	+ 15 min. ; < 20 %	UNE-EN 1744-1:1999 Apdo. 15.3	
ABSORCIÓN DE AGUA		Valor declarado	0,30 %	UNE-EN 1097-6:2001	
DURABILIDAD FRENTE AL HIELO Y DESHIELO DEL ÁRIDO GRUESO		Categoría	SM ₁₅	UNE-EN 1267-2:1999	
PERDIDA AL FUEGO / IGNITION INDEX		%	0 ' 34	ISO 787 / 2	
ÍNDICE REFRACCIÓN / REFRACTION INDEX			1 ' 64		
DUREZA MOHS / MOHS HARDNESS			3		
pH			8	ISO 787 / 9	



TEL + 34 972 503 805

www.mineralsirona.com

FAX + 34 972 670 102

A1.12 ADITIVO POLIFUNCIONAL FLUIDIFICANTE (MELCRET PF-75)

Campo de aplicación

MELCRET PF75 es un aditivo polifuncional especialmente diseñado para hormigón preparado en central y obra civil. Su poder fluidificante es variable con la dosificación de aditivo, obteniendo prestaciones de aditivo plastificante/reductor de agua a baja dosificación y reducciones de agua típicas de superplastificante, con elevado mantenimiento de consistencia, a elevada dosificación.

Debido a esta alta versatilidad, MELCRET PF75 permite la fabricación de diferentes tipos de hormigones con un sólo aditivo, simplemente variando la dosificación en función del aumento de consistencia y reducción de agua deseada.

Propiedades

Aumenta la fluidez de la masa sin la necesidad de incrementar el agua de amasado.

Elevado poder plastificante.

Mejora la trabajabilidad y la docilidad del hormigón.

Gran mantenimiento de la trabajabilidad.

Aumenta las resistencias mecánicas, sobre todo a largo plazo.

Minimiza la formación de coqueas y nidos de grava.

Agiliza la puesta en obra.

Mejora la compacidad.

Mejora la durabilidad del hormigón.

Modo de utilización

MELCRET PF75 en plantas amasadoras, debe añadirse con la última porción de agua de amasado.

En el caso de mezclado en camión, deberán respetarse los tiempos mínimos para una correcta Homogeneización del aditivo. No se debe añadir el aditivo sobre la masa seca de hormigón.

Limpieza de herramientas

La limpieza de equipos y herramientas que estén impregnadas de MELCRET PF75 puede realizarse con agua preferiblemente caliente.

Dosificación

Las dosificaciones habituales de MELCRET PF75 son del 0,5% sobre peso de cemento al 1% sobre peso de cemento.

Dosificaciones superiores son posibles (con ensayos previos que verifiquen su efecto sobre el tiempo de fraguado) para la obtención de hormigones de mayores prestaciones y con prolongado tiempo de trabajabilidad.

Se recomienda siempre la realización de ensayos previos para ajustar la dosificación óptima.

Presentación

MELCRET PF75 se presenta a granel, en bidones de 220 kg y en garrafas de 25 kg.

Condiciones de almacenamiento/ Tiempo de conservación

Almacenar en lugar fresco y seco, con temperaturas superiores a 0º C. En estas condiciones, el producto puede almacenarse hasta 1 año en sus envases originales herméticamente cerrados. Evitar su congelación.

Nota: La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica. Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles a variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Las dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Manipulación y transporte

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo.

No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de seguridad del producto.

Hay que tener en cuenta

Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.

No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con nuestro Departamento Técnico. Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

Propiedades

Función principal: Plastificante / Reductor de agua.

Efecto secundario: Retrasa el fraguado a dosis elevadas.

Aspecto físico: Líquido marrón oscuro. pH, 20º C: $6,8 \pm 1$

Densidad, 20º C: $1,180 \pm 0,03$ g/cm³

Viscosidad 20º C Brookfield Sp00/100rpm: < 80 cps.

Contenido en cloruros: < 0,1%

Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados.

Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.

A1.13 ADITIVO POLICARBOXILATO SUPERPLASTIFICANTE (VISCONCRETE 5940)

Construcción

Hoja de Datos de Producto
Edición 06/10/2008
Identificación nº 2.1.17
Versión nº 1
Sika ViscoCrete® -5940

2.1.17

Sika ViscoCrete® -5940

Superplastificante de alto rendimiento para hormigones bombeables CE

Descripción del Producto Superplastificante para el bombeo de hormigones de altas prestaciones y de tercera generación. Está exento de cloruros.
(Antes Sika ViscoCrete®-5910)

Usos Se utiliza en la confección de hormigones en prefabricación, obras y en centrales de hormigón preparado, donde sea necesario el bombeo del hormigón:

- Hormigones autocompactantes (H.A.C.).
- Hormigones con una gran reducción de agua.
- Hormigones de altas prestaciones.

La importante reducción de agua unida a su elevada fluidez dan lugar a hormigones de muy altas calidades.

Ventajas

- Proporciona al hormigón una elevada bombeabilidad.
- Pronunciada aptitud de autocompactación. Se utiliza en hormigones autocompactantes.
- Reducción muy importante de agua de amasado (altas resistencias y gran impermeabilidad).
- Altas resistencias iniciales.
- Disminución de la fluencia y retracción.
- La carbonatación es mucho más lenta.

No contiene cloruros, ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto puede utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.

Ensayos

Certificados/Normas Cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN 934-2. Tablas 11.1 y 11.2: retardador / reductor / superplastificante.

Datos del Producto

Forma

Apariencia/color Líquido marrón amarillento

Presentación Contenedores de m³. Bajo pedido puede suministrarse a granel.

Almacenamiento

Condiciones de Almacenamiento/Conservación 12 meses, desde su fecha de fabricación en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados al resguardo de las heladas y de la luz directa del sol, entre +5 °C y +35 °C.

Datos Técnicos

Composición química Policarboxilato modificado en base acuosa.

Densidad Aprox. 1,09 Kg/l.

Contenido de sólidos Aprox. 37%.

Valor del pH Aprox. 5.



91
Sika ViscoCrete® -5940
1/2

ANEJO 2.

REPORTE FOTOGRÁFICO PARA EVALUAR LA CAMPAÑA DE DURABILIDAD

A2.1 INTRODUCCION

En el Capítulo 5, durabilidad de los hormigones, se identifican los posibles procesos de degradación y se realizan ensayos para su evaluación (profundidad de penetración de agua bajo presión, ciclos mojado-secado, influencia del ambiente de exposición, ciclos hielo-deshielo y lixiviación). Así mismo, se analizan y comparan los comportamientos de los hormigones siderúrgicos con el de los hormigones de referencia, convencional (calizo) y pesado (barítico).

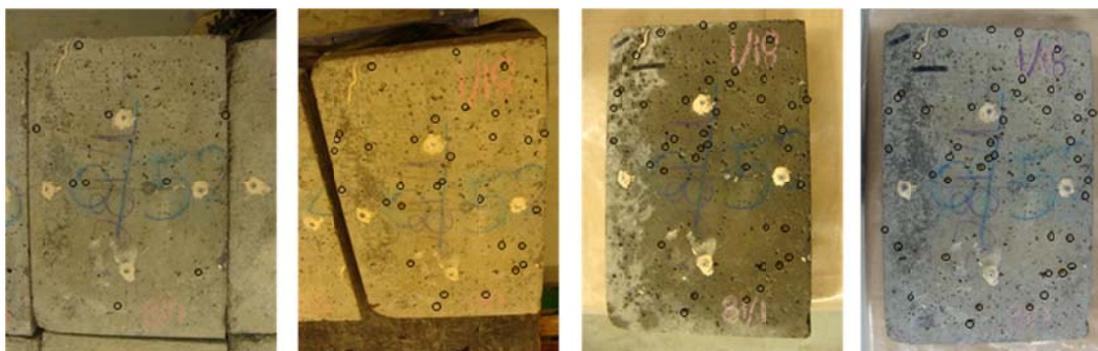
El objetivo del presente anejo es mostrar mediante un reporte fotográfico el aspecto físico de los hormigones ante algunos procesos de degradación. El primer apartado corresponde al ensayo de mojado-secado, en donde se realiza la contabilización de puntos de óxido para los hormigones siderúrgicos. En el segundo se pueden observar las probetas cúbicas partidas por la mitad una vez aplicada la fenolftaleína para el ensayo de carbonatación (influencia del ambiente de exposición). Finalmente, se muestra el aspecto de todos los hormigones en los ciclos 12 y 68 del ensayo de hielo-deshielo.

A2.2 ENSAYO MOJADO-SECADO

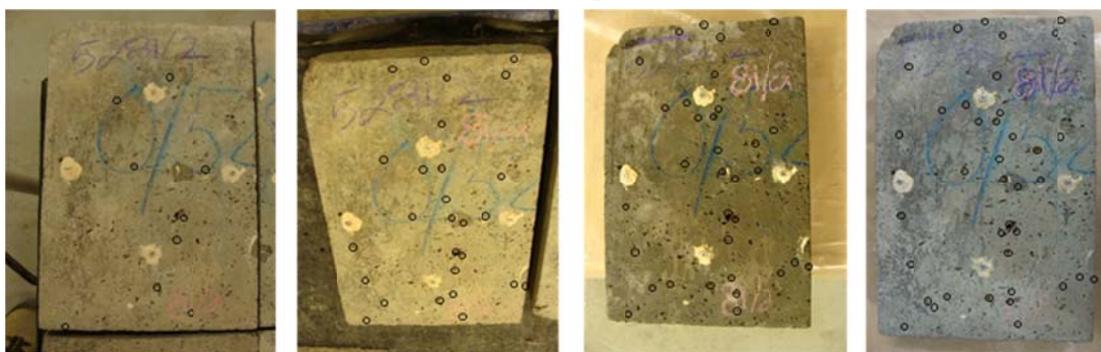
Inspección Visual

En las siguientes figuras se muestran los puntos de óxido del resto de las dosificaciones para las probetas rectangulares o losas. Al igual que en el Capítulo 5 se presentan las fotos del 1^{er} día, 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} mes.

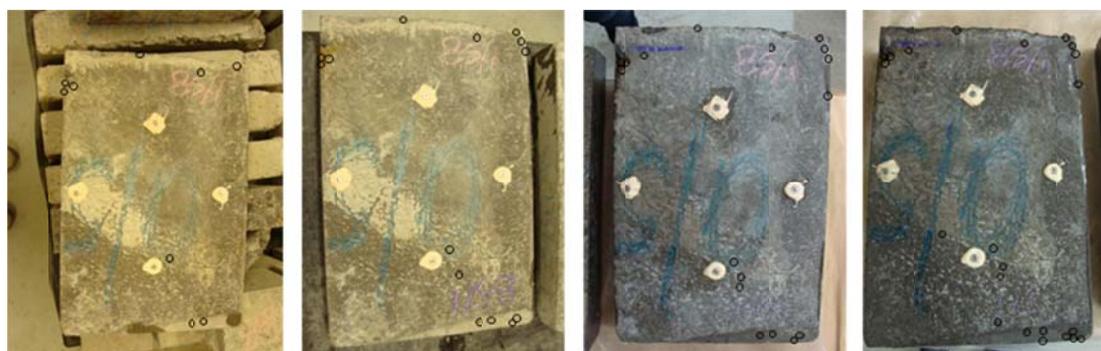
HSS1a₁



HSS1a₂



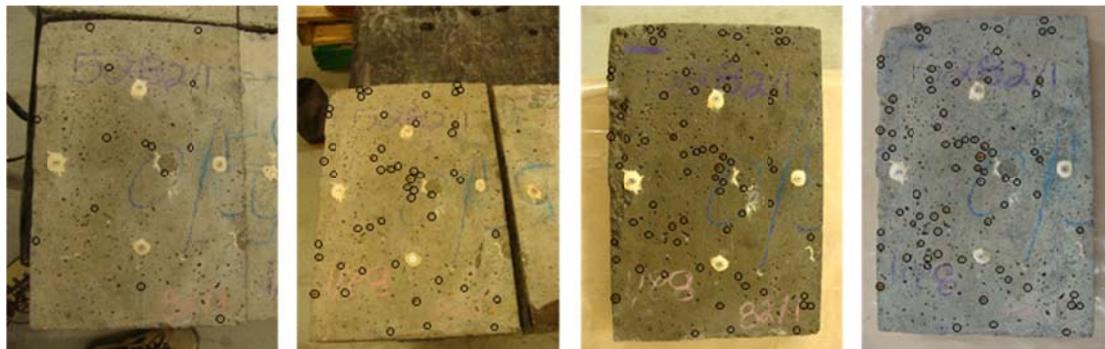
HSS1b₁



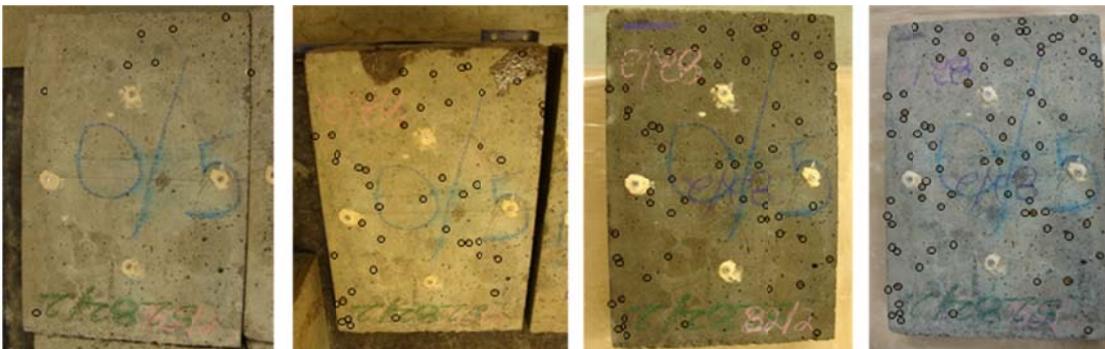
HSS1b₂



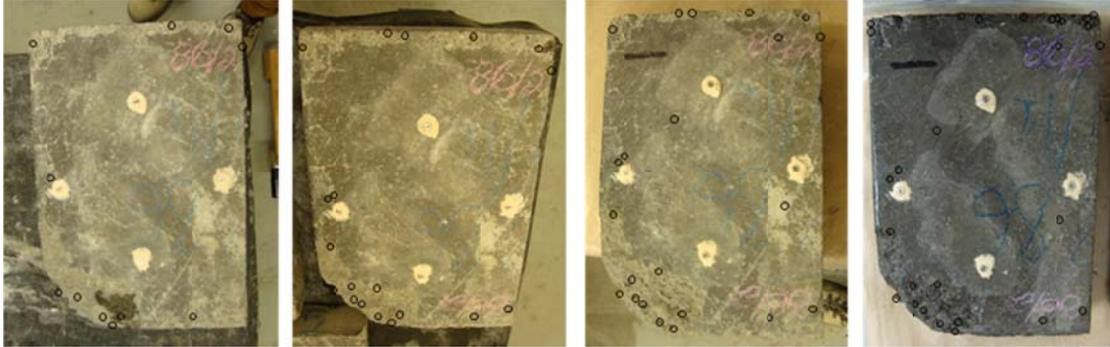
HSS2a₁



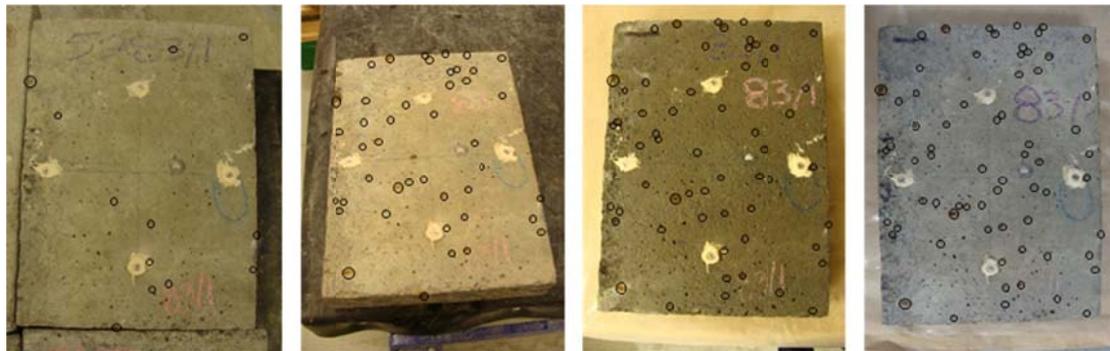
HSS2a₂



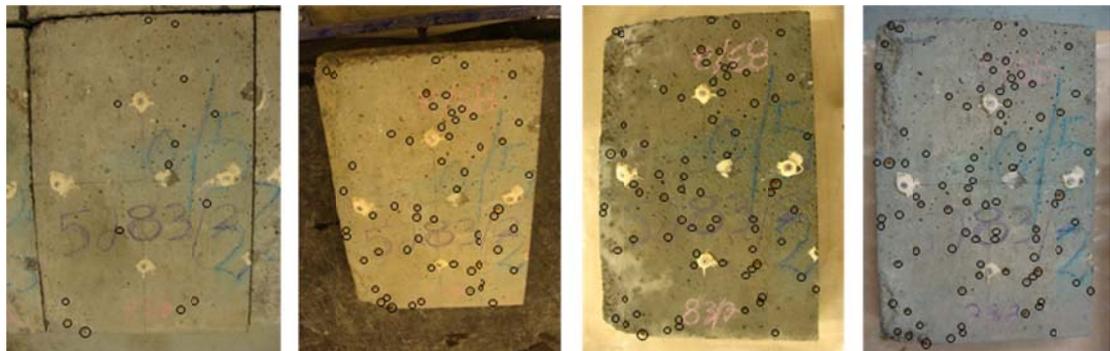
HSS2b₂



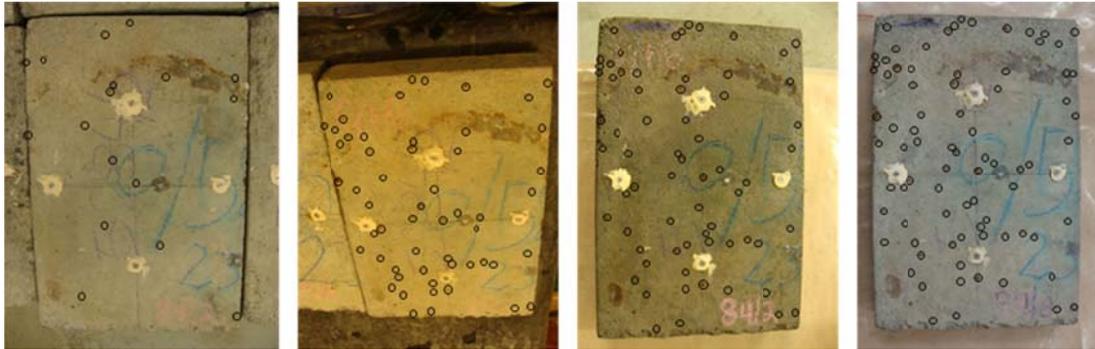
HSC1a₁



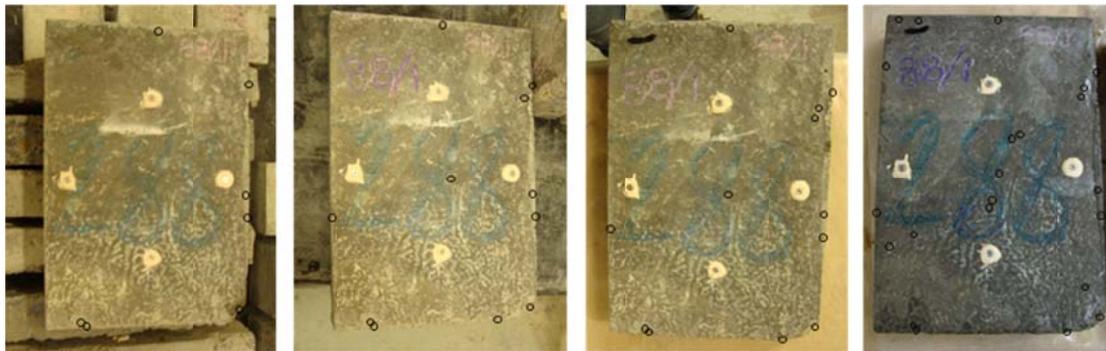
HSC1a₂



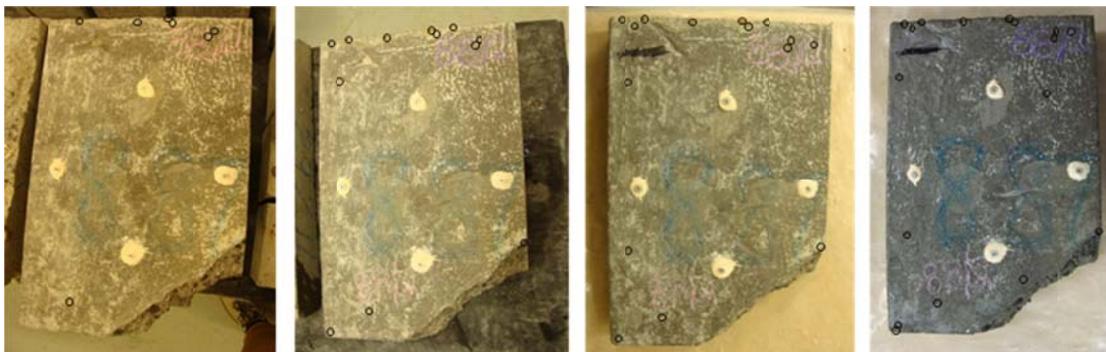
HSC2a₂



HSC2b₁



HSC2b₂



Así mismo, se exponen las figuras correspondientes a las probetas cúbicas para el conteo de puntos en dos fechas: día 1 y al 3^{er} mes.

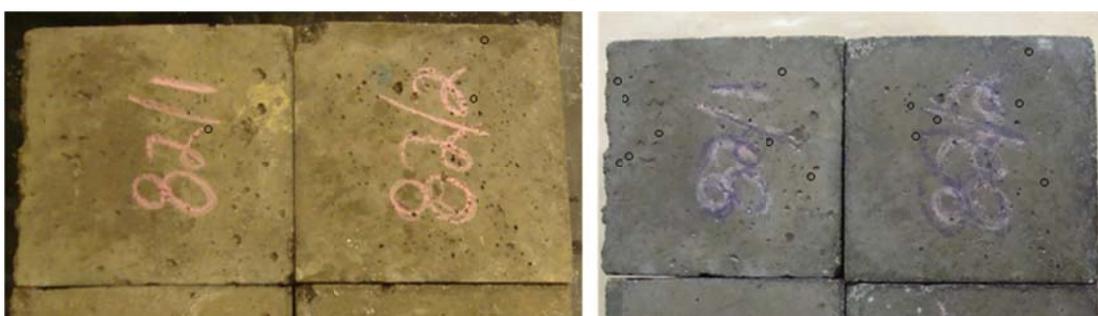
HSS1a



HSS1b



HSS2a



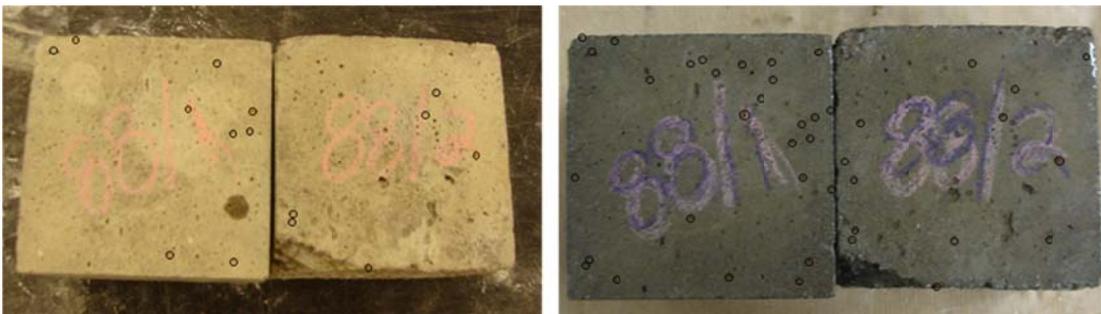
HSC1a



HSC2a

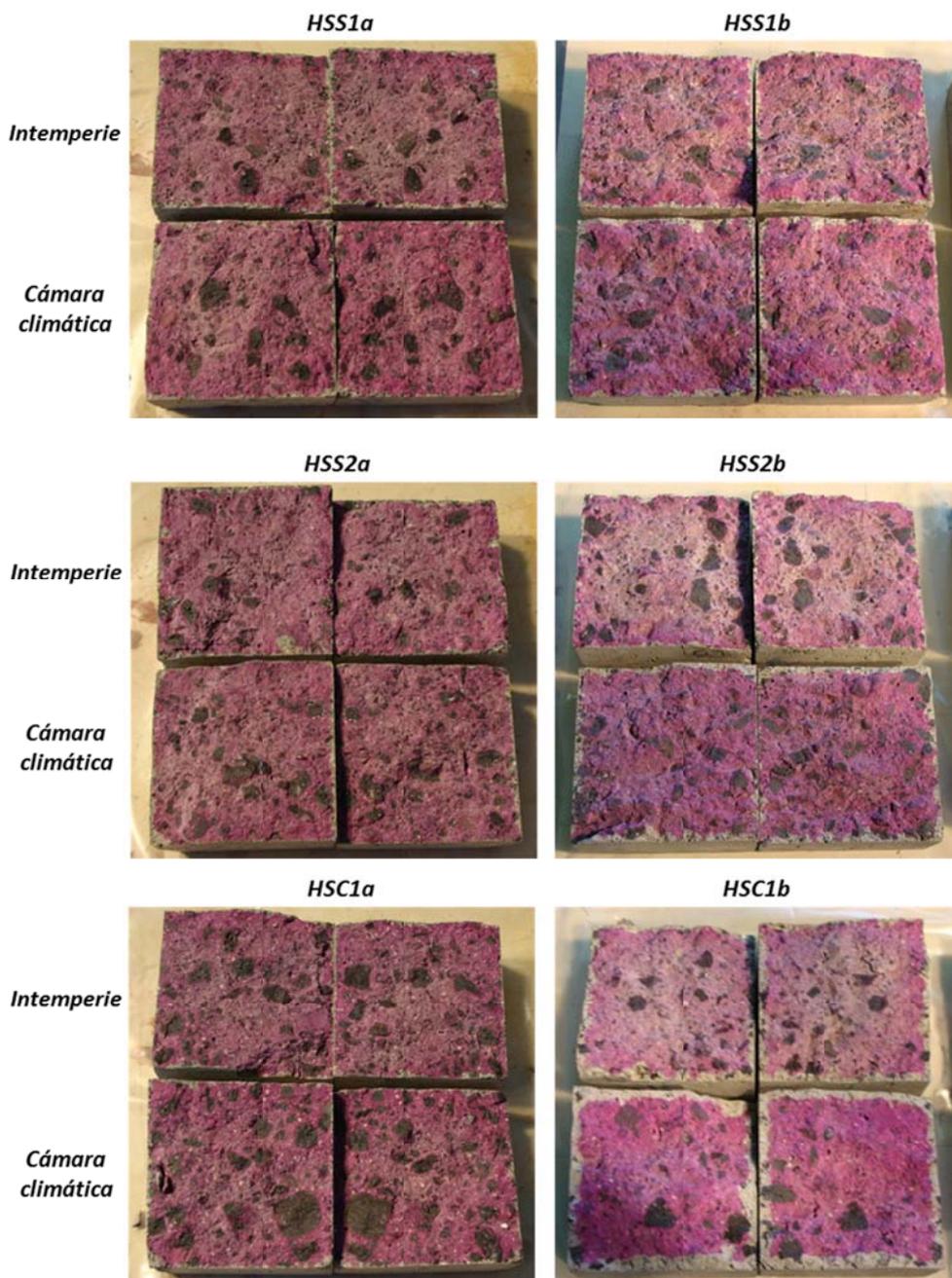


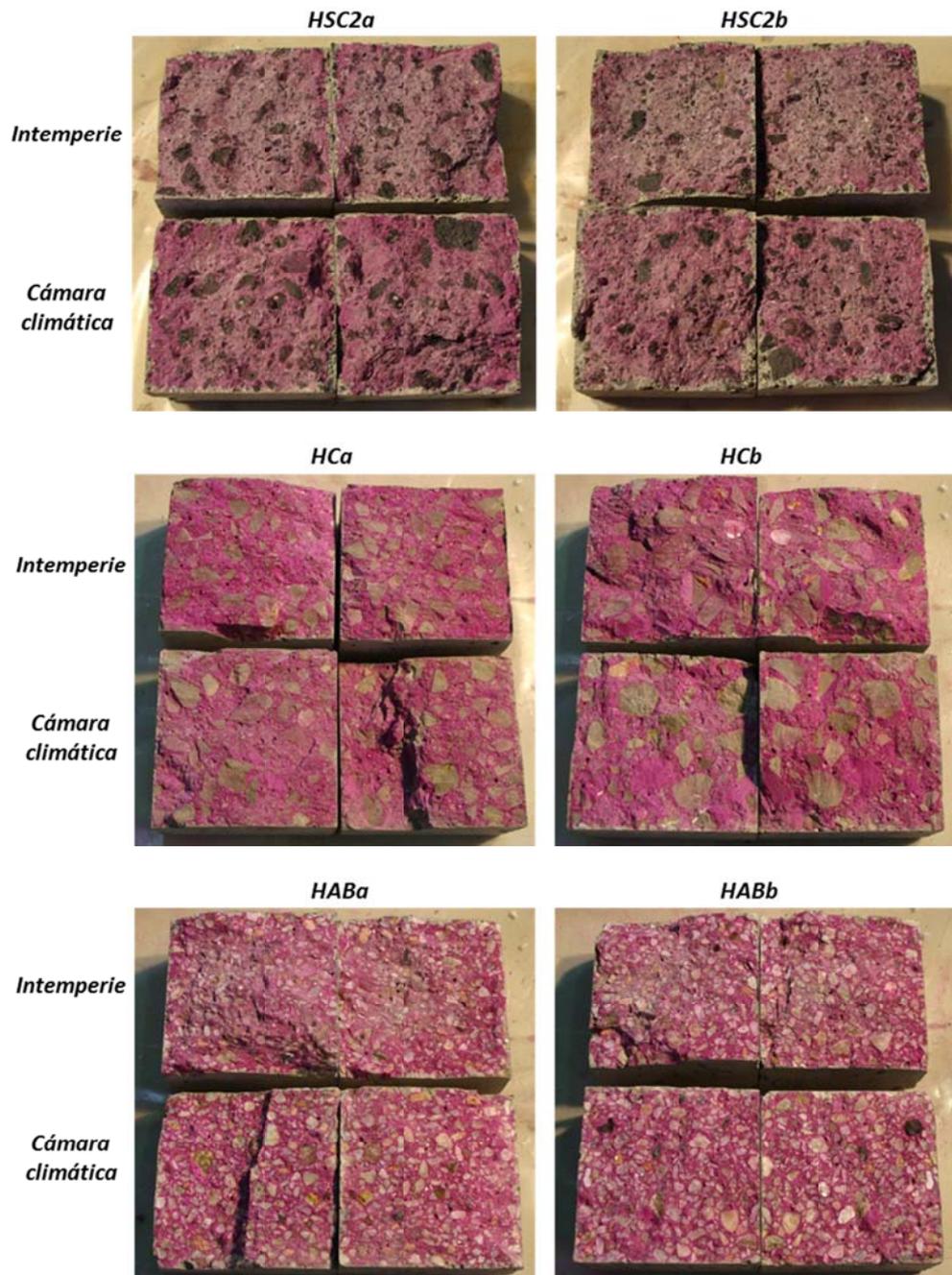
HSC2a



A2.3 INFLUENCIA DEL AMBIENTE DE EXPOSICIÓN

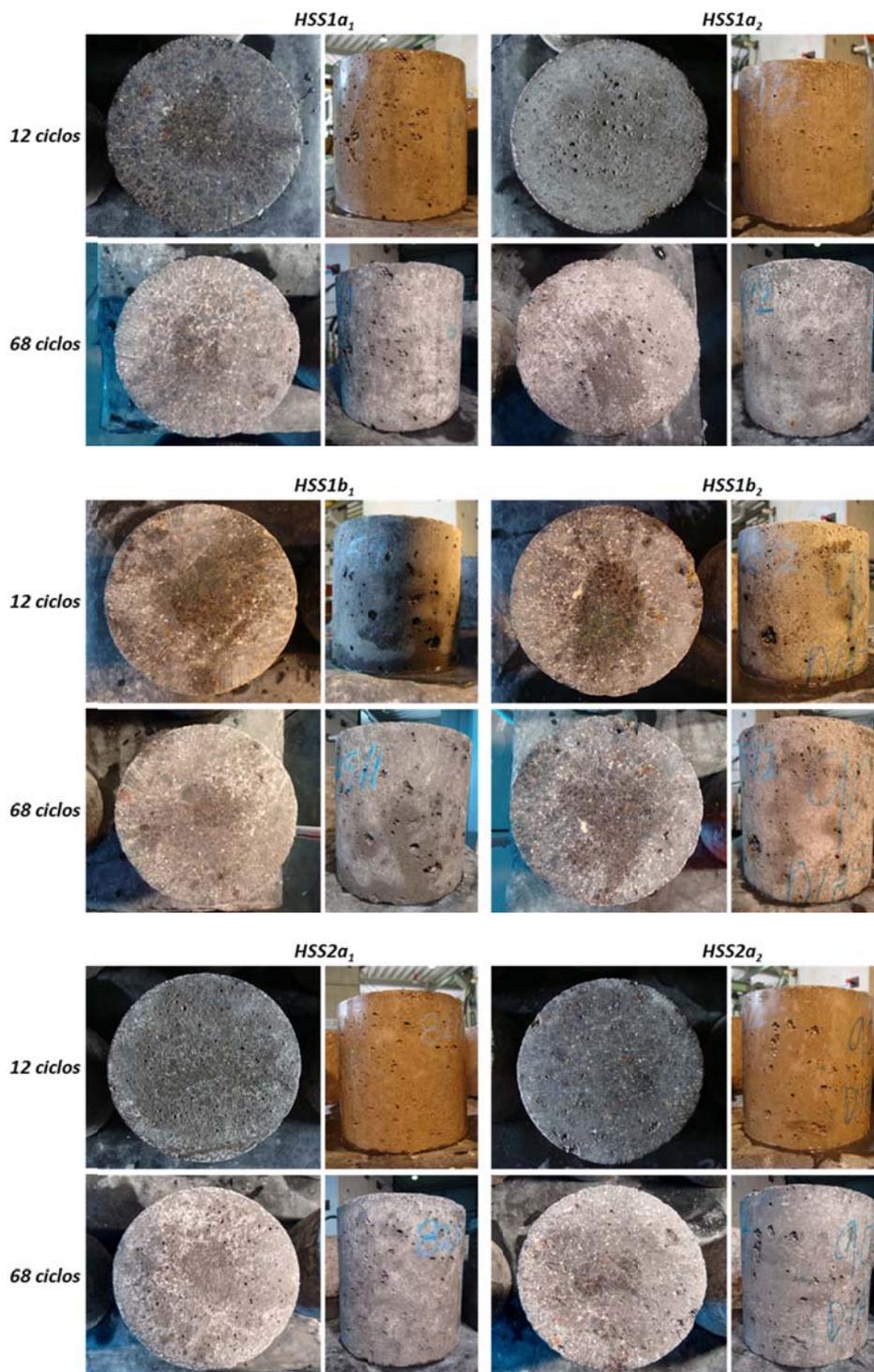
Carbonatación

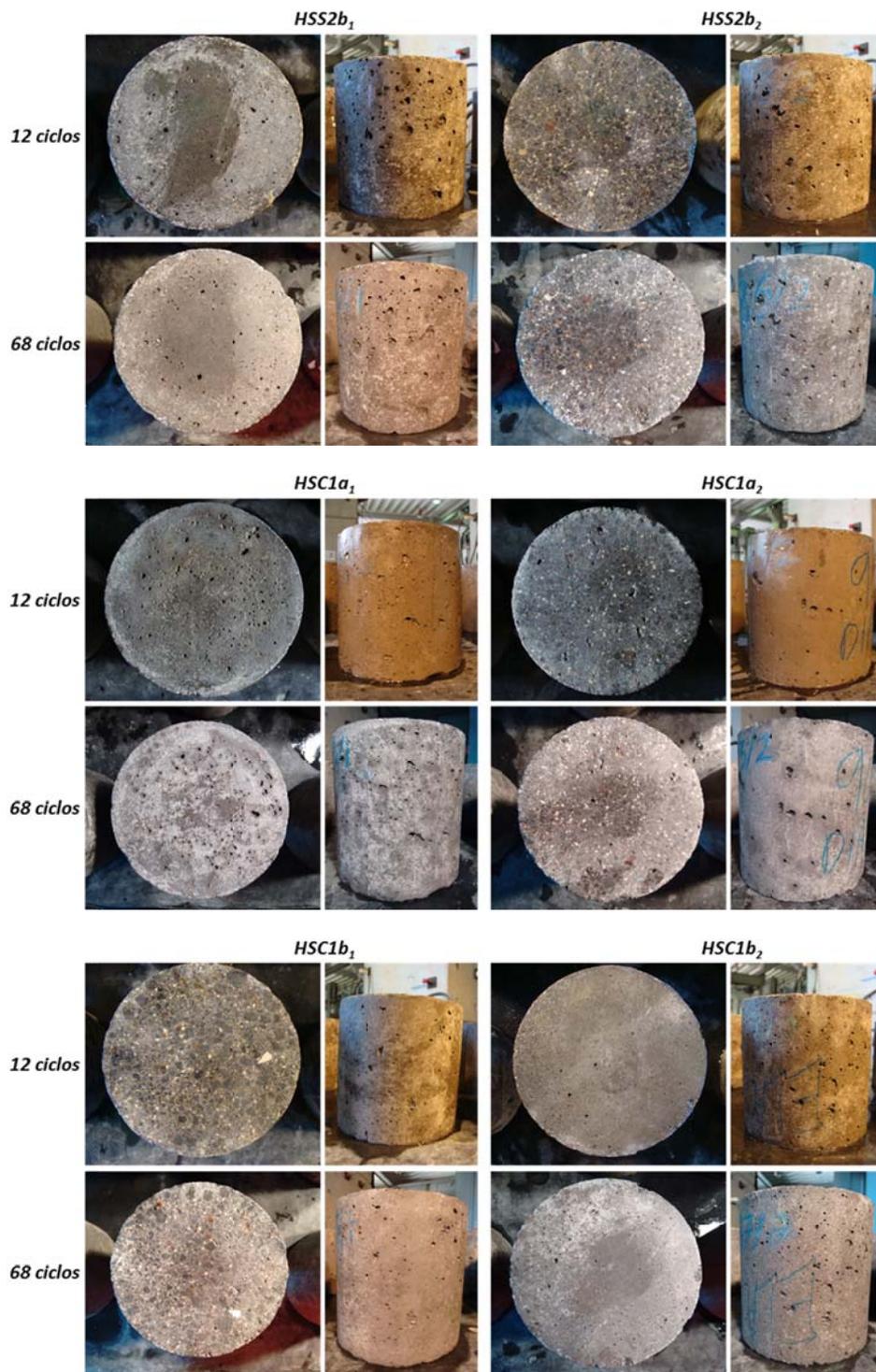


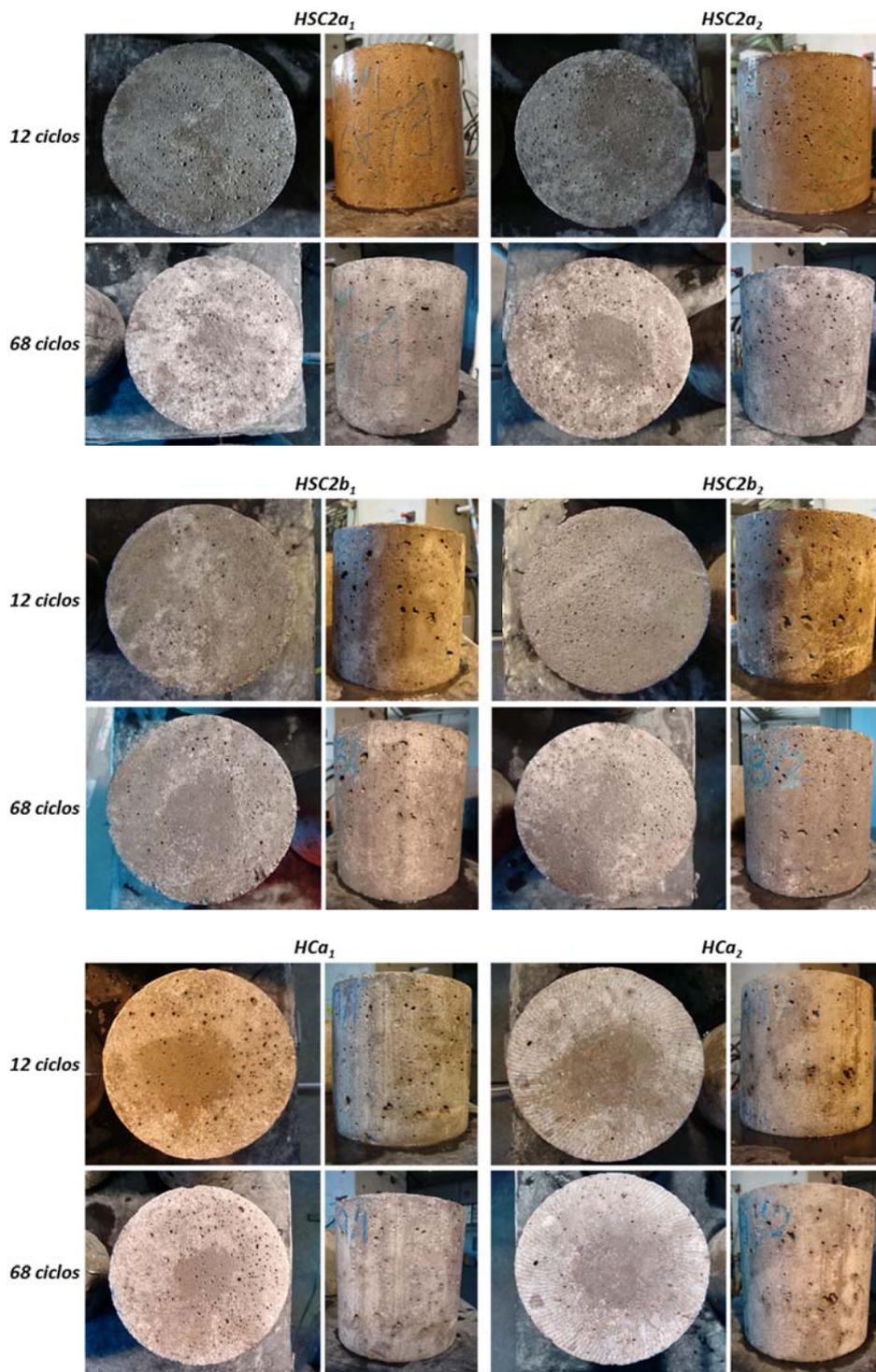


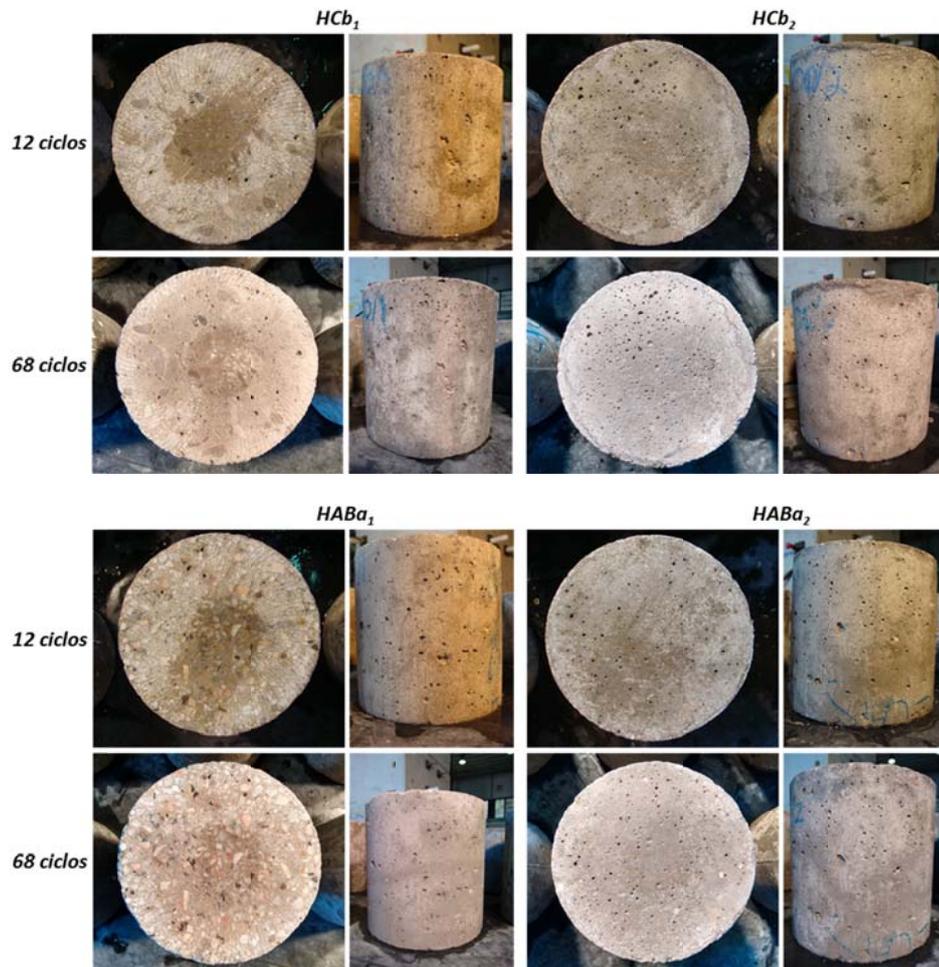
A2.4 ENSAYO HIELO-DESHIELO

Inspección Visual









PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

ARTÍCULOS

González-Ortega MA, Segura I, Cavalaro SHP, Toralles-Carbonari B, Aguado A, Andrello AC. (2014). *Radiological protection and mechanical properties of concrete with EAF steel slags.* Construction and Building Materials 2014; 51: 432-438

González-Ortega MA, Cavalaro SHP, Aguado A. (2015). *Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties concrete.* Construction and Building Materials 2015; 74: 169-175

