



**UNIVERSIDAD DE BURGOS**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS**  
**E INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO**

**TESIS DOCTORAL**

**COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN**  
**CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS (EAF)**  
**REFORZADO CON FIBRAS**

JOSÉ ANTONIO DE LA FUENTE ALONSO

Director:

Dr. D. Juan Manuel Manso Villalaín

Burgos, octubre de 2015



# Agradecimientos

---

Durante estos últimos años que me ha llevado concluir la presente Tesis Doctoral y después de un largo recorrido de trabajos, análisis y vicisitudes, quiero mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido a hacerla realidad.

A mi director de Tesis D. Juan Manuel Manso Villalaín por el apoyo incondicional tanto moral como técnico, sin el cual no hubiera sido posible llevar a buen término esta investigación.

A mis compañeros del Laboratorio de Materiales de Construcción y Construcciones Arquitectónicas, José Luis Díez Campos, Pablo Campos de la Fuente, Jorge Hernández Bagajes y José Miguel Solaguren-Beascoa y de Ingeniería Civil, Roberto Lorenzo Mateos y Antonio Fernández del Val por vuestra ayuda y colaboración en la realización de los ensayo y puesta en obra y por estar siempre dispuestos a colaborar en cuanto se os solicita.

A mis compañeros del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno por su apoyo y ánimo recibido y en especial a Isabel Santamaría Vicario y Ángel Rodríguez Sáiz por sus buenos consejos, colaboración y el interés mostrado por este trabajo.

A Alba Rodrigo Bravo por su colaboración y ayuda técnica aportada, sin la cual difícilmente hubiera sido posible llevar a buen término esta Tesis.

Mi agradecimiento también a las empresas que han contribuido generosamente suministrando materiales utilizados en la investigación, HORMOR, S.A., SYKA (COPSA), BEKAERT Y CEMENTOS ALFA.

Además, agradezco al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) la financiación de la presente investigación mediante el Proyecto BIA2014-55576-C2-1-R. y a los Fondos FEDER Europeos.

Por último, dedico este trabajo a mis seres más queridos, a mi familia, porque ellos han tenido que soportar mis cambios de temperamento, ausencias y falta de dedicación de estos años, con todo el cariño.



# Resumen

---

Ante la actual preocupación por el problema de la contaminación, del cambio climático y la búsqueda de la sostenibilidad en todos los sectores, y en particular en el sector de la construcción, se están impulsando iniciativas que conduzcan a un desarrollo sostenible, como la reutilización de residuos industriales procedentes de la fabricación del acero, de tal manera que se evite su depósito y acumulación en vertederos.

Dentro de esta filosofía surge la valorización de la escoria negra de Horno Eléctrico de Arco (EAF) para su utilización como árido en la fabricación de hormigones siderúrgicos, como sustitución de los áridos naturales, lo que supone una alternativa para reducir el excesivo consumo de recursos naturales, disminuir las emisiones y mejorar el impacto ambiental.

El objetivo principal de la presente Tesis Doctoral es la elaboración de un hormigón siderúrgico, utilizando escoria negra de horno eléctrico de arco (EAF) como sustitución de los áridos naturales, con aporte de fibras metálicas o sintéticas que sirvan de refuerzo y mejoren sus propiedades mecánicas con la finalidad de emplearlo en soleras y/o pavimentos.

Para la caracterización del hormigón se establecen cinco etapas:

En la primera de ellas, se analizan en profundidad las materias primas que conforman las mezclas objeto de estudio. Estos componentes son: áridos siderúrgicos, áridos naturales, fibras metálicas, fibras sintéticas, cemento portland, agua y aditivos.

La segunda etapa consiste en una fase experimental previa en la que se evalúa el comportamiento de un mismo tipo de hormigón siderúrgico dosificado con y sin fibras (metálicas y sintéticas). Los datos se contrastan con un hormigón patrón realizado con áridos naturales y fibras metálicas, con el fin de determinar con que dosificación de fibras se obtienen mejores resultados.

En tercer lugar, se lleva a cabo la caracterización del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, determinando sus propiedades físicas, mecánicas y microestructurales, así como sus características de resistencia al impacto, abrasión, tenacidad y módulo elástico.

La cuarta etapa comprende el estudio de la durabilidad del hormigón, y para ello se realizan los siguientes ensayos: resistencia a ciclos de hielo-deshielo, resistencia a ciclos alternantes de humedad-sequedad, estabilidad frente a los sulfatos, resistencia al CO<sub>2</sub> en cámara estanca y, por último, resistencia a atmósferas industriales.

Para finalizar, se estudia la puesta en obra de los hormigones siderúrgicos con y sin fibras, en la ejecución de losas para pavimentos. Además se analiza el comportamiento de dos tipos de acabados superficiales distintos, uno realizado con cuarzo/cemento y otro con escoria EAF/cemento en la misma proporción y granulometría. Las losas permanecen expuestas a la intemperie durante un periodo de 4 años. Posteriormente se extraen testigos para evaluar y comparar las propiedades del hormigón respecto de las probetas fabricadas en laboratorio.

La simulación de la puesta en obra del material es especialmente importante ya que permite comprobar la viabilidad práctica, funcional y de uso del hormigón como losa o pavimento.

El estudio confirma que se pueden elaborar hormigones con escoria negra EAF y fibras de refuerzo con resultados técnicamente viables para su uso en edificación y construcción.

Se concluye que los hormigones realizados con esta escoria tienen mayores resistencias que los convencionales. La incorporación de fibras de refuerzo provoca que mejoren notablemente sus características, siendo las fibras metálicas las que proporcionan mejores resultados en el hormigón siderúrgico.

Además, con la realización de las losas exteriores, se comprueba la viabilidad de la puesta en obra de este hormigón, así como la utilización de escoria negra EAF/cemento como acabado superficial, con características similares al cuarzo/cemento.

Palabras clave:

Hormigón siderúrgico, escoria negra EAF, fibras metálicas, fibras sintéticas, resistencia mecánica, durabilidad, abrasión superficial

---

# Índice

---

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	6
<b>2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....</b>	<b>11</b>
2.1. ESCORIAS SIDERÚRGICAS .....	11
2.1.1. Introducción .....	11
2.1.2. Producción de acero y escorias.....	12
2.1.3. ESCORIAS DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO .....	16
2.1.3.1. Generación .....	17
2.1.3.2. Composición química EAF .....	17
2.1.3.3. Composición mineralógica EAF .....	18
2.1.3.4. Propiedades físicas EAF .....	19
2.1.3.5. Estabilidad volumétrica .....	20
2.1.3.6. Valoración y aplicaciones.....	21
2.2. EL HORMIGÓN .....	22
2.2.1. Introducción .....	22
2.2.2. Características principales del hormigón .....	25
2.2.3. Componentes del hormigón.....	28
2.2.3.1. Conglomerante.....	28
2.2.3.2. Agua.....	28
2.2.3.3. Áridos.....	29
2.2.3.4. Aditivos .....	30
2.2.3.5. Adiciones .....	31
2.2.4. Hormigón de escoria negra .....	31

2.3. FIBRAS PARA EL REFUERZO DEL HORMIGÓN .....	38
2.3.1. Introducción .....	38
2.3.2. Aplicación de las fibras .....	40
2.3.3. Tipos de fibras .....	42
2.4. HORMIGÓN CON FIBRAS .....	45
2.4.1. Propiedades del hormigón fresco .....	47
2.4.2. Características mecánicas .....	49
<b>3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>59</b>
3.1. ÁRIDOS SIDERÚRGICOS .....	59
3.1.1. Toma de muestras .....	59
3.1.2. Caracterización morfológica .....	60
3.1.3. Caracterización química .....	62
3.1.3.1. Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	62
3.1.3.2. Combustión y detección por infrarrojos (IR) .....	63
3.1.3.3. Contenido de cal libre y magnesia .....	63
3.1.3.4. Ensayo de sulfato de magnesio .....	66
3.1.4. Caracterización mineralógica .....	67
3.1.4.1. Difracción de rayos X (XRD) .....	68
3.1.5. Caracterización microestructural .....	74
3.1.5.1. Microscopia electrónica de barrido (MEB) .....	74
3.1.5.2. Microanálisis por energía dispersa de rayos X .....	76
3.1.6. Análisis termogravimétrico (TAG) y calorimétrico (DSC) .....	81
3.1.7. Caracterización física .....	83
3.2. ÁRIDOS NATURALES .....	88
3.2.1. Grava natural silícica .....	88
3.2.1.1. Granulometrías .....	89
3.2.2. Arena natural silícica .....	90
3.2.2.1. Granulometría .....	91

---

3.2.3. Características del árido natural .....	91
3.3. FIBRAS METÁLICAS.....	92
3.4. FIBRAS SINTÉTICAS.....	94
3.5. CEMENTO PÓRTLAND .....	95
3.6. AGUA.....	97
3.7. ADITIVOS.....	99
<b>4. FASE EXPERIMENTAL PREVIA.....</b>	<b>103</b>
4.1. INTRODUCCIÓN.....	103
4.2. DOSIFICACIÓN.....	103
4.3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO .....	109
4.3.1. Amasado .....	109
4.3.2. Consistencia .....	110
4.3.3. Elaboración de probetas.....	112
4.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	114
4.4.1. Resistencia a compresión.....	114
4.4.2. Resistencia a flexión (flexotracción) .....	116
4.4.3. Tracción indirecta .....	119
4.4.4. Resistencia a la penetración de agua a presión .....	121
4.5. CONCLUSIONES FASE EXPERIMENTAL .....	124
4.5.1. Conclusiones sobre el hormigón fresco.....	124
4.5.2. Conclusiones sobre el hormigón endurecido.....	125
<b>5. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES.....</b>	<b>131</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	131
5.2. DOSIFICACIÓN.....	131
5.3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO .....	132
5.3.1. Relación A/C.....	132
5.3.2. Consistencia y docilidad .....	133
5.3.3. Densidad del hormigón fresco .....	136

5.3.4. Compactibilidad .....	138
5.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	139
5.4.1. Caracterización microestructural .....	139
5.4.2. Porosimetría de intrusión de mercurio MIP.....	145
5.4.3. Absorción de Agua por Capilaridad .....	147
5.4.4. Resistencia a compresión.....	150
5.4.5. Resistencia a flexión (flexotracción) .....	151
5.4.6. Tracción indirecta .....	152
5.4.7. Módulo de elasticidad.....	153
5.4.8. Tenacidad e índice de tenacidad.....	155
5.4.8.1. Índice de tenacidad a compresión .....	157
5.4.8.2. Índice de tenacidad y resistencia a primera fisura	159
5.4.8.3. Método Barcelona. Resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción .....	161
5.4.8.4. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (Límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual) 165	
5.4.9. Resistencia a impacto .....	168
5.4.10. Resistencia a la abrasión.....	171
5.5. CONCLUSIONES.....	172
5.5.1. Conclusiones sobre el hormigón fresco.....	172
5.5.2. Conclusiones sobre el hormigón endurecido.....	174
<b>6. DURABILIDAD.....</b>	<b>181</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	181
6.2. RESISTENCIA A CICLOS HIELO-DESHIELO .....	182
6.3. RESISTENCIA A LOS CICLOS ALTERNANTES DE HUMEDAD- SEQUEDAD .....	191
6.4. ESTABILIDAD FRENTE A LOS SULFATOS.....	195
6.5. RESISTENCIA AL CO <sub>2</sub> EN CÁMARA ESTANCA.....	199

---

6.6. RESISTENCIA A ATMÓSFERAS INDUSTRIALES (KESTERNICH) .....	205
6.7. CONCLUSIONES .....	209
<b>7. PUESTA EN OBRA.....</b>	<b>213</b>
7.1. INTRODUCCIÓN .....	213
7.2. LOSAS EXTERIORES.....	214
7.2.1. Proceso de ejecución .....	215
7.2.1.1. Fratasado superficial .....	216
7.2.2. Pruebas realizadas .....	217
7.2.2.1. Inspección visual .....	218
7.2.2.2. Resistencia a compresión .....	222
7.2.2.3. Resistencia al impacto de los testigos con diferentes acabados .....	224
7.2.2.4. Desgaste por abrasión .....	227
7.2.3. Conclusiones .....	229
<b>8. CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>233</b>
8.1. CONCLUSIONES FINALES .....	233
8.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	235
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>239</b>



**Introducción y objetivos**

# **Capítulo I**



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe en el mundo un grave problema relacionado con la contaminación y el cambio climático, y esto ha provocado que en la sociedad de hoy rija una importante y creciente sensibilización, a la vez que preocupación, por las posibles consecuencias que tiene un tratamiento incorrecto de residuos nocivos para el medio ambiente.

Esta nueva concienciación medioambiental ha provocado que se cuestione, entre otras cosas, el impacto negativo que aporta el sector de la construcción, tanto por un consumo excesivo de recursos naturales, como por la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de la construcción y demolición.

La actividad económica en países industrializados es parte esencial de la sociedad, sin embargo, existen efectos indeseados generados por esta actividad, como el aumento de la demanda de recursos naturales y la permanente producción de residuos y contaminación, que crean una situación ambiental insostenible. Esta problemática es producto del consumo desenfrenado de recursos materiales y energía. Por este motivo se deben buscar soluciones a esta situación y mantener un correcto equilibrio ambiental.

La gestión de los residuos generados por la industria es una ardua tarea, ya que el depósito de los residuos en vertederos tiene como consecuencia un notable impacto, o en su caso, la carga económica que supone su eliminación, generalmente elevada.

Como consecuencia de los problemas citados, se produce un cambio en la política ambiental, enfocada a reducir al mínimo los efectos negativos de la generación y gestión de residuos, disminuir el uso de recursos no renovables y favorecer la reutilización, reciclado y valorización de residuos.

Cada vez son más frecuentes las alternativas para reducir los niveles de contaminación y la producción de residuos, y una de estas vías consiste en la investigación de nuevos materiales que permitan la reutilización y el reciclado de los residuos procedentes de actividades industriales. Se pretende buscar una nueva utilidad a este residuo y prolongar así su ciclo de vida, lo que por otro lado se traduce en la reducción del consumo de recursos naturales.

Este es el caso de la escoria negra, un abundante sub-producto procedente de la industria del acero generado en la primera fusión de la chatarra en un horno de arco eléctrico. Son varias las utilidades que se han investigado para este residuo: se puede emplear en los firmes de carreteras, tanto en sub-bases como bases; como árido de capas granulares en coronación de explanadas, para terraplenes en la estabilización de suelos; también para ser empleado como árido de calidad en mezclas bituminosas o en el campo de la edificación y obra pública como árido en hormigones y morteros, consiguiendo minimizar la cantidad de acopio de estos residuos y sus posibles lixiviados.

Las escorias negras pueden utilizarse en la industria del cemento (en la producción de clinker o como adición) y como árido para hormigones y morteros, contribuyendo así a mejorar la eficacia del sector y reducir su impacto ambiental. (Plan Nacional Integrado de Residuos (Medio Ambiente Medio Rural y Marino 2009)).

Con esta investigación se pretende buscar una nueva aplicación al residuo de escoria negra de horno eléctrico de arco (EAF), prolongado así su ciclo de vida, lo que contribuye a reducir el impacto ambiental y una disminución de la contaminación, utilizándola como árido en la elaboración de hormigón siderúrgico (EAF) aportándole fibras de refuerzo metálicas y/o sintéticas para mejorar sus características de tenacidad, control de fisuración, resistencia a flexotracción y resistencia al impacto y abrasión.

Con este planteamiento se evita el acopio final de este residuo en el vertedero, lo que aumentaría la contaminación ambiental, se ahorra materia prima de áridos naturales y se contribuye al desarrollo de una construcción más sostenible, por lo que se justifica la presente Tesis Doctoral.

## **1.2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es la fabricación de un hormigón siderúrgico, elaborado con escoria negra de horno de arco eléctrico (EAF) como sustitución de los áridos naturales, con aporte de fibras metálicas o sintéticas que sirvan de refuerzo y mejoren sus propiedades mecánicas.

El fin último es obtener un material viable y duradero desde el punto de vista constructivo, que contribuya a mejorar la gestión de los residuos siderúrgicos y cuyas características se vean incrementadas por la acción de las fibras de refuerzo en cuanto al control de la fisuración, tenacidad,

resistencia al impacto, al desgaste, etc., para asegurar una mayor durabilidad.

En este trabajo de investigación se parte de una dosificación y granulometría previas obtenidas de otras investigaciones anteriores (Turmo, Banthia et al. 2008, Manso, Hernandez et al. 2011). Se incorporan fibras metálicas y sintéticas a este hormigón y se analizan aquellas dosificaciones que proporcionen unos resultados óptimos.

Además del objetivo general comentado, existen otros objetivos fijados en el inicio de esta investigación, los cuales se citan a continuación:

- Caracterización de las materias primas que forman parte del hormigón objeto de estudio, para conocer todas las propiedades y características de los componentes que intervienen en la formación de este nuevo material.
- Estudiar el mejor porcentaje de fibras a incorporar en el hormigón, con el propósito de obtener unos resultados óptimos en cuanto a resistencia y trabajabilidad del hormigón.
- Añadir fibras metálicas y sintéticas al hormigón con escoria negra, analizando el comportamiento del mismo con la realización de diferentes ensayos, así como la influencia de las fibras en el hormigón.
- Realizar una comparativa acerca de la incorporación de fibras metálicas y sintéticas al hormigón, a fin de concluir en qué casos es más favorable la adición de un tipo u otro de fibras.
- Caracterización del hormigón con residuo siderúrgico y fibras con el objetivo de determinar varias de sus propiedades, analizando el estado del hormigón en fresco, del hormigón endurecido y su durabilidad.
- Colocación y puesta en obra de los hormigones siderúrgicos previamente caracterizados, concretamente en la ejecución de losas para pavimentos. Además se estudia el comportamiento de un mismo hormigón con distintos acabados (cuarzo/cemento y escoria negra EAF/cemento), todo ello con el propósito de evaluar su durabilidad en elementos constructivos reales, sometidos a fenómenos atmosféricos adversos durante un periodo de tiempo de 4 años.

### **1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La presente Tesis Doctoral está compuesta por un total de 9 capítulos. A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos:

- **CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

En el primer capítulo se expone el tema objeto de la presente Tesis Doctoral, así como, la justificación de su elección, también se enumeran los objetivos generales del estudio y, por último, se define la estructura del mismo.

- **CAPITULO 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

En este apartado se hace una revisión del estado del arte, resumiendo las investigaciones previas a este estudio, tanto las que se refieren a hormigones que incorporan escoria negra, como las que añaden fibras metálicas/sintéticas.

- **CAPITULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

En él se analizan las características morfológicas, químicas, mineralógicas, microestructurales y físicas de los diferentes componentes que intervienen en la fabricación del hormigón objeto de estudio en la presente Tesis Doctoral.

- **CAPITULO 4: FASE EXPERIMENTAL PREVIA**

En este capítulo se caracterizan en estado fresco y endurecido diferentes dosificaciones de hormigón siderúrgico. Éstas se diferencian entre si fundamentalmente en el porcentaje y tipo de fibras que incorporan. La investigación continúa con las mezclas que mejores propiedades muestran en esta fase experimental previa.

- **CAPITULO 5: CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES**

En el quinto capítulo de esta Tesis Doctoral se analizan en profundidad las propiedades y características de los diferentes tipos de hormigón seleccionados en el apartado anterior.

En el hormigón en estado fresco se determinan las siguientes características: relación agua/cemento, consistencia, docilidad, densidad y compactación.

Para el hormigón endurecido, se analizan sus propiedades realizando los siguientes ensayos: microestructurales, porosimetría de intrusión de mercurio, absorción de agua, resistencias mecánicas a compresión,

tracción indirecta y flexión, módulo elástico, tenacidad y, por último, impacto y abrasión.

- CAPITULO 6: DURABILIDAD

Este apartado está enfocado a la realización de diversos ensayos de envejecimiento acelerado o de durabilidad, de tal forma que permitan conocer el comportamiento de los diferentes tipos de hormigón frente a los diversos fenómenos que influyen en la durabilidad del mismo.

- CAPITULO 7: PUESTA EN OBRA

En este capítulo se estudian las características del hormigón en un elemento constructivo real, concretamente en losas para pavimentos sometidas durante cuatro años a los efectos de los agentes climatológicos. Además, sobre estas losas se aplican diferentes acabados.

- CAPITULO 8: CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el octavo capítulo de la Tesis se recogen, de forma organizada, breve y resumida, las conclusiones generales relativas a la totalidad de la investigación.

Además, se proponen posibles vías de estudio con el fin de dar continuidad en el futuro a este trabajo de investigación.

- CAPITULO 9: BIBLIOGRAFÍA

Por último, en el capítulo de bibliografía se enumeran aquellos documentos, libros, artículos, normativa y, en definitiva, todas aquellas referencias bibliográficas citadas a lo largo de la redacción de la Tesis Doctoral.



**Estado del conocimiento**

## **Capítulo II**



## 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1. ESCORIAS SIDERÚRGICAS

#### 2.1.1. Introducción

El sector de la industria siderúrgica se ocupa de fabricar hierro, acero y fundiciones a partir de minerales naturales y/o reciclados metálicos (chatarras), proporcionando de forma intermedia o final productos metálicos. Durante estos procesos se generan diferentes tipos de residuos, tales como escorias, polvos de acería, refractarios, arena de función y cascarillas de laminación, siendo los de mayor importancia, en cuanto a volumen, las escorias.

Como escoria siderúrgica se denomina al “producto obtenido del enfriamiento y solidificación del material que sobrenada y flota sobre los caldos líquidos de las aleaciones férreas en cualquier estado intermedio o final de la fabricación”. Es un material complejo, compuesto de varios materiales más sencillos, que se encuentran también en estado mayoritariamente líquido a las temperaturas del caldo férreo, y cuya densidad es apreciablemente menor que la del propio caldo, por lo que la flotación está asegurada (Manso Villalaín 2001).

El acero se puede obtener básicamente de dos maneras; lo que se denomina proceso integral o en hornos eléctricos de arco (Imagen 2.1).

En el proceso integral existe un primer horno, denominado horno alto (Blast Furnace, BF) que se alimenta de mineral de hierro y coque. En este horno se produce arrabio (“pig iron”), el cual, a su vez, constituye la materia prima para la fabricación del acero (Ruiz-Cuevas López-Para and Ibarzabal 1988).

El arrabio tiene un alto contenido en carbono (3,5%), por lo que es un material frágil y quebradizo. Para evitar este comportamiento, el arrabio en estado líquido se trata en un segundo horno: Convertidor de oxígeno (Basic Oxygen Furnace, BOF) (Arcelormittal).

La fabricación de acero por la vía del horno eléctrico se compone de dos etapas: una primera donde se produce la fusión de las materias primas, principalmente chatarra, y el soplado con oxígeno, metalurgia primaria o proceso ácido, que se realiza en Hornos de Arco Eléctrico (Electric Arc Furnace, EAF), y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino

básico del baño fundido, que se inicia en el Horno Eléctrico con la desoxidación y finaliza en el Horno Cuchara (Ladle Furnace, LF), donde se produce la desulfuración, desgasificación y el ajuste de la composición (IHOBE 1999).

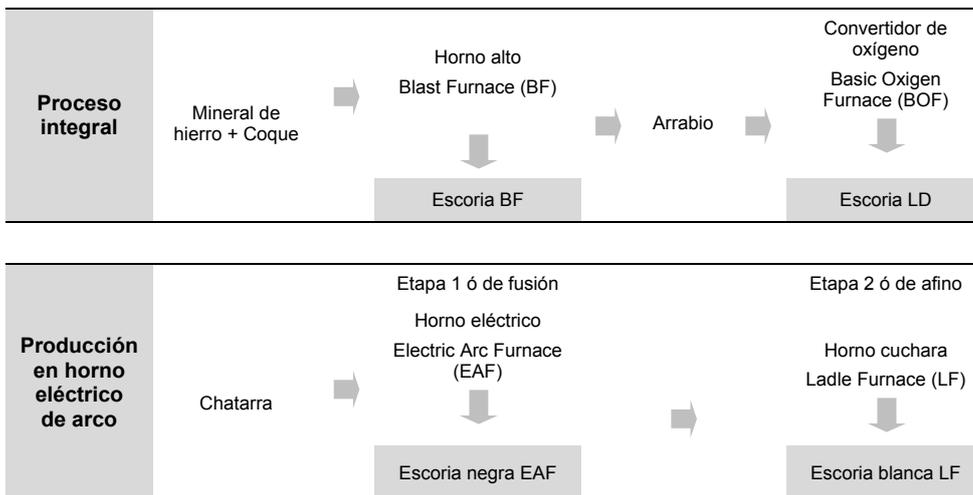


Imagen 2.1 Proceso de fabricación del acero y residuos generados

Obviamente en cada tipo de horno se generan diferentes tipos de escorias con distintas características físico-químicas (Imagen 2.1). En esta Tesis Doctoral se emplean únicamente las escorias obtenidas en los hornos eléctricos de arco, es decir, las escorias negras EAF.

### 2.1.2. Producción de acero y escorias

En 2014 la producción de acero mundial fue de 1.665 millones de toneladas, de los cuales prácticamente la mitad se elaboraron en China (822,7 millones de toneladas). La fabricación de acero en España en el año 2014 ascendió a 14,2 millones de toneladas (World-Steel-Association 2015).

A comienzos del siglo XX la producción mundial de acero era de 28 millones de toneladas y en el año 2001, de 851 millones de toneladas (UNESID 2013). Como puede observarse la producción de acero se ha duplicado en los últimos 15 años, esto implica que las escorias generadas han experimentado un crecimiento similar, de tal manera que se ha originado una descompensación en los procesos de reutilización y puesta en valor de las mismas, pasando de ser un material útil a acopiarse en vertederos.

Tan importante es conocer la cantidad de acero producido como el proceso de fabricación del mismo. Así, según Worldsteel un 73,9% del acero mundial se genera en hornos altos y convertidores de oxígeno. Por este motivo existe una amplia bibliografía a nivel mundial del uso y reutilización de las escorias generas en este tipo de hornos (escorias BF y escorias LD) (Dussart 1986, Lopez, Balcazar et al. 1995, Das, Prakash et al. 2007, Mahieux, Aubert et al. 2009, Topcu and Boga 2010, Santos, Ling et al. 2012).

En España, sin embargo, esta cifra se invierte, siendo de un 70,5% la producción de acero en hornos eléctricos de arco, es decir, en nuestro país se genera un mayor volumen de escorias EAF. Por este motivo en la investigación contenida en esta tesis se estudia su valorización, concretamente en la elaboración de hormigón con árido siderúrgico reforzado con fibras para su utilización en soleras y pavimentos. En el mismo caso que España se encuentran Italia y Grecia y, no demasiado lejos, Alemania.

<b>Producción de acero</b>		
	<b>Mundial</b>	<b>España</b>
Total (millones de toneladas)	1.665	14,2
Hornos altos+ Convertido de oxígeno	73,9%	25,6%
Hornos eléctricos de arco	29,5%	70,5%

Tabla 2.1 Producción de acero. Fuente Worldsteel

Además, la distribución de las acerías de horno eléctrico es bastante desigual en España, sólo el País Vasco cuenta con 14 de las 24 acerías que están funcionando actualmente, representando aproximadamente la mitad del acero producido (CEDEX 2013). Ver Imagen 2.2, Imagen 2.3 y Tabla 2.2 (Santamaría-Vicario 2015). Esto implica que la problemática que entraña la generación de escorias es mayor en ciertas zonas geográficas.

Así, comunidades como el País Vasco (2003), Cantabria (2006) o Cataluña (2009) han desarrollado legislación específica en materia de valoración de escorias.



Imagen 2.2 Distribución geográfica de acerías en España (Ampliación País Vasco imagen 2.3)



Imagen 2.3 Acerías de horno eléctrico ubicadas en el País Vasco

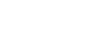
Empresa	Ubicación	Tipo de acería	
	Acerinox Europa SAU	Algeciras (Cádiz)	Acero inoxidable <a href="http://www.acerinox.es">www.acerinox.es</a>
	Acería de Álava, SA	Amurrio (Álava)	Acero inoxidable <a href="http://www.tubacex.es/">http://www.tubacex.es/</a>
	Aceros Inoxidables Olarra, SA	Loiu (Vizcaya)	Acero inoxidable <a href="http://www.olarra.com">http://www.olarra.com</a>
	Tubos Reunidos Industrial, SLU	Amurrio (Álava)	Plano, fino, especial <a href="http://www.tubosreunidos.com/">http://www.tubosreunidos.com/</a>
	Productos Tubulares, SAU	Valle de Trapaga (Vizcaya)	Plano, fino, especial <a href="http://www.tubosreunidos.com/">http://www.tubosreunidos.com/</a>
	AG Corrugados Azpeitia, SLU	Azpeitia (Guipúzcoa)	Acero al carbono común <a href="http://www.grupoag.es">http://www.grupoag.es</a>
	AG Corrugados Getafe, SL	Getafe (Madrid)	Acero al carbono común <a href="http://www.grupoag.es">http://www.grupoag.es</a>
	AG Siderúrgica Balboa, SA	Jerez de los Caballeros (Badajoz)	Acero al carbono común <a href="http://www.grupoag.es">http://www.grupoag.es</a>
	Siderúrgica Sevillana, SA	Alcalá de Guadaira (Sevilla)	Acero al carbono común <a href="http://www.siderurgicasevillana.com/es/">http://www.siderurgicasevillana.com/es/</a>
	Megasa Siderúrgica, SL	Narón (La Coruña)	Acero al carbono común <a href="http://www.sostenibilidadsiderurgica.com/index.php/fabricas-con-marca-lista/98-megasa-siderurgica-s-l">http://www.sostenibilidadsiderurgica.com/index.php/fabricas-con-marca-lista/98-megasa-siderurgica-s-l</a>
	Global Steel Wire, SA	Santander (Cantabria)	Acero al carbono común <a href="http://www.celsagroup.com/">http://www.celsagroup.com/</a>
	Nervacero, SA	Valle de Trapaga (Vizcaya)	Acero al carbono común <a href="http://www.celsagroup.com/">http://www.celsagroup.com/</a>
	CELSA Compañía Española de Laminación, SL	Castellbisbal (Barcelona)	Acero al carbono común <a href="http://www.celsagroup.com/">http://www.celsagroup.com/</a>
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Basauri (Vizcaya)	Plano, fino, especial <a href="http://www.gerdau.es/">http://www.gerdau.es/</a>
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Azcoitia (Guipúzcoa)	Acero al carbono común <a href="http://www.gerdau.es/">http://www.gerdau.es/</a>
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Legazpi (Guipúzcoa)	Acero al carbono común <a href="http://www.gerdau.es/">http://www.gerdau.es/</a>
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Reinosa (Cantabria)	Plano, fino, especial <a href="http://www.gerdau.es/">http://www.gerdau.es/</a>
	CAF	Beasain (Guipúzcoa)	Plano, fino, especial <a href="http://www.caf.es/">http://www.caf.es/</a>
	Arcelor Mittal Madrid	Madrid (Madrid)	Acero al carbono común <a href="http://spain.arcelormittal.com/">http://spain.arcelormittal.com/</a>
	Arcelor Mittal Olaberria	Olaberria (Guipúzcoa)	Acero al carbono común <a href="http://spain.arcelormittal.com/">http://spain.arcelormittal.com/</a>
	Arcelor Mittal Zumarraga	Zumarraga (Guipúzcoa)	Acero al carbono común <a href="http://spain.arcelormittal.com/">http://spain.arcelormittal.com/</a>
	Arcelor Mittal (AHB Bergara)	Bergara (Guipúzcoa)	Acero al carbono común <a href="http://spain.arcelormittal.com/">http://spain.arcelormittal.com/</a>
	Arcelor Mittal Sestao (ACB Sestao)	Sestao (Vizcaya)	Plano, fino, especial <a href="http://spain.arcelormittal.com/">http://spain.arcelormittal.com/</a>
	Arcelor Mittal Zaragoza	Zaragoza (Zaragoza)	Acero al carbono común <a href="http://spain.arcelormittal.com/">http://spain.arcelormittal.com/</a>

Tabla 2.2 Acerías de horno eléctrico de arco en España

### 2.1.3. ESCORIAS DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO

Como ya se ha comentado, la escoria negra es un residuo procedente de la primera etapa o etapa de fusión de las materias primas, que se realiza en hornos eléctricos de arco.

Éstos son habitualmente cilíndricos y se encuentran envueltos en material refractario. La materia prima principal utilizada en estos hornos es la chatarra férrica que se introduce en el horno por la bóveda móvil situada en la parte superior. Como elementos auxiliares se pueden cargar también pequeñas cantidades de fundición, pre-reducidos de hierro y de ferroaleaciones. De igual forma, se añaden materiales formadores de escoria, que protegen el revestimiento refractario del horno y que están constituidos en su mayor parte por cal, sílice, magnesia y alúmina (IHOBE 1999).

Una vez llenado y cerrado el horno, se hace saltar el arco eléctrico y comienza la etapa de fusión y metalurgia ácida. Ésta incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso, silicio y cromo, la defosforación y la formación de escoria espumante, en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las **escorias negras (EAF)** (IHOBE 1999).

Tras la extracción de la escoria del horno, su enfriamiento puede hacerse de diferentes formas (CEDEX 2013):

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. Presenta un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.
- Se puede verter en un Cono de Fundición que se coloca debajo de la piqueta del Horno Eléctrico de Arco. La escoria comienza a enfriarse en el cono y, posteriormente, se vierte en una fosa donde completa su total enfriamiento. El material resultante es menos poroso que el anterior y más cristalino.
- Se vierte en un Cono de Fundición que se deja enfriar. En este caso el enfriamiento es el más lento y, una vez fría, se saca del cono. La escoria obtenida es muy compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.

### 2.1.3.1. Generación

Según queda recogido en la bibliografía consultada la generación de escorias negras EAF es de 140-170 kg por tonelada de acero producido. (Amaral de Lima 1999, IHOBE 1999, Manso Villalaín 2001, Losáñez González 2005).

Con este dato, y teniendo en cuenta los datos anteriores de producción de acero y sistema de producción, se estima de manera orientativa la cantidad total de escoria negra generada en España en 2014 (Tabla 2.3).

Acero (miles de tn)	Producción en hornos eléctricos: 70,5%	EAF slag (tn) 140-170 kg/tn
14.200	10.011	1.551.705

Tabla 2.3 Generación de escorias negras EAF en España en 2014

### 2.1.3.2. Composición química EAF

La composición química y mineralógica de la escoria negra EAF formadas en los procesos de fabricación del acero es similar (Yildirim and Prezzi 2011), conteniendo esencialmente hierro, sílice y calcio (Vázquez and Barra 2001).

En 2011 los autores Yildirim, I.Z. & Prezzi, M (Yildirim and Prezzi 2011) publicaron un artículo que recoge una recopilación de las distintas composiciones químicas de las escorias investigadas por varios autores recientemente, y que queda reflejada en la Tabla 2.4.

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>total</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO <sub>libre</sub>
(Barra, Ramonich et al. 2001)	29.5	16.1	7.6	5.0	-	32.56	-	0.6	4.5	0.78	0.6	-
(Luxán, Sotolongo et al. 2000)	24.4	15.4	12.2	2.9	34.4	-	-	-	5.6	0.56	1.2	-
(Manso, Polanco et al. 2006)	23.9	15.3	7.4	5.1	-	-	42.5	0.1	4.5	-	-	0.5
(Shi 2004)	35-60	9-20	2-9	5-15	15-30	-	-	0.1-0.2	3-8	-	0.0-0.3	-
(Tossavainen, Engstrom et al. 2007)	38.8	14.1	6.7	3.9	5.6	20.3	-	-	5	-	-	-
(Tsakiridis, Papadimitriou et al. 2008)	35.7	17.5	6.3	6.5	-	36.4	-	-	2.5	0.8	-	-

Tabla 2.4 Composición química escoria negra EAF (Yildirim 2011)

En la Tabla 2.4 se comprueba que las escorias negras se componen principalmente de óxidos de calcio, óxidos de hierro y silicio, aproximadamente un 80% de su composición total.

En el caso concreto de las escorias estudiadas en España y recogidas en el Catálogo de Residuos utilizables en construcción; Escorias de acería de horno eléctrico de arco eléctrico, procedentes del estudio de varios autores (IHOB 1999, Etxeberria, Pacheco et al. 2010, Rubio, Contreras et al. 2011), se han obtenido las composiciones químicas que se recogen en la Tabla 2.5.

CaO	22-60 %
SiO <sub>2</sub>	11-37 %
FeO	0,5-4 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38 %
MgO	4-12 %
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-8 %
TiO <sub>2</sub>	0,6-2 %
MnO	1-4 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-8 %
P <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0-0,02 %

Tabla 2.5 Composición química de la escoria negra en España (Cedex 2013)

### 2.1.3.3. Composición mineralógica EAF

La composición mineralógica estudiada por Vázquez y Barra (Vázquez and Barra 2001) es la recogida en la Tabla 2.6. En otros estudios se observan importantes concentraciones de silicato bicálcico, cal libre, wüstita, espinela, ferrita dicálcica y fases magnéticas (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). (Smolczyk 1980, Luxán 1995).

Óxidos de hierro		Silicatos		Compuestos de calcio y magnesio	
FeO	Wuesita	2CaO·SiO <sub>2</sub>	Larnita	(Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandita
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita	CaMg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Merwinita	CaCO <sub>3</sub>	Calcita
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetita	Ca <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> SiO <sub>7</sub>	Gelenita	Eventualmente:	
		MgSiO <sub>3</sub>	Clioenstatita	CaO	Cal libre
		(Ca,Fe,Mg)2SiO <sub>4</sub>	Bredigita	MgO	Periclasa

Tabla 2.6 Composición mineralógica de la escoria negra EAF

En el artículo antes mencionado de los autores Yildirim y Prezzi, también quedan recogidas las composiciones mineralógicas de las escorias analizadas por varios autores a lo largo de los últimos años. (Tabla 2.7).

Las escorias negras tienen importantes concentraciones de óxido de hierro, una de cuyas fases minerales es la wüstita (FeO) (Geiseler 1996).

Fases minerales	
Barra 2001	CaCO <sub>3</sub> , FeO, MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ca <sub>2</sub> Al(AlSiO <sub>7</sub> ), Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Geiseler 1996	2CaO·SiO <sub>2</sub> , 3CaO·SiO <sub>2</sub> , 2CaO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, (Ca, Fe)O (calciowusita), (Mg, Fe)O (Magnesiowusita), MgO, CaO
Luxan 2000	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> , Ca <sub>2</sub> Al(AlSiO <sub>7</sub> ), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ca <sub>14</sub> Mg <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>8</sub> , MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , MnO <sub>2</sub>
(Nicolae, Vilciu et al. 2007)	MnO <sub>2</sub> , MnO, Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , Fe <sub>7</sub> SiO <sub>10</sub>
(Qian, Sun et al. 2002)	γ-Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub> , CFMS, FeO-MnO-MgO solid solution
Tossavainen 2007	Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , β-Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , Spinel solid solution (Mg,Mn) (Cr,Al) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , wustite-type solid solution ((Fe,Mg,Mn)O), Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Tsakiridis 2008	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ca <sub>2</sub> Al(AlSiO <sub>7</sub> ), Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , 2CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub> , FeO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub>

Tabla 2.7 Composición mineralógica de la escoria negra EAF

#### 2.1.3.4. Propiedades físicas EAF

Los áridos siderúrgicos procedentes de las escorias negras de acerías de hornos eléctricos de arco tienen una elevada densidad, entre 3100 y 4500 kg/m<sup>3</sup>, muy por encima de la de los áridos naturales (IHOBE 1999, Etxeberria, Pacheco et al. 2010).

El catálogo de residuos utilizables en construcción, publicado por el Cedex recoge las propiedades físicas y mecánicas de las escorias negras de horno eléctrico de arco EAF estudiadas en España y expuestas en Tabla 2.8.

Propiedad	Árido grueso	Árido fino
Tamaño (mm)	4,76-25,0	0-4,76
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	3,35	3,70
Absorción (%)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	-
Desgaste de los ángeles (%)	≅ 20	-

Tabla 2.8 Propiedades físico-mecánicas de las escorias negras EAF

La absorción de agua de la escoria negra presenta en general valores entre 1% y 4% (Tomasiello and Felitti 2010) en volumen y en algunos próximos al 7%. Esta absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos hielo-deshielo o humedad-sequedad.

### 2.1.3.5. Estabilidad volumétrica

La inestabilidad volumétrica de las escorias de acería en general, proviene de los siguientes factores:

- Hidratación de la cal libre
- Hidratación de la magnesia libre
- Conversión de fases del silicato bicálcico
- Oxidación de Fe+2 a Fe+3

Existen otros factores de influencia sobre la susceptibilidad al hinchamiento, como son: porosidad de la escoria, y tamaño de grano de la cal libre y de la escoria. Por ello la determinación de la susceptibilidad al hinchamiento de las escorias correspondientes es el método único y más adecuado para enjuiciar la aptitud/idoneidad de la escoria de acería para un campo determinado de aplicación.

La cal, en las escorias enfriadas, está ligada principalmente en forma de silicatos, tricálcicos y bicálcicos ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ), y también como ferritos y aluminatos. Según sea el desarrollo del proceso metalúrgico pueden quedar desde contenidos despreciables, hasta contenidos del 20% como cal libre  $CaO_{libre}$  o lima, no ligada, en las escorias. Esta cal libre puede aparecer en las escorias de acería como cal libre expulsada del silicato tricálcico que pasa a bicálcico o como cal residual, no disuelta en el desarrollo del proceso de producción de acero.

La hidratación de la cal libre que pueda poseer la escoria trae como consecuencia un importante aumento de volumen, que genera tensiones internas y provoca pequeños efectos “cuña”, que rompen la zona que rodea a los nódulos de cal. Estudiando aisladamente la hidratación de la cal libre, y considerando las densidades, se prevé el fenómeno expansivo y la problemática que generan estos nódulos.

En investigaciones llevadas a cabo sobre estas escorias (Frias and Sanchez 2004) se ha podido comprobar que las concentraciones de cal libre presente en estas escorias eran muy bajas, por debajo del 0,1% y el total de contenidos de sulfatos ( $SO_3$ ) no alcanza el 0,6%, valores por debajo de los límites especificados en la EHE-08 (28.7.2), que fija como máximo 1% (Ministerio-Fomento 2008).

Estas investigaciones muestran que los componentes expansivos (cal libre, sulfatos y cloruros) están en muy baja o nula concentración. Con

respecto a la  $MgO_{\text{libre}}$ , las concentraciones detectadas fueron inferiores al 1%, no siendo lo suficientemente grandes para cristalizaren en forma de periclasa, por lo que es posible afirmar que las concentraciones de estos compuestos potencialmente expansivos tienen un contenido nulo o muy bajo para producir reacciones de repercusiones negativas en el rendimiento y la durabilidad de los hormigones elaborados con estos subproductos.

Más recientemente se confirma la estabilidad de estas escorias de horno de arco eléctrico utilizadas como áridos en hormigones en la publicación de las investigaciones llevadas a cabo por Juan A. Polanco (Polanco, Manso et al. 2011).

#### 2.1.3.6. Valoración y aplicaciones

Las escorias de acería se pueden convertir en materiales aptos para otros usos bien directamente sin un proceso previo y sin tratamientos físico-mecánicos o bien previamente sometidas a una serie de procesos como el machaqueo, separación magnética, cribado, etc, convirtiéndolas de este modo en un material granulado estable, denominado “árido siderúrgico”.

Gracias a la excelente resistencia a la abrasión que poseen las escorias negras (Jones 2001), estas se han empleado tradicionalmente de manera directa en la preparación de bases y sub-bases de carreteras y calzadas de caminos, incluso en vías férreas (Thomas 1983, Rubio and Carretero 1991, González Martínez 1999, Motz and Geiseler 2001, Xie, Wu et al. 2012)

En la actualidad, los tratamientos más habituales para conseguir árido siderúrgico estabilizado a partir de escorias negras son, en primer lugar, el granulado de la escoria mediante machaqueo, así como su triturado y molienda hasta alcanzar un tamaño adecuado a su uso y, en segundo lugar, el depósito posterior de la escoria granulada a la intemperie para favorecer su exposición al agua de lluvia, nieve o a la propia humedad relativa ambiental y, de esta manera, propiciar su meteorización (Manso, Gonzalez et al. 2004).

Existen trabajos que estudian la durabilidad de hormigones elaborados con escorias negras EAF (Arribas, Vegas et al. 2014), en los que el comportamiento de estos hormigones fue similar o superior a los de referencia, ejecutados con áridos naturales, excepto en el caso de la exposición a ambientes marinos y de agua de mar, por lo que la penetración de cloruros fue mayor.

Otros trabajos (Manso, Hernandez et al. 2011, Polanco, Manso et al. 2011), investigan hormigones ejecutados con escoria negra EAF y escoria blanca LF, obteniendo una buena resistencia mecánica con bajos contenidos de cemento. Así mismo, concluyen que el comportamiento expansivo a largo plazo de los hormigones es, en general, aceptable. De la misma manera, existen investigaciones que evalúan el comportamiento de morteros de albañilería dosificados conjuntamente con escorias negras EAF y escorias blancas LF, mostrando un comportamiento similar a los elaborados con áridos naturales (Santamaría-Vicario, Rodríguez et al. 2015).

Publicaciones recientes (Anastasiou, Papayianni et al. 2014) estudian hormigones auto-compactantes que contienen escoria blanca LF y fibras de acero, en los que el uso de LF parece tener un efecto positivo en las resistencias a compresión de los hormigones, así como en los ciclos hielo-deshielo y la resistencia a la penetración de cloruro.

Otros trabajos estudian el uso de dos tipos distintos de escoria EAF en la elaboración de hormigón estructural (San-José, Vegas et al. 2014), en los que las resistencias mecánicas son similares a los hormigones tradicionales.

Una vez establecida la viabilidad de utilización de la escoria negra como árido siderúrgico en la fabricación de hormigones (Arribas, Santamaria et al. 2015), en esta Tesis Doctoral se pretende examinar el empleo de esta escoria en la ejecución de soleras y pavimentos de hormigón reforzado con fibras, en las que se sustituye el árido natural por árido siderúrgico.

## **2.2. EL HORMIGÓN**

### **2.2.1. Introducción**

El término hormigón puede incluir una considerable variedad de productos confeccionados con cemento portland u otro medio o material cementicio; pero en nuestro caso, el término hormigón se refiere al material que, en principio, es una mezcla plástica de cemento portland, agua, aire y árido mineral. A este material básico y en el momento de su amasado, pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas.

Por sus indiscutibles ventajas, al hormigón se le considera el material más importante de la construcción. Dentro de estas ventajas se puede destacar que debido a su carácter plástico cuando se encuentra en estado

fresco, permite conseguir piezas de formas complicadas, con la única limitación de la complejidad del molde. Además es un material con buena resistencia a compresión y aunque la resistencia a flexión sea pobre, se puede mejorar apreciablemente aportándole armaduras de acero en lugares adecuados, constituyendo el hormigón armado y pretensado.

El hormigón presenta la ventaja sobre otros materiales resistentes de proporcionar piezas con gran monolitismo, incluso en los nudos, haciendo que pueda prescindirse de juntas o uniones que, a veces, son zonas débiles. Desde este punto de vista, el hormigón se comporta mejor que las construcciones pétreas (mamposterías y sillerías), que las fábricas de ladrillo y que las estructuras de acero laminado.

Se podrían dar otras muchas razones de peso que justifican el lugar de privilegio que ocupa, pero quizás una de las más notables sea que está formado por materiales abundantes y baratos por lo que la ventaja económica le permite competir con el resto de materiales. Bien es verdad que el exceso de explotación de las canteras ha provocado en muchas ocasiones grandes impactos ambientales. En esta tesis se pretende contribuir a paliar en parte este problema con la incorporación de material reciclado como es la escoria negra de horno eléctrico de arco EAF.

La historia del hormigón ha experimentado una continua evolución a lo largo de toda su existencia debido siempre al material cementante, que ha ido variando de acuerdo con las circunstancias locales.

Ya en la prehistoria se empezó a utilizar una mezcla de cemento con agua, arena y áridos dando como resultado un nuevo material que se podía moldear fácilmente y que cuando endurecía adquiría unas características de solidez, resistencia y durabilidad notables.

La referencia más antigua de la utilización de este material se remonta 9000 años aproximadamente y se localiza en los suelos encontrados en Yiftah (Israel), los cuales presentaban una resistencia a compresión apreciable.

En Egipto se pueden encontrar restos de la utilización de aglomerantes en el 2560 a.C. donde se construyen las pirámides de Gizeh, conformadas por las pirámides de Kefrén (136m), Keops (137m) y Mikerinos (62m) en las cuales los bloques de piedra fueron pegados con un mortero hecho de yeso calcinado impuro, arena y agua. A éstas siguieron otras que aún se encuentran a lo largo del río Nilo.

Los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertos materiales procedentes de depósitos volcánicos, mezclados con caliza, arena y agua, producían un mortero de gran resistencia, capaz de soportar la acción del agua dulce y salada. La civilización romana utilizaba el hormigón en la construcción de grandes edificios, y también en la red de agua potable y en la evacuación de aguas residuales.

Con la caída del imperio romano declinó el empleo del hormigón como material estructural y muchos de los conocimientos desarrollados desaparecieron, no volviéndose a encontrar muestras de su uso hasta el año 1200, en que se vuelve a utilizar para la construcción de grandes obras como la Catedral de Salisbury en Inglaterra, cuyos cimientos están hechos de hormigón.

Se puede decir que el primer padre contemporáneo del cemento fue Vicat (1817), a él se debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad. Vicat fue un gran investigador y divulgador de sus trabajos; en 1818 publicó su "Recherches experimentales" y en 1828 "Mortiers et ciments calcaires". En estos trabajos marca la pauta a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas de calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente.

En 1824 Joseph Aspdin, un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual molió y pulverizó y consiguió la patente para producir el primer cemento Portland, así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Portland.

Una vez que el hormigón es asumido por la sociedad como un material de confianza es cuando éste se desarrolla y comienzan a realizarse obras con este material como la presa de S. Mateo en Estado Unidos a base de mampuestos unidos por mortero y la construcción, en 1897, de la primera viga en vientre de pez de Moeller.

El hormigón armado sigue su difusión imparable por todo el mundo llegando a alcanzar una etapa de gran esplendor y un incremento constante de la resistencia a compresión del hormigón. Incluso en 1913 se comienza a suministrar por primera vez hormigón preparado en Baltimore (USA), aunque no fue hasta tres años después cuando aparece el primer camión hormigonera, como los que se conocen hoy en día.

Hacia finales del siglo XIX, el proceso de industrialización y la introducción de hornos rotatorios propiciaron la extensión de su uso para

todo tipo de aplicaciones. Actualmente, y a pesar de todas las mejoras técnicas introducidas, el cemento Portland continua siendo, en esencia, muy similar al primero que se patentó, aunque su impacto y prestaciones han mejorado muy significativamente.

Hoy en día, los hormigones fabricados con cemento portland admiten múltiples posibilidades de aplicación. La diversidad de características ponen al alcance de la sociedad un amplio abanico de modalidades para escoger. Todas las modalidades de hormigones han demostrado a lo largo del tiempo sus excelentes propiedades y su elevado grado de durabilidad y resistencia, lo se puede constatar en las grandes edificaciones, las obras públicas o los conjuntos artísticos (como esculturas), muestra de la funcionalidad y el buen comportamiento de todo un clásico actual.

### **2.2.2. Características principales del hormigón**

El hormigón fresco es un estado del hormigón durante el cual los granos de sus constituyentes, conglomerante, arena y grava, son susceptibles de tener movimientos independientes los unos respecto de los otros. En la práctica, el hormigón en este estado está expuesto a la segregación, pero ofrece la oportunidad de ser consolidado, minimizando su porosidad inicial. Para la comprensión y el control del comportamiento del hormigón en este estado, se ha desarrollado la idea y los métodos de medición de la consistencia.

El hormigón endurecido es un sólido, un conglomerado, un medio poroso cohesivo y dinámico. La estructura de un sólido, en sentido general, se define como la relación entre la posición espacial de los elementos individuales primarios y las fuerzas de unión entre ellos.

El conocimiento de la estructura y propiedades de los componentes individuales del hormigón y las relaciones empíricas que gobiernan cada una, son un útil ejercicio para el conocimiento de este material. En general, los hormigones se caracterizan por su resistencia a compresión, debido a su fácil medición, y se tiende a decir que si un hormigón es resistente, es denso, si es denso es poco poroso, si es poco poroso es impermeable y si es impermeable es duradero.

El tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de las fases presentes en un sólido se denomina estructura. Los elementos gruesos de la estructura pueden observarse a simple vista, no así los elementos finos que requieren de la ayuda del microscopio. En general, la parte gruesa de la estructura se denomina macroestructura, visible al ojo humano ( $>200 \mu\text{m}$ ). El término

microestructura se utiliza para las magnitudes microscópicas dentro de la estructura macroscópica.

En las características de la estructura del hormigón se pueden distinguir 3 fases:

- La fase árido es, fundamentalmente, la responsable de la densidad, del módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional.
- La fase hcp (pasta de cemento hidratada) influye de manera decisiva en todas las características deseables en el hormigón endurecido, resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad, y depende de las proporciones de los productos de hidratación presentes y sus propiedades, las cuales son función de las características de sus microestructuras y, por ejemplo, del tipo, cantidad y distribución de sólidos y poros.
- La fase de transición hcp-árido, generalmente, es el eslabón más débil de la cadena, por lo que influye también de forma decisiva en las propiedades deseables del hormigón, principalmente en la resistencia.

El hormigón es un material de gran heterogeneidad y dinámico en función del medio ambiente. El carácter poroso del hormigón y la fase acuosa contenida en los poros, entre otros parámetros, juegan un papel fundamental en la evolución del hormigón y, por lo tanto, de sus características intrínsecas. Los poros y la fase acuosa que aquellos contienen, constituyen un sistema termodinámicamente abierto y, por tanto, dinámico, en continua interacción, cuyos equilibrios fluctúan en función del medio ambiente exterior, de la humedad relativa, de la penetración de agentes externos, etc.

El comportamiento del hormigón fresco en la manipulación, consolidación y acabado es usualmente caracterizado por términos tales como trabajabilidad y consistencia. Estas características son muy importantes en la práctica.

La trabajabilidad se define en la Norma ASTM C 125 (ASTM 1998), como *la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de hormigón recién mezclado con una mínima pérdida de homogeneidad*. Una adecuada trabajabilidad proporciona una razonable seguridad de eliminar, o al menos reducir en su mayor parte con los medios

de compactación disponibles, el aire atrapado en el hormigón y de llenar completamente el molde de que se dispone.

La consistencia medida por el cono de Abrams o el aparato Vebe, por ejemplo, se usa como un simple índice de movilidad o fluidez del hormigón fresco. El esfuerzo requerido para compactar el hormigón está gobernado por las características del fluido y la facilidad con la que se puede conseguir la reducción de huecos sin destruir la estabilidad bajo presión. La estabilidad es un índice de la capacidad de atrapar el agua.

Se puede considerar que la trabajabilidad es una propiedad compuesta de al menos dos componentes:

1. *Consistencia*, que describe la facilidad de fluir.
2. *Cohesividad*, que describe la tendencia a exudar o segregar.

Las características deseables en el hormigón endurecido, resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad, están influenciadas por la proporción de hcp presente y sus propiedades, las cuales dependen de las características de su microestructura (tipo, cantidad y distribución de sólidos y poros).

La resistencia a compresión es el parámetro que generalmente se utiliza para definir un hormigón, variando está en función de la edad del hormigón. Para establecer este parámetro es preciso especificar la edad del hormigón cuando se realiza el ensayo, el estado de saturación de la probeta y el tamaño y forma de la probeta empleada.

El concepto de durabilidad en un hormigón define la resistencia a la disminución de sus cualidades físicas y químicas frente a la acción de agentes exteriores, a lo largo de un periodo de tiempo (vida útil del hormigón).

La característica más importante que va a determinar la durabilidad de un hormigón es su permeabilidad, que está íntimamente relacionada con la porosidad o el índice de huecos en la masa del hormigón. Una relación A/C baja obtenida con la incorporación de algún plastificante y un vibrado adecuado disminuye el índice de huecos y poros mejorando su durabilidad.

Las propiedades del hormigón dependerán de sus componentes básicos, de la proporción de ellos y de las características físico-químicas de la interfase entre la matriz cementicia y los áridos.

### 2.2.3. Componentes del hormigón

#### 2.2.3.1. Conglomerante

En la constitución del hormigón, la unión de los áridos se logra por medio de una pasta formada por un conglomerante (cemento) y agua. Este cemento, que generalmente son cementos portland, pertenece a la familia de los conglomerantes hidráulicos obtenidos mediante la mezcla de fragmentos de rocas calizas, arcillas y otros componentes minoritarios correctores, sometiéndolos a una temperatura superior a la de clinkerización o sintetización (1.450°C), y moliendo el Clinker resultante con la adición de entre el 3,5- 4,5% en peso de yeso, como regulador de fraguado.

Al cemento utilizado en la fabricación del hormigón se le exige en España cumplir con la Instrucción para la recepción de cementos (RC-08) (Ministerio-Fomento 2009), pertenecer a la clase resistente 32,5 o superior y cumplir con las limitaciones de uso establecidas en la tabla 26 del capítulo 6 de la EHE-08.

#### 2.2.3.2. Agua

El agua a emplear en la elaboración del hormigón y para su curado, no debe contener ningún ingrediente perjudicial que pueda afectar a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión.

En general, para la fabricación de hormigones sirve cualquier agua apta para el consumo y normalmente suministrada en una red de agua potable.

Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán realizarse análisis químicos con las limitaciones siguientes:

- Exponente de hidrógeno pH  $\geq 5$
- Sustancias disueltas  $\leq 15$  gramos por litro
- Sulfatos expresados en  $\text{SO}_4$   
Excepto con cementos SR que es 5 gr  $\leq 1$  gramo por litro
- Ion cloruro,  $\text{CL}^-$   
Para hormigón pretensado  $\leq 1$  gramo por litro  
Para hormigón armado u hormigón en

Masa con armadura anti fisuración	≤ 3 gramo por litro
- Sustancias orgánicas solubles en éter	≤ 15 gramos por litro

### 2.2.3.3. Áridos

Los áridos utilizados en la fabricación del hormigón, áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas) cumplirán lo dispuesto en la Norma Europea UNE-EN 12620 “Áridos para hormigones” (Aenor 2009), pueden ser rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire, áridos reciclados resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción y en general cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.

Según su procedencia y método de obtención pueden clasificarse en naturales (granulares o de machaqueo), artificiales o reciclados.

Los áridos naturales son de origen mineral que únicamente han sido sometidos a un proceso mecánico. Entre estos, podemos diferenciar los áridos naturales granulares, obtenidos en graveras, los de naturaleza silícica, con forma redondeada y superficies lisas y sin aristas, y los áridos naturales de machaqueo, producidos en canteras, triturados, molidos y clasificados, son de naturaleza caliza y con superficies rugosas y aristas vivas.

La denominación del tamaño del árido se efectúa según el formato “**d/D-IL-N**”, en función de la fracción granulométrica, comprendida entre un tamaño mínimo (d) y un tamaño máximo (D), IL es la forma de presentación (R, rodado; T, triturado; M, mezcla) y N la naturaleza del árido (C, calizo; S, silícico; G, granito; B, Basalto; etc).

Es recomendable anteponer a este formato el grupo de árido **GR** (AG, árido grueso; AF, árido fino; FN, finos) y **L** refleja si se trata de un árido lavado.

La norma UNE-EN 933-2 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2 Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas” (Aenor 1996), recoge una serie de tamices constituido por las siguientes luces de malla:

**0,063- 0,125- 0,250- 0,500- 1,00- 2,00- 4,00- 8,00- 16,00- 31,00 mm**

El árido grueso se corresponde con la fracción del material de mayor tamaño, con  $D \geq 4$  mm y  $d \geq 2$  mm.

El árido fino es aquel cuyo tamaño nominal  $D \leq 4$ .

#### 2.2.3.4. Aditivos

Se entiende por aditivo aquellas sustancias o productos que, incorporadas al hormigón en pequeñas cantidades antes del amasado o durante el mismo, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

Estas pequeñas cantidades la EHE-08 lo limita al 5% del peso del cemento.

Los aditivos más utilizados en la fabricación del hormigón en general son los reductores de agua o plastificantes o superplastificantes cuya función principal es la de reducir el contenido de agua de un hormigón sin modificar apenas la trabajabilidad del mismo.

Otros aditivos que se suelen utilizar son los modificadores de fraguado (aceleradores o retardadores), para modificar el tiempo de fraguado del hormigón; los inclusores de aire (aireantes) que producen un volumen controlado de finas burbujas de aire, repartidas uniformemente; los hidrófugos, que reduce la absorción capilar del hormigón endurecido y los multifuncionales, que modifican más de una de las funciones principales definidas anteriormente.

Los diferentes aditivos incorporados en la elaboración del hormigón deben cumplir con lo dispuesto en la norma UNE-EN 934-2 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definición, requisitos conformidad, marcado y etiquetado (Aenor 2012).

Con la aparición de los aditivos fluidificantes y superplastificantes, en los años setenta, se consigue reducir la relación A/C sin provocar mermas en la consistencia de la masa. Con estos aditivos es posible conseguir resistencias que sobrepasan los 60 MPa.

La resistencia del hormigón es inversamente proporcional a la cantidad de agua añadida o a la relación agua-cemento A/C. Con el fin de producir hormigones más resistentes se reduce la cantidad de agua añadida, lo que consigue mezclas de difícil manejo, haciendo necesario el uso de los aditivos plastificantes o superplastificantes.

### 2.2.3.5. Adiciones

La EHE-08 define las adiciones al hormigón como aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales.

Los materiales más empleados como adición en la fabricación del hormigón son el filler mineral, puzolanas, cenizas volantes, escorias, humo de sílice, etc.

Estas adiciones mejoran las prestaciones del hormigón, tales como trabajabilidad, resistencia, retracción de fraguado, calor de hidratación, impermeabilidad, durabilidad, etc.

Las adiciones pueden utilizarse como componentes del hormigón siempre que se justifique su idoneidad para su uso, produciendo el efecto deseado sin modificar negativamente las características del hormigón, ni representar peligro para la durabilidad del hormigón, ni para la corrosión de las armaduras.

La EHE-08 únicamente recoge la utilización de las cenizas volantes y el humo de sílice como adiciones al hormigón en el momento de su elaboración, no obstante existe una serie de normas UNE agrupadas con el título de "Adiciones al hormigón" donde se especifica las condiciones y limitaciones de todos los productos utilizados como adición al hormigón.

### 2.2.4. Hormigón de escoria negra

Uno de los usos que más se da hoy en día a los áridos siderúrgicos es su utilización como componentes en la fabricación de hormigones y morteros. Sin embargo la proporción de éstos en la dosificación de los hormigones es muy variada, según se desprende de los estudios realizados hasta el momento, siendo común para todos ellos la utilización de estos áridos siderúrgicos envejecidos por exposición a la intemperie y/o riego de agua y volteo, para asegurar la estabilidad volumétrica.

Entre la amplia bibliografía existente, se escogen algunas referencias de las distintas dosificaciones que se han estudiado. Autores que sustituyen una sola de las fracciones del árido natural por árido siderúrgico, como la fracción fina (Akinmusuru 1991, Båverman and Aran 1997, Amaral de Lima 1999, Qasrawi, Shalabi et al. 2009), otros que sustituyen solo la fracción gruesas (Akinmusuru 1991, Amaral de Lima 1999, Maslehuddin, Sharif et

al. 2003, Jigar 2008, Pellegrino and Gaddo 2009, Abu-Eishah, El-Dieb et al. 2012), e incluso la sustitución de todo el árido natural (Manso Villalaín 2001, Vázquez and Barra 2001, Manso, Polanco et al. 2006, Papayianni and Anastasiou 2010, Arribas García 2011, Polanco, Manso et al. 2011).

Algunos investigadores combinaron en la fabricación del hormigón siderúrgico, áridos siderúrgicos de escoria negra con áridos siderúrgicos de escoria blanca (Losáñez González 2005, Manso, Hernandez et al. 2011), adicionando otros materiales como aireantes (Jigar 2008, Pellegrino and Gaddo 2009), cenizas volantes, activados alcalinos y humo de sílice (Matsunaga, Tanishiki et al. 2008, Abu-Eishah, El-Dieb et al. 2012) y arenas de fundición (Etxeberria, Pacheco et al. 2010). Como resumen se puede decir que las propiedades mecánicas obtenidas con estas dosificaciones en los hormigones siderúrgicos, fueron similares o mejores que las correspondientes a un hormigón tradicional.

Una de las características físicas que más cambia en el hormigón de áridos siderúrgicos con respecto al hormigón convencional es su densidad, motivada por la incorporación de áridos de mayor densidad como son las escorias negras EAF con densidades que oscilan entre 3300 y 3800 Kg/m<sup>3</sup> mientras que los áridos naturales tienen una densidad alrededor de 2600 Kg/m<sup>3</sup>, esto supone obtener hormigones con densidades entre 2600 y 2900 Kg/m<sup>3</sup> en función del grado de sustitución de los áridos naturales por los áridos siderúrgicos.

La fabricación de hormigones con bajos contenidos de áridos siderúrgicos apenas afecta a la medida de asentamiento de éstos. Sin embargo, un alto contenido de este tipo de áridos reduce considerablemente la trabajabilidad del hormigón (Etxeberria, Pacheco et al. 2010). Cuando se fabrica un hormigón únicamente con áridos siderúrgicos, denotan una falta de finos, creando un hormigón con exceso de huecos de tamaño y aspecto inadmisibles (Manso Villalaín 2001). Además, considera que la porosidad y angularidad con bordes afilados de los áridos siderúrgicos, provocan una disminución de la trabajabilidad, especialmente cuando el árido fino tiene esta morfología (Manso, Hernandez et al. 2011), llegando a la conclusión que se puede fabricar un hormigón con 100% de árido grueso siderúrgico y hasta un 65% de árido fino siderúrgico con el 35% restante de árido natural calizo.

Otro factor importante que afecta la trabajabilidad es el contenido de agua de amasado, dado que una buena dosificación de agua constituye un factor de docilidad, pero un exceso en la proporción provoca una

disminución de las cualidades intrínsecas del hormigón como: resistencia, retracción, porosidad e impermeabilidad; en definitiva de la durabilidad. Para remediar estas pérdidas se debe recurrir al empleo de aditivos fluidificantes que permitan mejorar las cualidades de plasticidad, fluidez y docilidad, disminuyendo la cantidad de agua empleada.

La resistencia a compresión del hormigón, como se ha mencionado anteriormente, puede dar una visión global de la calidad de éste, pues está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratada y de la interfase árido-pasta, además de constituir una característica primordial en el diseño estructural del hormigón.

Los áridos empleados en la fabricación del hormigón tienen su influencia en la resistencia del hormigón, proporcionando una mejora en las propiedades de los hormigones con árido siderúrgico de escoria negra atribuida a la mayor rugosidad de la superficie de estos áridos que consiguen una mayor cohesión entre ellos y la pasta de cemento (Papayianni and Anastasiou 2010).

De las distintas dosificaciones mencionadas al comienzo de este punto, los que sustituyeron únicamente la fracción fina según Båverman y Aran (Båverman and Aran 1997) las resistencias a compresión y flexión fueron equivalentes a las de un hormigón convencional. Por otro lado Qasrawi, et al., (Qasrawi, Shalabi et al. 2009), consiguió una resistencia a compresión entre 1,1 a 1,3 veces en comparación con un hormigón tradicional y la resistencia a tracción de 1,4 a 2,4. En la mayor parte de las ocasiones en que se sustituye 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 de Lima 1999).

Otros autores, sustituyendo la fracción gruesa incluso con la adición de cenizas volantes y activados alcalinos, evidenciaron propiedades mecánicas análogas a los hormigones tradicionales (Manoso, Polanco et al. 2006, Matsunaga, Tanishiki et al. 2008, Netinger, Bjegovic et al. 2011).

Sin embargo, algunos autores constatan que los hormigones con áridos siderúrgicos mejoran las propiedades mecánicas con respecto a los hormigones tradicionales, con un incremento del 30% al 38% en la resistencia a compresión, al igual que la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad con un incremento del 10% y 8% respectivamente (Pellegrino and Gaddo 2009, Etxeberria, Pacheco et al. 2010).

En el artículo de Abu-Eishah, et al 2012 (Abu-Eishah, El-Dieb et al. 2012), se concluye que la inclusión de cenizas volantes y humo de sílice con los áridos siderúrgicos producen hormigones de altas resistencias en comparación con los hormigones convencionales, mejorando además la durabilidad del hormigón con escorias. También Papayianni y Anastasiou, 2010 (Papayianni and Anastasiou 2010) constatan un incremento del 10% en la resistencia a compresión al sustituir el 100% de la fracción gruesa por árido siderúrgico y hasta un 20% si además también se sustituye el 50% del árido fino por árido siderúrgico.

Algunos autores atribuyen estas mejoras en las propiedades mecánicas por la inclusión de los áridos siderúrgicos, a las características físicas de los mismos, tales como la mayor rugosidad de la superficie, que consigue un mejor contacto entre los áridos siderúrgicos y la pasta, con una microporosidad menor que en el caso de los áridos naturales, además de su elevada densidad y ausencia de fisuras u otras discontinuidades (Amaral de Lima 1999, Pellegrino and Gaddo 2009, Papayianni and Anastasiou 2010).

En relación a la durabilidad de estos hormigones siderúrgicos, se han realizado diversos estudios con ensayos como: **absorción de agua, carbonatación, envejecimiento acelerado, hielo-deshielo, ataque a los sulfatos, reacción álcali-árido**, etc. A continuación se hace un repaso de los estudios de los autores antes mencionados sobre el comportamiento del hormigón siderúrgico para este tipo de ensayos.

Con respecto a la **absorción de agua**, Maslehuddin et al 2003 (Maslehuddin, Sharif et al. 2003) comprobaron que la absorción de agua durante 48 horas en los hormigones siderúrgicos es menor que en los hormigones tradicionales, disminuyendo ésta cuanto más árido siderúrgico se incorpora. Los valores de absorción para los hormigones con áridos siderúrgicos osciló entre 3,64% y 4,51%, mientras que para el hormigón tradicional fue de 5,53%.

Si se analizan los resultados del **envejecimiento acelerado** según la ASTM D-4792 (inmersión de probetas en agua a 70°C durante 32 días) se encuentran diversos resultados contradictorios. Analizando los hormigones con sustitución del 100% de la fracción gruesa, Pellegrino y Gaddo 2009, observaron que para los dos hormigones (tradicional y siderúrgico) aparecieron eflorescencias producidas por los hidróxidos de calcio y de magnesio, con menor proporción en el hormigón tradicional. En cuanto a la resistencia de estos hormigones después del ensayo, el hormigón

tradicional aumento la resistencia en un 9%, al contrario que sucedió con el hormigón siderúrgico que sufrió una pérdida del 5%, aunque en otro ensayo posterior se pudo reducir la pérdida al 2,37%, manteniéndose el aumento en el hormigón tradicional en valores similares (8,35%). En contraposición a estos resultados, Losañez 2005, no observa ninguna variación en ninguno de los hormigones sometidos a este ensayo.

Por otro lado Manso 2001, consiguió mejora en todas las amasadas, siendo las que más se incrementaron aquellas con más proporción de áridos siderúrgicos (la totalidad del árido grueso y parte del fino). Estos aumentos se los atribuye a la mejora en las propiedades de la matriz, a la mejora de la resistencia de la escoria negra asociada a una posible hidratación incipiente de los silicatos tricálcicos y bicálcicos que mejora la adherencia del árido a la matriz.

Con respecto a la **carbonatación**, Amaral, 1999 utilizó el método acelerado en cámara climática con un 65% de humedad y atmósfera saturada de CO<sub>2</sub> y la exposición natural al aire (dentro del laboratorio), durante un año. En los dos métodos de ensayo la profundidad de la carbonatación fue semejante. En el método acelerado el hormigón siderúrgico con sustitución del árido fino presenta menor penetración con respecto a su hormigón convencional análogo. Sin embargo, en el método natural los resultados de estos fueron homogéneos.

En cuanto a la **permeabilidad** por la acción del agua bajo presión, este mismo autor concluye que el hormigón siderúrgico con sustitución del árido fino es más impermeable que el de sustitución del árido grueso, pero a su vez éste es bastante más impermeable que los de referencia convencionales.

En la resistencia a los ciclos de **hielo-deshielo** con diferentes tipos de ensayos, con el paso del tiempo se ha logrado mejorar la resistencia a compresión de los hormigones sometidos a estos ensayos. Manso 2001, observó una reducción en la resistencia de los dos hormigones tanto siderúrgico como convencional, siendo menor en el hormigón convencional con una reducción del 15%, mientras que las otras dos dosificaciones del hormigón siderúrgico disminuyeron en 23% y 48%, este último corresponde al de sustitución del 100% en la fracción gruesa y del 65% en la fracción fina, atribuible a su alta porosidad y baja resistencia mecánica como resultado de los correspondientes ensayos.

Más tarde Pellegrino y Gaddo 2009, obtuvieron un incremento en el hormigón tradicional del 3% mientras que el promedio de los hormigones

siderúrgicos presentaban una pérdida del 7,28%. Polanco et al 2011, obtiene resultados similares con pérdida de resistencia en el hormigón siderúrgico con sustitución del 100% del árido grueso y del 50% del fino, del 7,50%, sin embargo cuando a este hormigón le añadían escoria de horno de cuchara LF, la pérdida se incrementaba hasta el 38,8%, considerado como inaceptable, pues estos autores consideran que una pérdida de resistencia en este ensayo del 8% puede ser aceptable y del 16% tolerable (Manso, Polanco et al. 2006, Pellegrino and Gaddo 2009).

Por último Arribas 2011, observó una mejoría en las resistencias de los hormigones siderúrgicos entre el 7% y el 19%, y lo justificó debido a una mayor densificación de la zona interfase árido siderúrgico-matriz de cemento frente a los áridos naturales y a la menor profundidad de penetración de agua en los hormigones siderúrgicos. También pudo observar en el estudio microestructural centrado en la zona de interfase árido-pasta, realizado en su investigación, pone de manifiesto una menor porosidad de borde en los áridos siderúrgicos frente a los áridos naturales.

La reacción **álcali-árido** se produce cuando la disolución alcalina presente en los poros del hormigón y los minerales silícicos de algunos áridos reaccionan, para formar un gel que en presencia de agua aumenta de volumen, produciéndose una expansión y como consecuencia fisuración de las partículas del árido afectados. Respecto a este fenómeno, Manso 2001, observó una expansión de 0,14% a los 16 días y de entre el 0,14% al 0,15% a los 28 días que al no superar el 0,20% pudo definirlo como árido de baja reactividad. Arribas et al., 2014 también analizó esta reacción obteniendo una expansión a los 16 días del 0,06% < de 0,10% máximo admitido a esa edad, por lo que también se definió como de baja expansividad.

Por último las conclusiones de varios autores en el ensayo de **lixiviación**. Amaral 1999, analizó la lixiviación de dos dosificaciones de hormigón siderúrgico (uno con sustitución de la fracción gruesa y otro la fracción fina) analizando los elementos considerados contaminantes: Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, y de los no contaminantes: Ca, Mg, Na, Al, Ti, Mn. Concluyó que todos los metales pesados estaban por debajo de los límites definidos por la legislación Holandesa (NEN 7345, 1993). De los elementos contaminantes se observó una pequeña lixiviación del Bario; y de los no contaminantes el Ca, Mg, Na, Al y Fe. La conductividad se mantiene siempre baja aunque crece ligeramente con el tiempo y el pH también aumenta con el tiempo, argumentando la autora que es debido a la solubilidad de las fases alcalinas.

Manso 2001, estudia la lixiviación, primeramente de las escorias negras y después sobre el hormigón sin triturar, centrándose en los sulfatos, fluoruros y cromo total. Los resultados mostraron que los lixiviados directos de los áridos estuvieron cercanos a los límites, los sulfatos y los fluoruros, mientras que el elemento más peligroso, el cromo, casi no apareció. Los resultados en las probetas de hormigón fueron mejores, debido al efecto encapsulador y protector, exponiendo que pueden ser empleados en construcción y obra civil con seguridad.

Por otro lado, Arribas 2011, estudia la lixiviación de los sulfatos, fluoruros, Cr, Mo, V, Ni, Se, Ba, Cd, Pb y Zn, primeramente en los áridos sueltos y posteriormente en la probetas de hormigón siderúrgico. En el material granular concluye que sólo resultan potencialmente críticos, el V y el Se y el resto están por debajo de los límites. En el caso del material monolítico a los 16 días encontró elementos potencialmente críticos para el ambiente: V, Se, Ba, F y SO<sub>4</sub>, también encontró que el Ba y V tuvieron concentraciones próximas a los valores de detección. Los sulfatos y los fluoruros presentaron un perfil de lixiviación acumulada creciente, por lo que realizó una modelización a largo plazo de 100 años, concluyendo que los valores umbral de inmisión máxima para el Ba, V, sulfatos y cloruros se sitúan por debajo del umbral máximo aceptable y que se asumía un riesgo mínimo y aceptable derivado de la movilidad hacia el suelo de los contaminantes contenidos en el hormigón.

Más recientemente la doctora González Ortega en su tesis doctoral (González Ortega 2015) realizó el ensayo de lixiviación en tres amasadas de hormigón, dos de ellas con áridos siderúrgicos y aproximadamente un 15% de arena natural, silíceo en la 1ª y caliza en la 2ª, mientras que la tercera amasada sólo esta dosificada con árido natural calizo. Analizando los resultados a 36 días, los elementos definidos como contaminantes, las concentraciones de Cd, Cu, Cr, Pb, Zn, y V resultan despreciables, muy próximos a cero. El Níquel y 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). El elemento más lixiviado del ensayo es el calcio (Ca) que da en todas las amasadas y con más cantidad en el hormigón convencional con árido calizo. Se adjunta tabla de valores medios de concentración de dicho ensayo.

Elemento	Concentración de lixiviante mg/m <sup>2</sup>								
	HSS1b			HCS1a			HCa		
	0,25	4	36	0,25	4	36	0,25	4	36
<b>Ba</b>	0,0002	0,0002	0,0001	0,0006	0,0002	0,0002	0,0003	0,0001	0,0001
<b>Cd</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Cu</b>	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Cr</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Ni</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Pb</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Zn</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Se</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>V</b>	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Fe</b>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
<b>Ca</b>	0,0041	0,0079	0,0178	0,0054	0,0138	0,0463	0,0053	0,0110	0,0945
<b>Al</b>	0,0005	0,0008	0,0032	0,0005	0,0006	0,0020	0,0005	0,0005	0,0033
<b>Mg</b>	0,0003	0,0003	0,0001	0,0004	0,0007	0,0003	0,0003	0,0003	0,0001
<b>Mn</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Fe</b>	-	-	0,0002	-	-	0,0001	-	-	0,0001
<b>SO<sub>4</sub></b>	-	-	0,0013	-	-	0,0007	-	-	0,0010

Tabla 2.9 Lixiviante de componentes por periodos (días) para las tres amasadas (González Ortega 2015)

## 2.3. FIBRAS PARA EL REFUERZO DEL HORMIGÓN

### 2.3.1. Introducción

Las fibras, como refuerzo de materiales con características frágiles, se han utilizado desde la antigüedad con aportaciones de paja, pelos de caballo e incluso hojas aciculares de pino, que mezcladas con arcilla y secadas al sol, aportaban a estos bloques arcillosos (adobes) unas características que sin estos refuerzos no tendrían.

A principio de 1900 las fibras de asbesto (amianto) se utilizaban en el hormigón hasta que fueron descubiertos los riesgos que para la salud llevaba asociada esta sustancia, utilizada principalmente en materiales prefabricados como tuberías de abastecimiento y placas onduladas de cubierta.

Los antecedentes más inmediatos se encuentran en 1911, año en el que Graham utilizó por primera vez fibras de acero para incrementar la resistencia y estabilidad del hormigón armado convencional. Sin embargo, los primeros estudios científicos sobre este tema se deben a Griffith, en 1920, a los que siguieron en 1963 los de Romualdi y Batson y Romualdi y Mandel. Las investigaciones de estos científicos sobre los alambres de acero con poca separación, fueron la base que contribuyó al diseño de obras reforzadas con fibras de metálicas (ACHE 2000).

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza de las fibras empleadas. En este sentido, el hormigón reforzado con fibras (HRF) atrajo la atención de los investigadores en la primera mitad de los años 60, cuando materiales como el acero, el vidrio en fibras y las fibras sintéticas, como las de polipropileno ven incrementada su utilización como refuerzo del hormigón, continuándose hasta la actualidad.

Las mejoras más importantes que se lograron con la incorporación de fibras en el hormigón se encuentran en los campos de la tenacidad, fisuración y de la resistencia a tracción y a flexotracción (Hannant 1975). En la transferencia de carga entre la matriz y las fibras juega un papel muy importante la adherencia entre ambos materiales. La carga transferida depende de las propiedades físicas de la matriz y de las fibras, especialmente del módulo de elasticidad de ambas y de la forma geométrica de las fibras empleadas.

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas. El uso del hormigón reforzado con fibras constituye una de las innovaciones más relevantes en el campo de los hormigones especiales. La adición de fibras provoca una sustancial modificación de la respuesta del material. El nuevo material presenta una mayor capacidad de carga y absorción de energía en el comportamiento post-fisuración (Bernal, Mejía de Gutierrez et al. 2009).

Los hormigones reforzados con fibras (HRF) se definen, según la EHE-08 en su anejo 14, como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa.

El hormigón reforzado con fibras, según la definición del 'ACI- American Concrete Institute', no es más que hormigón hecho a partir de cementos

hidráulicos, conteniendo áridos finos, o finos y gruesos, y fibras discretas discontinuas (ACI-Committee-544 1996).

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas.

Actualmente se están empleando las fibras en gran variedad de productos utilizados en aplicaciones industriales y de la construcción, buscando siempre mejorar sus características mecánicas (resistencia a tracción y compresión, control de la fisuración, durabilidad, fatiga, resistencia al impacto y al fuego).

### **2.3.2. Aplicación de las fibras**

Inicialmente los usos tradicionales del HRF, debido a su tenacidad y resistencia a flexotracción, han sido los pavimentos y suelos industriales y más tarde la construcción subterránea. Las fibras, generalmente, se empleaban en dichas aplicaciones con el único propósito de mejorar la durabilidad del elemento, dada su efectividad en el control de la fisuración a tempranas edades y también posteriormente en el estado endurecido. Sin embargo, la función estructural de las fibras no se contemplaba en términos de proyecto o diseño.

El desarrollo en la tecnología del hormigón y del propio hormigón ha sido muy importante en las últimas décadas. De la evolución de la industria de la construcción nacen nuevas tecnologías basadas en el empleo de fibras con objeto de reforzar o armar el hormigón y la aplicación de nuevos procesos constructivos como el hormigón proyectado.

El empleo de la tecnología del proyectado constituye una técnica interesante al desarrollarse en una única fase la colocación y la compactación del hormigón. Sus aplicaciones en ingeniería civil y en construcción son numerosas, sobre todo como sostenimiento y revestimiento de túneles, estabilidad de taludes en superficies irregulares, estructuras de protección militar, canales, muros y bóvedas de seguridad, pavimentos, estructuras de láminas delgadas y reparación de hormigones deteriorados. Existen otras aplicaciones para el hormigón reforzado con fibras en el ámbito de los prefabricados. Se han construido viviendas prefabricadas mediante construcción industrializada, en las que no se ha empleado armado convencional. Así mismo, se fabrican tubos, arquetas, canales y otros elementos prefabricados, utilizando fibras en el hormigón.

El empleo de fibras en el hormigón se pueden diferenciar en dos tipos de aplicaciones: uso estructural y no estructural.

La adición de fibras como uso estructural está relacionada con la distribución de la fisuración, para mejorar la resistencia al impacto o cargas dinámicas y para evitar la desintegración del material. El empleo de fibras metálicas, complementadas o no con armadura longitudinal, se emplea en aquellos elementos estructurales que están sometidos a esfuerzos de tracción por flexión o por tracción directa como vigas soportes o losas de forjado.

En aquellos elementos donde no es tan necesaria una gran cuantía de armadura longitudinal, como pueden ser los pavimentos de aeropuertos y autopistas, soleras con altas resistencias para instalaciones industriales, revestimientos de túneles u hormigones proyectados para estabilización de laderas y elementos prefabricados, la mejora de la tenacidad y el aumento a la resistencia al impacto que está asociada a la incorporación de las fibras, se puede utilizar para disminuir espesores o para mejorar el comportamiento mecánico o ambos (ACI-Committee-544 1996).

En función de la cuantía del volumen de fibras a aportar y del nivel de exigencia se podían establecer cuatro categorías en la utilización de hormigón con fibras.

- Para el control de la fisuración, utilizando contenidos bajos de fibras como en forjados, soleras, pavimentos y refuerzos secundarios.
- Estructuras sometidas a cargas o deformaciones elevadas utilizando contenidos moderados de fibras (0,50%) como estructuras sísmicas escudos de protección de túneles, pilotes prefabricados para hincar.
- Estructuras de lámina delgada con contenidos elevados de fibras.
- Estructuras sometidas a altas energías de impacto con contenidos muy altos de fibras (Naaman and Chandrangsou 2004).

### 2.3.3. Tipos de fibras

En el mercado existen diferentes tipos de fibras en cuanto a materiales y tamaños determinando la efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión, la naturaleza y el tipo de estas.

Una posible clasificación en función de su comportamiento dentro de la matriz de hormigón, puede concretarse, por un lado, considerándolas como estructurales, aquellas que contribuyen a generar una mayor energía de rotura en el hormigón, y esa contribución puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón. De otro lado están aquellas fibras de comportamiento no estructural pero que cumplen otras funciones de mejora del comportamiento del hormigón; control de la fisuración por retracción, aumento de la resistencia frente al fuego, abrasión e impacto.

Dentro de la naturaleza de las fibras más habitualmente empleados se encuentran las metálicas, poliméricas o sintéticas, las fibras inorgánicas como puede ser la fibra de vidrio y las naturales. La Tabla 2.10 muestra algunos de los materiales más comunes empleados para fabricar fibras, con indicación de sus principales características.

Las principales características geométricas de las fibras son tres: longitud, diámetro equivalente y esbeltez. En esta tesis doctoral solo se van a utilizar fibras metálicas y sintéticas o poliméricas por lo que analizaremos más detenidamente estos tipos de fibras

Las **fibras metálicas** están reguladas por la norma UNE EN 83500-1 "Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definición, especificaciones y conformidad" (Aenor 2008), deben ser conformes con uno de los grupos o una de las formas relacionadas a continuación:

Grupos en función del material base utilizado:

- Grupo I: alambres estirados en frío
- Grupo II: láminas cortadas
- Grupo III: extractos fundidos
- Grupo IV: conformados en frío
- Grupo V: aserrados de bloques de acero

Formas: las fibras deben ser rectas o deformadas.

Materiales	Tipo de fibra	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Alarg rotura (%)
Metálicas	Acero	500-3.000	200.000	7.840	3,5
	Acero inox.	2.100	160.000	7.860	3
Sintéticas	Polipropileno	300-700	3.500-5.000	900-910	15
	Polietileno	200-300	5.000	960	3
	Vidrio	2.000-2.400	70.000-80.000	2.650	2,0-3,6
	Aramida	2.900-3.600	65.000-133.000	1.450	2,1-4,0
	Nylon	970	5.000	1.160	20
	Carbono	2.600-3.000	230.000	1900	1
Naturales	Celulosa	300-500	10.000	1.200	-
	Madera	900	71.000	1.500	-

Tabla 2.10 Materiales y tipos de fibras más empleados con sus características principales

La longitud de estas fibras se recomienda que tenga un mínimo de 2 veces el tamaño máximo del árido mayor, siendo usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo del árido. Por otro lado la longitud de fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad.

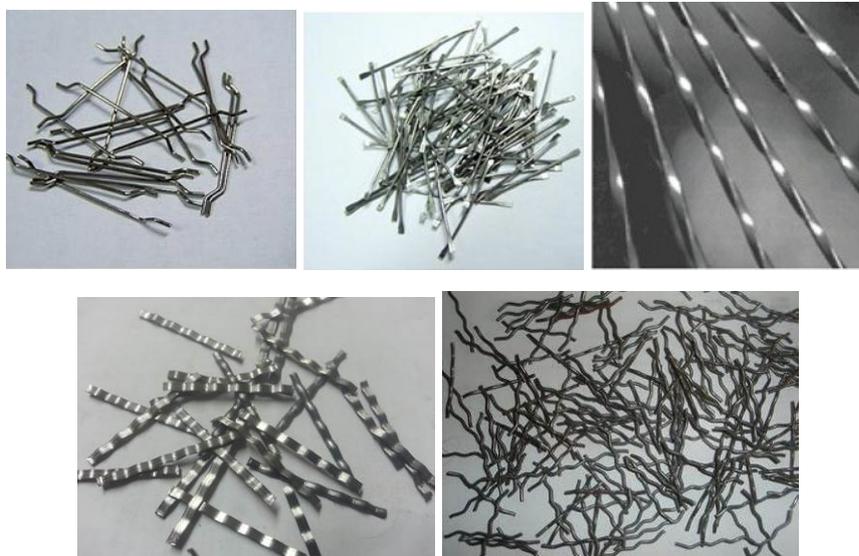


Imagen 2.4 Diferentes formas en las fibras metálicas

La adherencia de las fibras está fuertemente condicionada a la forma de estas, pudiendo ser onduladas, rectas, retorcidas, con extremos en forma de gancho (hooked end), e forma de cono o aplastadas (flat end), etc. (Imagen 2.4).

Las **fibras Poliméricas** como su nombre indica, son aquellas fabricadas a partir de un material polimérico basado en poliolefina, (por ejemplo, polipropileno o polietileno), poliéster, nylon, acetato de polivinilo (pva), poliacrílico, aramidas y combinaciones de estos. Están reguladas por la norma UNE EN 14889-2 "Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad" (Aenor 2008). Se clasifican en tres tipos en función de su forma física:

- Clase Ia: micro fibras: <0,30 mm de diámetro; Mono-filamentosas.
- Clase Ib: micro fibras: < 0,30 mm de diámetro; fibrilosas.
- Clase II: macro fibras: > 0,30 mm de diámetro.



Imagen 2.5 Diferentes fibras poliméricas existentes en el mercado

Las micro-fibras no tienen ninguna función estructural, su uso se enfoca para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, principalmente en pavimentos, y a mejorar su comportamiento frente al fuego añadiendo una dosificación alta de fibras por Kg/m<sup>3</sup>.

Byung Hang Oh, et. Al.(Oh, Kim et al. 2007) han realizado un estudio para determinar la fibra de polipropileno con mayores prestaciones, comparando las propiedades mecánicas con fibras de diferentes formas y tamaños.

Mediante ensayos de pull-out se obtuvo la capacidad de absorción de energía de cada tipo de fibra, concluyendo que la de tipo rizado (crimped) es la de mayor capacidad (Imagen 2.6).

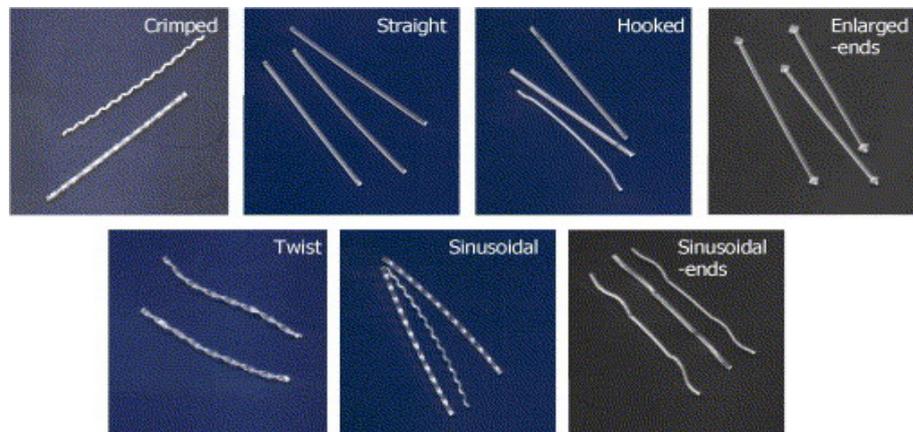


Imagen 2.6 diferentes formas en las fibras de Poliméricas

Las fibras poliméricas como las de polietileno presentan propiedades únicas que las hacen muy prácticas en la incorporación dentro de la matriz del hormigón, y es que son inertes químicamente hablando y muy estables dentro de un entorno alcalino. Además al ser menos densas, contribuyen a aligerar al hormigón.

Como desventajas se encuentran la escasa resistencia al fuego, su sensibilidad a la luz solar y al oxígeno, y un bajo módulo de elasticidad.

Estas desventajas no siempre le afectan de forma negativa al hormigón dado que las fibras contribuyen a aliviar la presión interna que genera un fuego en la masa del hormigón (Naaman and Reinhardt 2004).

Con respecto a la cuantía o dosificación de fibras a añadir al hormigón, existen dos formas de expresarla, la más empleada es determinar la cantidad en peso de las fibras por unidad de volumen del hormigón; la unidad más empleada es  $\text{kg/m}^3$  (dosificación en peso). La otra forma es presentarla en porcentaje como volumen de fibra por volumen de hormigón (dosificación en porcentaje). Para la conversión de la dosificación en peso a la de volumen, es necesario conocer el peso específico de cada material.

Las cuantías típicas empleadas para pavimentos con fibras metálicas varían de  $20 \text{ kg/m}^3$  hasta  $60 \text{ kg/m}^3$ ; y para fibras sintéticas la cuantía más usual oscila entre los  $2 \text{ kg/m}^3$  a los  $7 \text{ kg/m}^3$ , valores entre los que se va a trabajar en esta Tesis Doctoral.

## 2.4. HORMIGÓN CON FIBRAS

Como ya se ha dicho anteriormente el uso tradicional del HRF ha sido los pavimentos y suelos industriales. Entre las principales ventajas que

aportan las fibras a los suelos y pavimentos podemos destacar, la obtención de una sección de hormigón homogénea, donde el refuerzo se encuentra distribuido de manera aleatoria en toda la masa, brindando así, un refuerzo omnidireccional más eficiente (refuerzo continuo), a diferencia de sistemas de refuerzo tradicionales, donde el acero se coloca únicamente en una parte de la sección (refuerzo puntual) y en un solo plano (siempre y cuando se coloque adecuadamente), lo cual en muchas ocasiones puede ser prácticamente imposible (Imagen 2.7).

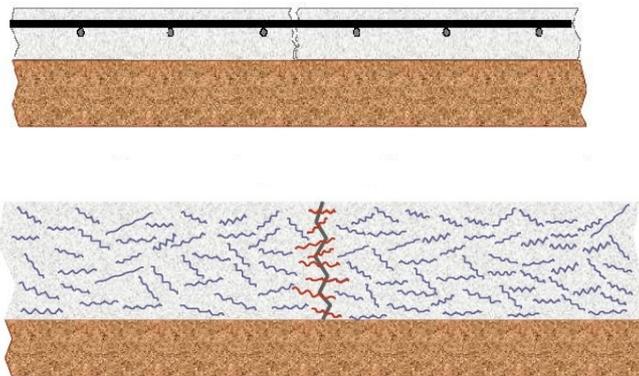


Imagen 2.7 Comparación entre refuerzo puntual y refuerzo continuo

Esta distribución del refuerzo con las fibras, permite absorber de manera más eficiente los esfuerzos de contracción por secado del Hormigón ya endurecido, así como los generados por cambios de temperatura, disminuyendo así la posibilidad de agrietamientos originados por estas tensiones. Así mismo la incorporación de fibras aumenta el módulo elástico del hormigón y por ende su capacidad de carga, por lo que en algunas ocasiones puede considerarse como un refuerzo primario al sustituir refuerzo con varilla de acero o malla electrosoldada. Además de permitir una mayor separación entre juntas y una mejor transferencia de cargas a través de las juntas de control, ya que las mantienen más cerradas, mejorando el efecto de trabazón (interlock), que se da entre las secciones de hormigón, separadas por la misma junta.

La utilización de fibras como refuerzo en los hormigones utilizados en soleras y pavimentos mejoran en estos las propiedades de ductilidad, dureza, resistencia al impacto, fatiga y resistencia al desgaste, todo esto dependiendo del tipo de fibra y de la dosificación, además estas propiedades dependen para ser específicas de la longitud de la fibra, de su diámetro, peso específico, resistencia a la flexión y módulo de

elasticidad, que puede ser muy variados en función del tipo de fibras utilizado.

El tamaño de los áridos tiene bastante influencia en los hormigones con fibras, cuanto mayor sea el volumen del árido grueso y el tamaño máximo del árido, menor será la movilidad potencial de las fibras, lo que da lugar a su agrupamiento y a una mayor interacción entre ellas, como se puede apreciar en la Imagen 2.8 (Hannant 1978).

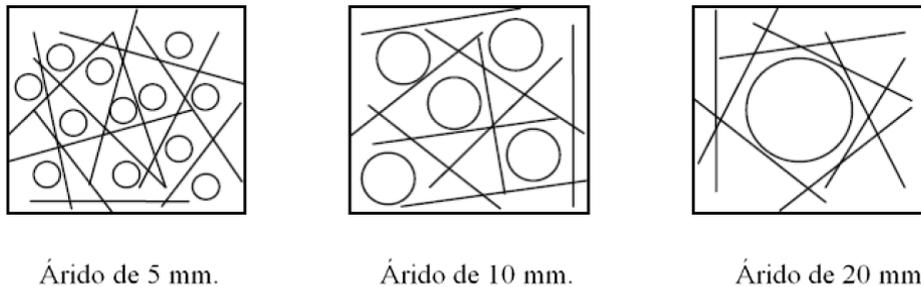


Imagen 2.8 Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras en un cuadrado de lado igual a la longitud de estas

Los resultados óptimos se consiguen cuando el tamaño máximo del árido grueso es, aproximadamente, igual a la mitad de la longitud de la fibra. En general se recomienda utilizar áridos no superiores a 20 mm (ACI-Committee-544 1993).

#### 2.4.1. Propiedades del hormigón fresco

La consistencia de un hormigón es la aptitud de este para conservar las posiciones relativas de sus componentes en estado fresco, en este sentido es sinónimo del término, quizás más gráfico, de “cohesión”.

En estudios realizados se ha constatado que la consistencia de hormigón resulta afectada negativamente en función del volumen de fibras adicionado y su esbeltez (Yazici, Inan et al. 2007).

La medida de la consistencia de un hormigón tradicional se realiza mediante el cono de Abrams. Sin embargo en los HRF no es el método más adecuado, recomendando utilizar otros procedimientos más dinámicos con algún método normalizado de vibrado, tal como ocurre con el consistómetro Vebe y el ensayo del cono invertido.

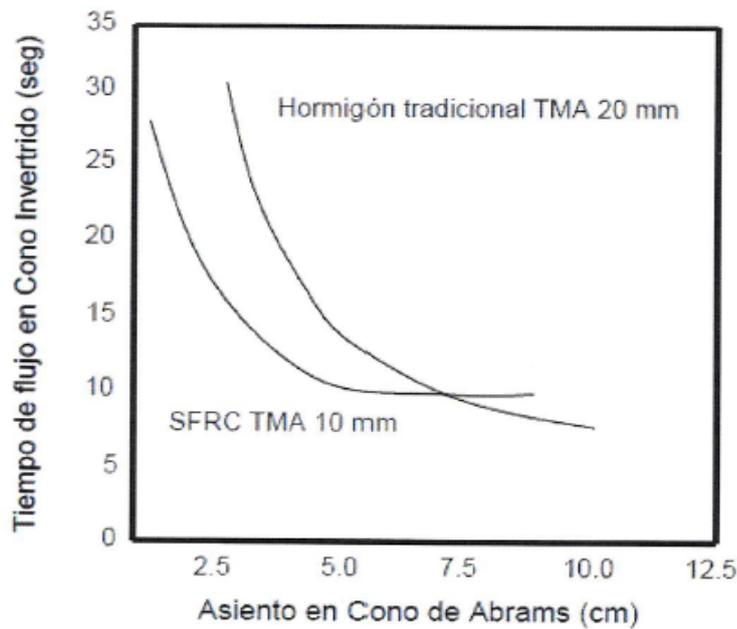


Imagen 2.9 Correspondencia de valores de Cono de Abrams y Cono invertido (Ache,2000)

En la Imagen 2.9 puede observarse la correspondencia de valores del cono invertido y los valores de asiento en cono de Abrams, donde para un mismo asiento en el cono de Abrams, el tiempo de vibrado en el cono invertido de un HRF es menor que el de un hormigón tradicional.

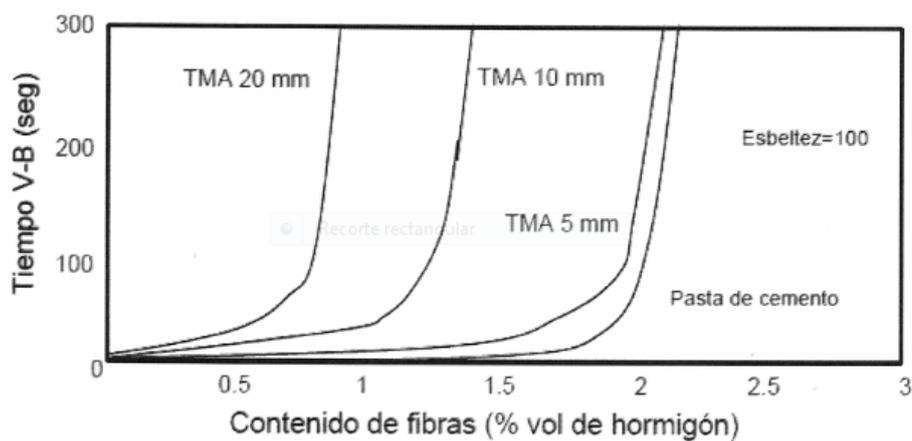


Imagen 2.10 Influencia del tamaño máximo del árido sobre la consistencia (Ache, 2000)

La Imagen 2.10 muestra la influencia del tamaño máximo del árido y el contenido de fibras sobre la consistencia medida con el consistómetro

Vebe. Así se define como volumen crítico de fibras aquel valor que hace imposible la correcta compactación de los HRF.

### 2.4.2. Características mecánicas

La ejecución de ensayos de caracterización del HRF es el primer paso para conocer su comportamiento, sobre todo en régimen de postfisuración. Importantes dispersiones en los resultados obtenidos en la caracterización del material pueden afectar a los valores característicos a partir de los cuales se define el comportamiento del HRF.

Los hormigones reforzados con fibras de acero muestran una **resistencia a compresión** superior a la de un hormigón sin fibras, que depende del volumen de fibras introducidas en la masa del hormigón (Song and Hwang 2004).

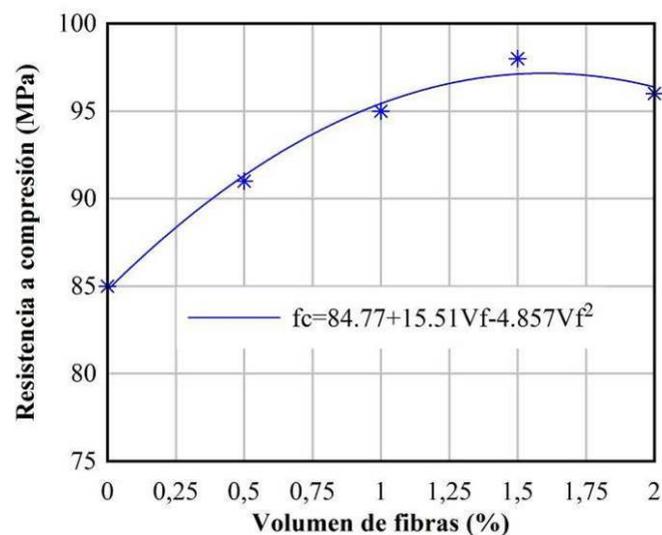


Gráfico 2.1 Efecto del volumen de fibras en la resistencia a compresión

Cuando el refuerzo se realiza con fibras de polipropileno, el incremento del porcentaje no genera variaciones en la resistencia a compresión. Valores superiores al 2% del volumen, generan hormigones con poca trabajabilidad e incluso con descensos en su resistencia a compresión

En los estudios realizados por Cachim (Cachim, Figueiras et al. 2002) se analiza el comportamiento de un hormigón convencional y un hormigón reforzado con fibras con dos tamaños de fibras, 30 y 60 mm de longitud.

Los resultados muestran que la resistencia a compresión del hormigón con fibras de 30 mm es un 17% mayor que el que no tiene fibras, mientras

que en el hormigón con fibras de 60 mm no muestran apenas variación con el que no contiene fibras. Sin embargo en cuanto a la deformación de la muestra en la carga máxima y la energía disipada (definida como el área bajo el diagrama de tensión-deformación después de la carga pico), se observó que las fibras se incrementaron ambas propiedades (Gráfico 2.2).

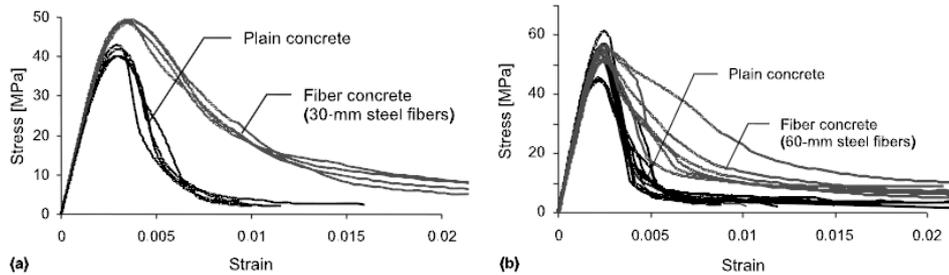


Gráfico 2.2 Diagrama tensión- deformación en un ensayo de compresión con HRF y hormigón sin fibras

En los hormigones jóvenes (antes de los 28 días) la capacidad de mantener la carga máxima a compresión se incrementa significativamente con la incorporación de fibras, a medida que el hormigón madura este incremento se reduce y la capacidad de absorción de energía y la ductilidad se concentran principalmente en la fase post- fisuración (Ding and Kusterle 2000).

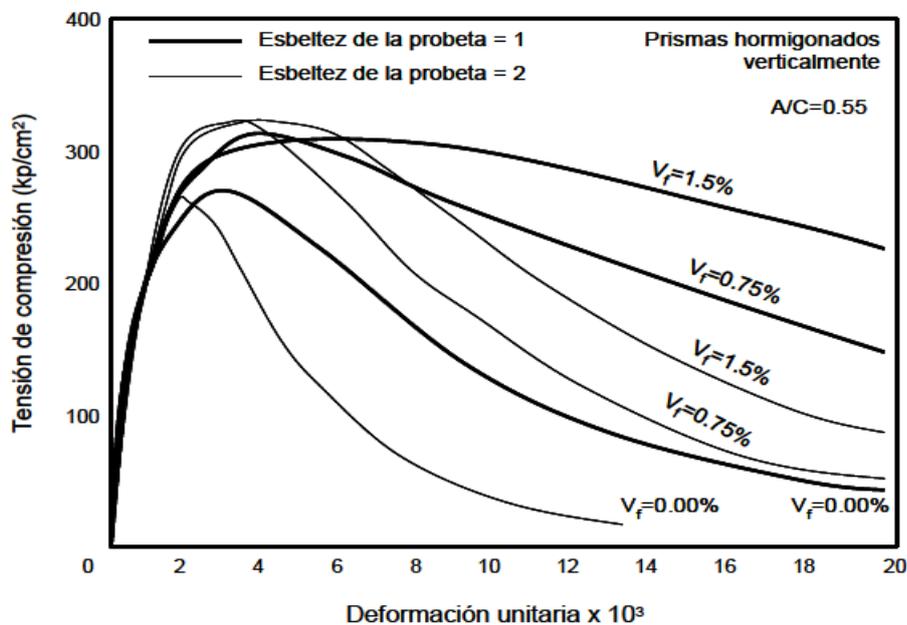


Imagen 2.11 Respuesta a compresión simple de HRF con diferentes dosificaciones de fibras y con diferente esbeltez de probetas (ACHE, 2000)

El tamaño o la esbeltez de las probetas tienen su influencia en los resultados a compresión, de tal forma que se obtienen mayores resistencias cuanto menor es el tamaño, debido a que se acentúa un alineamiento preferente de las fibras. El efecto se hace mucho más sensible a medida que se aumenta la longitud de la fibra. (ACI-Committee 2008). Probetas con mayor esbeltez soportan tensiones sensiblemente mayores, pero presentan respuestas menos dúctiles a compresión (Imagen 2.11). Se debe tener especial cuidado con estas situaciones para no generar falsos panoramas con resultados excesivamente optimistas.

En la **resistencia a tracción** del HRF el diagrama tensión-deformación a tracción directa, las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase pre-fisura respecto de la de un hormigón tradicional y, de forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debida al efecto de cosido que las fibras provocan entre los dos lados de la fisura.

Adicionando fibras en un 1,5% en volumen en hormigones y morteros, se obtienen incrementos en la resistencia a tracción directa del orden del 30 al 40% (ACI-Committee-544 1996).

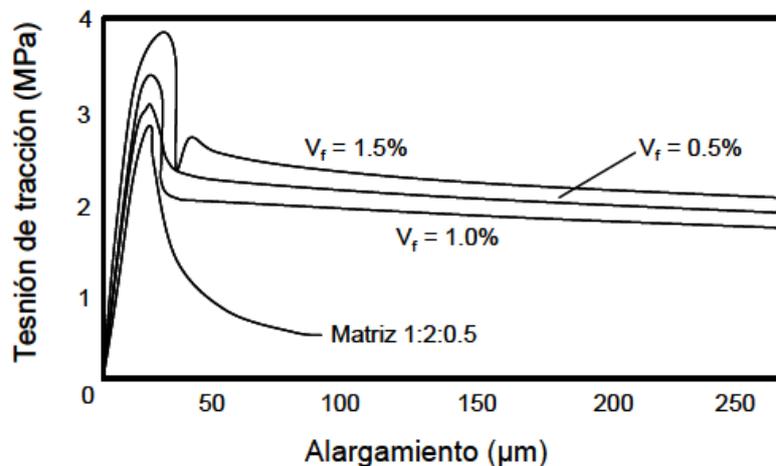


Imagen 2.12 Curvas de tracción- alargamiento de morteros con fibras en tracción directa (ACHE 2000)

La mejora de la **resistencia a flexotracción** al incorporar fibras en el hormigón es mayor que el de la resistencia a compresión y a tracción.

Este incremento es debido al comportamiento dúctil del hormigón con fibras que en la zona de tracciones modifica la distribución elástica del diagrama tensión-deformación. La distribución de tensión en la zona traccionada es básicamente plástica, mientras que en la zona de compresión es elástica.

Los ensayos de flexotracción se realizan principalmente sobre probetas prismáticas, determinado la resistencia a rotura por flexotracción, la resistencia a primera fisura y la resistencia residual a flexotracción.

El incremento de la resistencia a primera fisura obtenido con la adición de fibras de acero es mínimo, lo cual indica que esta propiedad depende básicamente de la matriz y muy poco del contenido de fibras, del tamaño y de la forma de éstas, por lo que resulta más rentable mejorar las características de la matriz con el uso de, por ejemplo, aditivos, humo de sílice, entre otros (ACHE 2000).

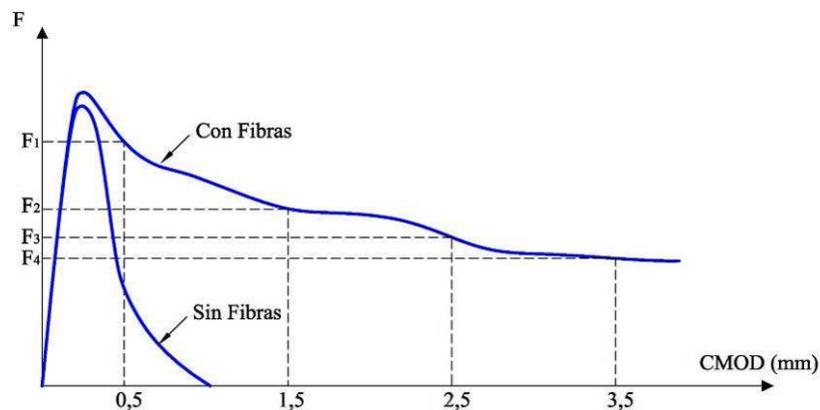


Imagen 2.13 Resultado de un ensayo a flexotracción de HRF y del hormigón sin fibras

Existen dos ensayos normalizados para obtener el valor de resistencia a flexotracción. Ambos están recogidos en sendas normas UNE 83509:204 “Ensayos de hormigón con fibras. Rotura por flexotracción” y UNE-EN 14651:2007+A1 “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)”. La instrucción española define la característica mecánica de un hormigón reforzado con fibras metálicas a partir de los ensayos de flexotracción obtenidos según la norma EN 14651, la cual está basada en la recomendación Rilem TC 162-TDF “Test and design methods for Steel fibre reinforced concrete”.

Existen otros tipos de ensayos normalizados recogidos en diversas normativas para obtener la resistencia a flexotracción, que se recogen en la tabla siguiente:

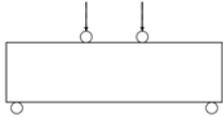
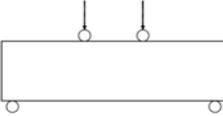
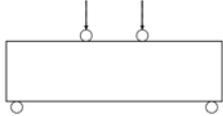
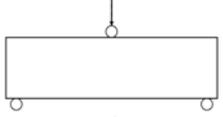
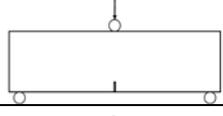
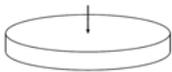
Ensayo	Esquema	Dimensiones (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Velocidad de carga (mm/min)
Ensayo de viga con carga a tercios (ASTM C-1018)		35x10x10	3.500	8,40	0,05-0,10
Ensayo de viga con carga a tercios (NBN B 15-238)		(60-75)x15x15	16.875	40,50	0,3-0,7
Ensayo de viga con carga a tercios (EFNARC)		55x7,5x12,5	5.156	12,37	0,25-1
Ensayo de viga centrada		55x7,5x12,5	5.156	12,37	0,25-1
Rilem 3-point bending test		(55-60)x15x15	12.375	29,70	0,05-0,2
Ensayo panel EFNARC		60x60x10	36.000	86,40	1,5
Round determinate panel test		7,5xØ80	37.770	90,65	4

Tabla 2.11 Comparativa de ensayos a flexotracción

La **resistencia al impacto**, como capacidad de absorción de energía dinámica, es una de las propiedades que más contribuye el aporte de fibras en el hormigón. Los ensayos y procedimientos de medición son varios y se pueden diferenciar dependiendo del mecanismo de impacto y los parámetros a medir durante el ensayo, siendo los más utilizados:

- Prueba de impacto mediante el Péndulo Charpy.
- Impacto con maza normalizada.
- Barra de Hopkinson.
- Impacto de proyectiles.

La utilización de unos u otros dependerá de la utilización del HRF que se proponga y de la cantidad de fibras aportadas al hormigón. En hormigones con dosificaciones en volumen de fibras por debajo del 1% para utilizarlos

en pavimentos el ensayo más utilizado es el de la maza normalizada, ensayo sencillo que consiste en determinar el número de golpes necesarios para causar un determinado nivel de daño en la probeta causada por la caída desde una altura también normalizada de la maza.

Este ensayo está normalizado en la norma UNE 83514 (Aenor 2005) y sirve para determinar la influencia de diferentes volúmenes y tipos de fibras en el comportamiento del hormigón.

En investigaciones realizadas por Khaled Marad et al (Marar, Eren et al. 2001) comprobaron que al aumentar el contenido de fibras, aumenta también la resistencia al impacto para todo tipo de fibras y con un volumen de fibras del 2% y con relaciones l/d en las fibras de ( 60, 75 y 83), aumentan la resistencia al impacto respecto al hormigón sin fibras en más de 38, 55 y 75 veces respectivamente.

Posteriormente otros investigadores (Wang, Liu et al. 2008) (Mohammadi, Carkon-Azad et al. 2009) llegaron a conclusiones muy similares en sus estudios.

En los hormigones reforzados con fibras (HRF) **la tenacidad** o capacidad de absorber energía ha sido reconocida como otro de los beneficios más importantes de la aportación de fibras, mejorando el comportamiento ante la fractura, al impacto y a la fatiga (Gopalaratnam and Gettu 1995).

Idealmente, la tenacidad del HRF ante esfuerzos a tracción se debería cuantificar a través del ensayo de tracción directa o tracción uniaxial. Sin embargo, la dificultad de ejecución de este ensayo impide su uso, y por consiguiente, se recomienda determinar la tenacidad del HRF a través del ensayo de flexión, que además de ser simple, representa las condiciones de carga de muchas aplicaciones del HRF (ACI-Committee-544 2008).

Resulta necesario el conocimiento de la tenacidad en el caso de hormigones reforzados con fibras. Este parámetro está relacionado fundamentalmente con el comportamiento del material post-fisuración, es decir, una vez alcanzada la carga máxima de fisuración soportada por este. Por ello, es preciso conocer el comportamiento del hormigón desde la carga de fisuración hasta su rotura.

La ciencia de los materiales define la tenacidad como la energía total que es capaz de absorber un material antes de que este alcance la rotura. Para conocer este parámetro se mide el área bajo la curva carga-

desplazamiento (Imagen 2.14), siendo una unidad típica de este valor el Joule o  $N \cdot mm$ .

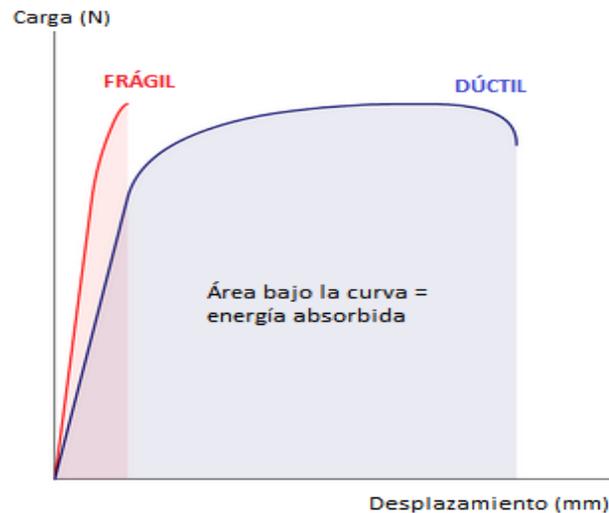


Imagen 2.14 Curva carga-desplazamiento

La tenacidad es un parámetro asociado en origen a materiales dúctiles como el acero, sin embargo, actualmente es cada vez mayor la normativa y los modelos matemáticos que pretenden caracterizar al comportamiento relativo a la tenacidad de materiales frágiles, siendo este el caso del hormigón.

El hormigón reforzado con fibras presenta un comportamiento intermedio entre frágil y dúctil, siendo las fibras las que contribuyen a una mayor ductilidad del material.

Cada vez son más frecuentes los estudios relativos a la tenacidad de hormigones reforzados con fibras. V. Hernando Gaitán (Hernando Gaitán Rodríguez 2013) es su Tesis Doctoral estudia el comportamiento de un hormigón de alta resistencia reforzado con fibras metálicas en un porcentaje 0, 20, 40, 60 y 80  $Kg/m^3$  de hormigón. Para determinar las características a tenacidad sigue la norma española UNE 83510 y concluye que se alcanza el valor óptimo de tenacidad para un contenido de fibras entre 60-80  $Kg/m^3$ , no siendo proporcional la mejora de estas propiedades a medida que aumenta la cantidad de fibras en el hormigón.

Por otro lado, en un estudio realizado por Figueroa A. (Figueroa Andrade 2013), se compara el comportamiento a tenacidad de un hormigón convencional, un hormigón reforzado con un 0,33% de fibras de acero y, el último, con un 0,33% de fibras de polipropileno, respecto del volumen total

de hormigón. Los resultados obtenidos muestran que el hormigón con fibras de acero proporciona la mayor energía de fractura, incremento de la resistencia a compresión, tracción, fatiga y esfuerzo cortante. Además, las fibras de polipropileno contribuyen a la resistencia al fuego, a diferencia de las de acero.

En otra investigación, llevada a cabo por Marmol Salazar (Mármol Salazar 2010), se concluye que las fibras de polipropileno no son aplicables estructuralmente, pero si contribuyen a mejorar la resistencia al impacto y a disminuir el rebote en hormigones proyectados. Con la adición de fibras metálicas el hormigón cambia de comportamiento frágil a dúctil en los ensayos de compresión y flexotracción. Por último, hace referencia a que el volumen de oxidación de las fibras metálicas no da lugar a tensiones en el hormigón, sin embargo esta no progresaría al no haber continuidad entre las fibras, en cualquier caso estas podrían sustituirse por fibras de acero galvanizado o de acero inoxidable.

G. Melián et al. (Melián, Barluenga et al. 2010) han publicado un artículo acerca de la influencia de fibras cortas de polipropileno en hormigones autocompactantes. Emplean tres tipos diferentes de fibras que varían de 12 a 40 mm de longitud y su dosificación varia de 0,2 – 2 % respecto del volumen de hormigón. Finalmente se obtienen los mejores resultados en cuanto a módulo de ruptura e índices de tenacidad, para el hormigón que incorpora un 2% de fibras de polipropileno con la menor longitud de éstas (12 mm).

**Caracterización de los materiales**

## **Capítulo III**



## **3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

### **3.1. ÁRIDOS SIDERÚRGICOS**

Los áridos utilizados en esta Tesis Doctoral proceden de la planta siderúrgica de Corrugados Azpeitia S. A. localizada en Azpeitia (Guipúzcoa) donde el proceso de tratamiento al que son sometidas las escorias negras para su transformación en áridos siderúrgicos pasa por las siguientes etapas:

- Vertido en fase de escorias
- Enfriamiento por aspersión de agua y volteo de la escoria durante un periodo aproximado de 48 horas
- Trituración previa para reducir el tamaño original de la escoria
- Separación y retirada de las fracciones superiores a 180 mm, que son devueltos a la trituración previa
- Retirada de los materiales férricos mediante electroimanes
- Clasificación del material granular al pasarlo por las cribas de diferentes tamaños
- Almacenamiento en silos del material clasificado

Los áridos siderúrgicos han sido aportados por la empresa HORMOR Áridos, del grupo Hormigones y Morteros Agote situada en Zestoa (Guipúzcoa), y se han suministrado en sacas de 1 m<sup>3</sup> de capacidad en los tres tamaños granulométricos siguientes:

- Arena de escoria 0/4 mm
- Grava fina de escoria 4/10 mm
- Grava gruesa de escoria 10/20 mm

#### **3.1.1. Toma de muestras**

En la toma de muestras para que el análisis de las diferentes características ofrezca resultados fiables, se ha seguido lo dispuesto en la Norma UNE EN 932 -1 "Ensayos para determinar las propiedades de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo (Aenor 1997). Para evitar desviaciones en el muestreo debidas a la variedad de lotes, las muestras se deben tomar en diferentes puntos y a distintas profundidades del

conjunto del apilamiento. Siguiendo las indicaciones de la norma anteriormente indicada, antes de efectuar la toma de muestras se retiró de la superficie del acopio una parte del acopio correspondiente a una profundidad como mínimo de dos veces la del tamaño mayor del árido. Posteriormente se introduce la pala inmediatamente encima del punto de muestreo sin que se produzca segregación del árido.

### 3.1.2. Caracterización morfológica

Los áridos siderúrgicos utilizados esta tesis doctoral muestran una tonalidad que va desde el gris claro hasta el gris muy oscuro, pasando por tonos marrones que corresponden a pequeñas incrustaciones de hierro oxidado en forma de partículas que se presentan en los fragmentos de más de 10 mm. En cuanto a la forma presentan baja esfericidad con textura rugosa y muy cavernosa, apreciándose algunas zonas más suaves.

En las imágenes siguientes, Imagen 3.1, Imagen 3.2 e Imagen 3.3 se aprecia la morfología de las correspondientes fracciones de EAF.

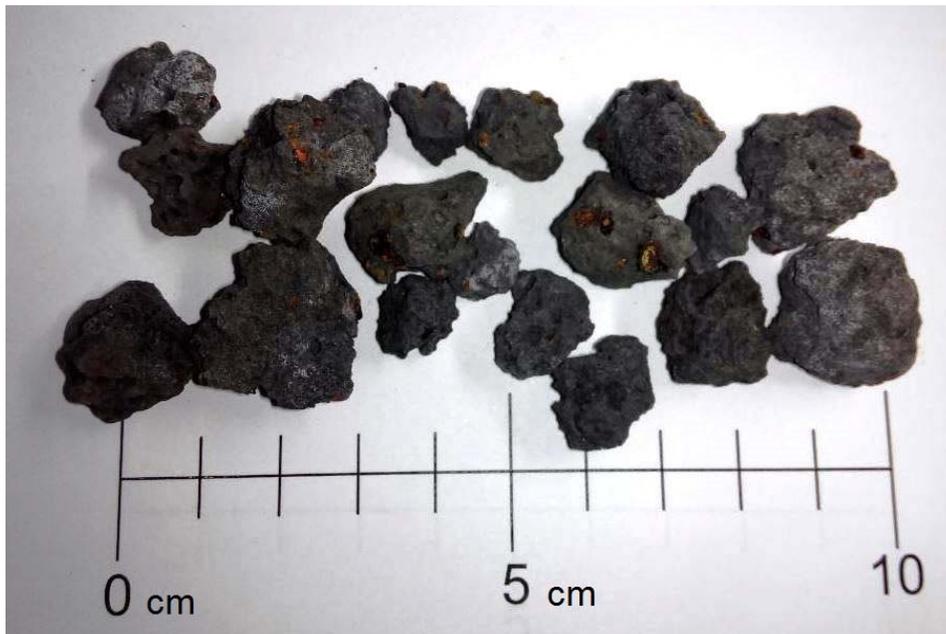


Imagen 3.1 Muestra de grava gruesa de EAF

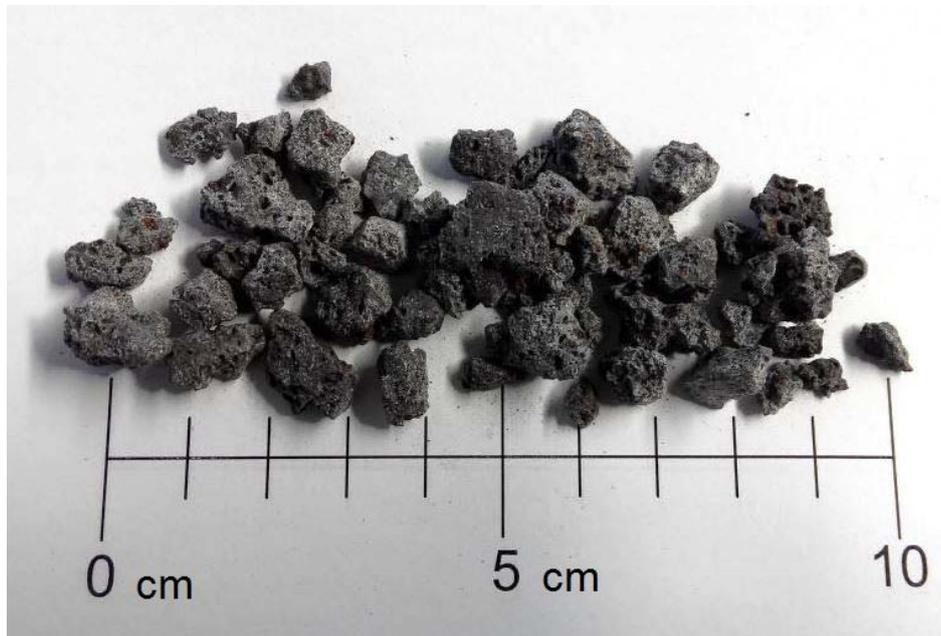


Imagen 3.2 Muestra de grava fina de EAF

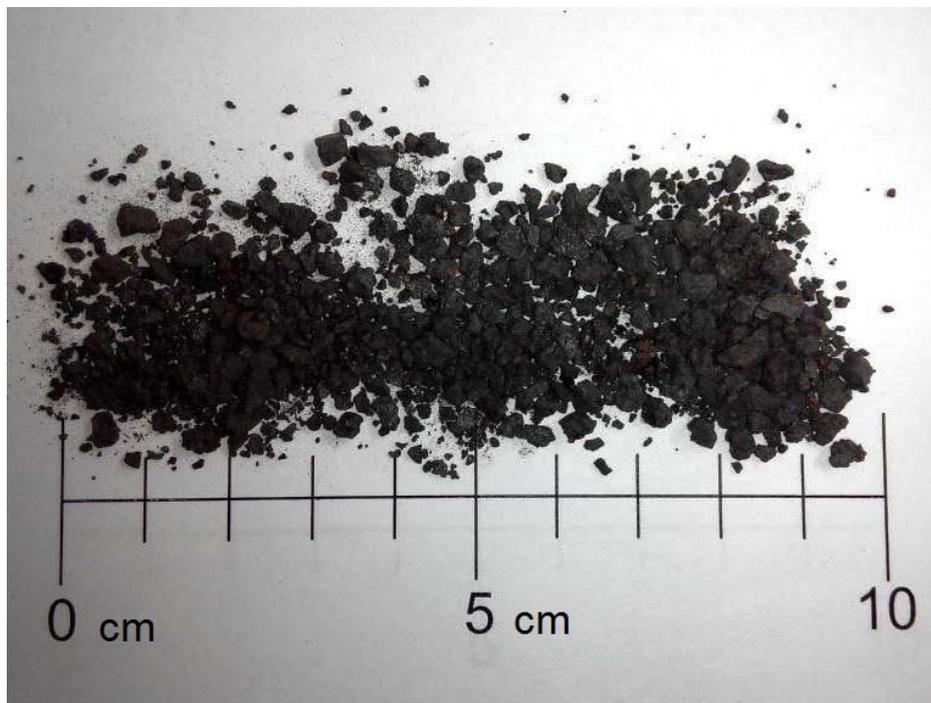


Imagen 3.3 Muestra de arena de EAF

### 3.1.3. Caracterización química

La caracterización química de la escoria negra ha sido realizada mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) y de combustión y detección de infrarrojos (IR).

#### 3.1.3.1. Fluorescencia de rayos X (FRX)

La caracterización química de las diferentes muestras de árido siderúrgico se llevó a cabo mediante fluorescencia de rayos X (FRX) con el fin de determinar sus componentes principales (hierro, calcio, aluminio, magnesio, manganeso, oxígeno), así como otros componentes secundarios cuyos contenidos se encuentran limitados (sulfatos totales, sulfatos solubles, sulfatos, cloruros) y otros de interés adicional (C, P, Na, Ti, Cr, Ni, Pb, Cu, Hg) junto a la cal libre.

Los datos obtenidos en el ensayo de espectrofotometría por fluorescencia de rayos X (XRF) se recogen en la Tabla 3.1.

Muestra	Escoria fina	Escoria media	Escoria gruesa	Media
<b>CaO</b>	27,9	27,3	27,9	<b>27,70</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	27,0	26,7	26,8	<b>26,83</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	19,1	19,0	19,2	<b>19,10</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13,5	13,9	13,8	<b>13,73</b>
<b>MnO</b>	5,4	5,6	5,1	<b>5,36</b>
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,5	2,8	2,2	<b>2,48</b>
<b>MgO</b>	2,4	2,5	2,7	<b>2,53</b>

Tabla 3.1 Fluorescencia de rayos X de EAFS

Si se analizan los datos obtenidos se puede apreciar que los componentes mayoritarios son óxidos de hierro, cal, sílice y alúmina, que constituyen una media del 87% de la composición total. Cabe, por tanto, suponer que estas escorias negras poseen varias fracciones minerales principales: óxidos de hierro y silicatos y aluminatos de cal.

Estas fracciones principales vienen acompañadas minoritariamente otros óxidos, como magnesia, óxido de cromo y manganeso.

El contenido de oxígeno es elevado y prácticamente todo el material de la escoria negra son óxidos simples o combinados.

Se aprecia un pequeño contenido de carbono en estado grafitico proveniente de la adición para el espumado, aunque la mayor parte del mismo viene dada por la carbonatación de la cal libre superficial de las piezas de escoria que, en nuestro caso y de modo circunstancial, ha sido más intensa en la muestra de tamaño medio analizada.

También existe una pequeña fracción ( $\approx 1\%$ ) de óxidos (alcalinos y de titanio) procedentes del soplado con oxígeno del caldo fundido de chatarra y prerreducidos.

### 3.1.3.2. Combustión y detección por infrarrojos (IR)

La determinación del análisis del carbono y del azufre se ha realizado mediante la técnica de combustión y detección de infrarrojos (IR) cuyos resultados se muestran en Tabla 3.2.

Muestra	% C	% S
Escoria fina	0,33	0,109
Escoria media	1,11	0,108
Escoria gruesa	0,05	0,125

Tabla 3.2 Valores medios en % de C y S mediante combustión y detección de infrarrojos (IR)

Se aprecia bastante variación en los valores de carbono en las distintas fracciones que oscilan entre el 1,11% en la fracción media hasta el 0,05% en la gruesa asociada a la carbonatación de la cal libre, mientras que los valores de contenido de azufre son más homogéneos entre el 0,125% de la fracción y el 0,108% de la media.

### 3.1.3.3. Contenido de cal libre y magnesia

Otro análisis de especial importancia en la estabilidad volumétrica y dimensional de la escoria negra es la determinación de los contenidos de cal libre y magnesia total. Para la primera de ellas existe un ensayo específico que a continuación se describe, en tanto que para la segunda, a falta de ensayo específico, se atenderá al análisis químico global.

Para la obtención de los contenidos en cal libre se ha seguido la Norma Europea UNE-EN 1744-1 “Ensayo para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 Análisis químico” (Aenor 2010) que recoge tres formas de determinación de la cal libre en las escorias de fundición de acero. Dentro de los métodos propuestos, se ha optado por la determinación de la cal libre por conductimetría, que consiste en extraer la

cal libre de una muestra de árido de escoria negra molida por medio de etanodiol caliente y el contenido en iones calcio de la disolución se determina, a continuación, por conductancia.

Se toma como porción de ensayo (100±0,1) mg de escoria negra EAF molida que haya pasado por el tamiz de 0,063 mm. Se precalientan 100 ml de etanodiol a (80±0,5°C) en un vaso de medida con la ayuda de un termostato y un agitador magnético y se añade la porción de ensayo a este disolvente introduciendo el electrodo de medida. Se mide la conductancia durante el proceso de extracción hasta que ya no se produzca ninguna variación.

Para la expresión de los resultados se realiza la conversión de la conductancia medida al contenido de cal libre (Tabla 3.3) utilizando la curva de calibración (Imagen 3.4) y así determinar la concentración de cal libre presente en la muestra.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.4.

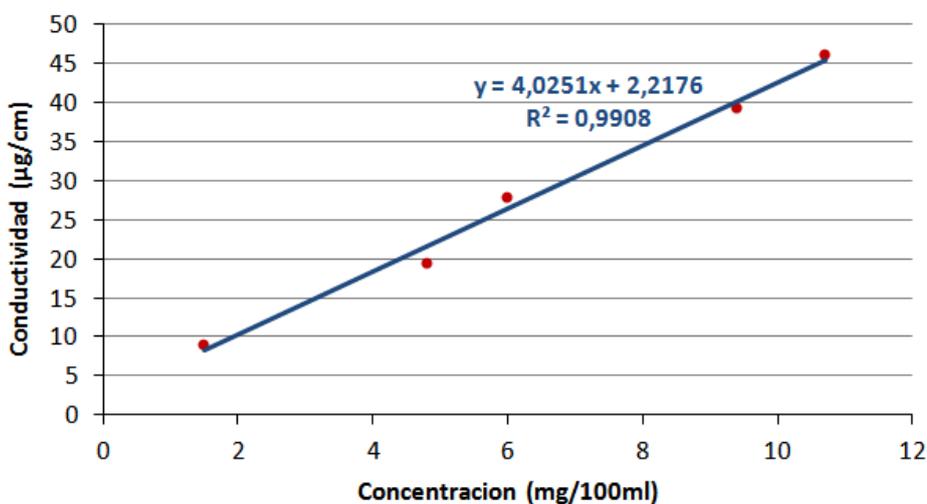


Imagen 3.4 Curva de calibración (concentración/conductancia)

Recta de calibrado del óxido de calcio					
<b>Concentración CaO (mg/100ml)</b>	10,70	9,40	6,00	4,80	1,50
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	46,00	39,20	27,90	19,50	8,90

Tabla 3.3 Valores de concentración CaO y conductividad para la curva de calibración

Determinación de la cal libre por conductimetría	Muestra	
	1	2
Peso (mg)	100,50	99,90
Conductividad disolvente ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1,50	1,67
Conductividad muestra ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	4,12	4,31
Conductividad calcio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	2,62	2,64
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	80,50	80,10
Concentración (mg/100ml)	0,09997	0,10494
Concentración total (% respecto de la muestra)	0,099%	0,105%

Tabla 3.4 Concentración de cal libre en AEF

De acuerdo con la experiencia acumulada en la realización de este ensayo según UNE 1744-1 se obtiene un contenido algo superior en el conjunto de cal libre (lima, CaO) más portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). El resultado final es siempre por exceso puesto que es inevitable una ligera solubilización adicional de CaO procedente de los silicatos o aluminatos más sensibles al ataque en caliente del etanodiol. Esta estimación está siempre, por tanto, del lado de la seguridad. El contenido medio de **Cal libre** resultante del ensayo de las muestras está en torno al **0,1%**.

No hay ninguna normativa que especifique el contenido mínimo de cal libre para utilizar los áridos siderúrgicos como áridos en la elaboración del hormigón, la norma más cercana se encuentra para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco (2006) que establece que el contenido de cal libre del árido EAFS, obtenida por este método, ha de ser inferior a 0,5% y como normativa internacional está la ASTM D 4792 "Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions" (ASTM 2006) que también establece para los áridos siderúrgicos el límite de expansividad < 5% y para áridos combinados < 0,5%, dentro de lo que establece la Norma AASHTO M 147-70 "Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base and Surface Courses" (AASHTO 1980).

En fechas recientes algunos autores, miembros de este equipo de investigación ubicados en la Universidad de Burgos y en la Universidad del País Vasco, afirman que existe una fracción de cal libre fuertemente enclaustrada en la escoria negra EAFS, que no es visible para este tipo de análisis. Por tanto, de acuerdo con tales postulados, no se puede ni siquiera afirmar con total certeza que en ese ensayo se esté siempre del lado de la seguridad. No obstante, las Normas de carreteras citadas aluden

al ensayo anterior y, por ello, las mencionamos y utilizamos como si fueran correctas.

En cuanto al contenido en **magnesia total**, según el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), este valor se sitúa en torno al **2,5%** de media, lo que hace prever una fracción de magnesia libre (periclasa, MgO) o hidratada Mg(OH)<sub>2</sub>) muy baja, puesto que la mayor parte de ella se encontrará combinada en forma de silicatos o con óxido de hierro.

#### 3.1.3.4. Ensayo de sulfato de magnesio

El procedimiento descrito en este apartado sigue las prescripciones de la norma UNE-EN 1367-2 “Ensayo para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio” (Aenor 2010). En él se somete a las muestras de árido a esfuerzos repetidos producidos por las cristalizaciones y rehidrataciones de sulfato de magnesio en los huecos del árido.

Se tamizan dos muestras de árido con una granulometría específica, se lavan con agua destilada, se dejan escurrir y se secan en la estufa. Se repite la operación de tamizado y se registran las masas (M1) (Imagen 3.5).

Posteriormente, se sumergen las muestras en una solución saturada de sulfato de magnesio durante un periodo de  $17 \pm 0,5$  h.

Tras la inmersión, se extraen y escurren las muestras durante  $2 \pm 0,25$ h, se secan en la estufa a temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24h y finalmente, se dejan enfriar en el laboratorio a  $20^\circ\text{C}$  durante  $5 \pm 0,25$ h.

Con anterioridad a la siguiente inmersión se disuelve cualquier cristal de sal que se haya podido depositar en el fondo del recipiente, agitando la solución y dejando reposar 30 min.

El ciclo descrito se repite cinco veces, con una duración de  $48 \pm 2$ h cada ciclo. Al finalizar los cinco ciclos, se lava el árido hasta que este quede desprovisto de sulfato de magnesio, se seca, se tamiza con el tamiz de 10 mm y se registra la masa del árido retenido en el tamiz (M2).



Imagen 3.5 Muestra para ensayo de sulfato de magnesio

La disgregación producida en las muestras se expresa como el porcentaje de disminución de masa que experimentan las muestras, respecto de la masa inicial.

Ensayo de Sulfato de Magnesio	Muestra	
	1	2
Masa inicial (M1, en g)	424,99	425,00
Masa final (M2, en g)	416,80	419,20
Pérdida de masa (MS, en %)	1,927%	1,365%
Pérdida de masa media (MS, en %)	1,646%	
Límites según EHE-08	≤ 18 %	

Tabla 3.5 Resultados del ensayo de sulfato de magnesio

La disminución de masa experimentada en la muestra ensayadas como se puede apreciar en los resultados de la Tabla 3.5, no alcanzan de media el **2%** muy inferior al límite de 18% marcado en la EHE-08 art 28.6, para cualquier tipo de árido grueso.

### 3.1.4. Caracterización mineralógica

La composición mineralógica de los áridos siderúrgicos, y en particular en este caso de las escorias negras, depende en gran medida de la velocidad de enfriamiento de la escoria en el proceso de fabricación del

acero. El ritmo de enfriamiento de la escoria negra de horno eléctrico es bastante lento en el foso o balsa de escorias debido al gran volumen de material en las pilas, por lo que el enfriamiento tarda varios días en producirse, a pesar de estar en marcha un regado por aspersión permanente que produce el cuarteo de la masa antes de retirarla. Esta velocidad de enfriamiento debe mantenerse lenta para que se forme una estructura cristalina de composición mayoritaria en la escoria.

De acuerdo con la bibliografía especializada y los resultados obtenidos de los diagramas de Rankin, los posibles componentes mineralógicos que constituyen la estructura interna de la escoria EAF son, básicamente, óxidos de hierro y silicatos y aluminatos de calcio y de magnesio.

#### 3.1.4.1. Difracción de rayos X (XRD)

El análisis cristalino de la escoria negra se llevó a cabo a través de la técnica de Difracción de Rayos-X sobre muestra en polvo del material.

Las escorias siderúrgicas poseen una parte o fracción cristalina y otra fracción no cristalina o vítrea, según haya sido su velocidad de enfriamiento. En nuestro caso, y debido al enfriamiento lento de la escoria, la fracción vítrea es irrelevante por su escasez.

Esta Tesis Doctoral no pretende la cuantificación la fase vítrea de las muestras, sino que se centra en el estudio de fases cristalinas sobre los diagramas de difracción o difractogramas de las muestras, que se adjuntan a continuación en las páginas siguientes.

Para la determinación de las estructuras cristalinas de las escorias negras se ha tenido en cuenta los resultados de los análisis químicos, y de la conclusión derivada de ellos referente a la existencia de dos grupos principales de compuestos, por un lado óxidos de hierro y por otro lado silicatos y aluminatos, se elaboró un estudio sobre los posibles compuestos presentes en el diagrama de Rankin o diagrama de fases  $Al_2O_3$ -CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> (o equivalentemente A-C-M-S).

Tomando del Slag Atlas [85] los gráficos pertinentes, conducen a una serie de diagramas de fase (S-C-M con alúmina al 10% y S-C-A para magnesia al 5% y al 10%), donde se observaron los rangos de composición química de las escorias con estos valores cerrando a cien: CaO= 55%, SiO<sub>2</sub>=25%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=MgO=10%.

Según la bibliografía especializada y los resultados obtenidos de los Diagramas de Rankin, los posibles componentes mineralógicos que constituyen la estructura interna de la escoria EAF son:

- Silicato bicalcico  $SC_2$
- Rankinita  $S_2C_3$
- Wollastonita SC
- Melilita  $S_2MC_2$
- Merwinita  $S_2MC_3$
- Montcellita SMC
- Forsterita  $SM_2$
- Piroxeno  $S_2MC$
- Espinela AM
- Eustatita SM
- Anortita  $S_2AC$
- Periclasa M
- Lima o Cal libre C
- Sílice S

Los difractogramas se realizaron en base a los valores de las distancias interplanares de los componentes cristalinos, tomadas de las referencias de identificación del índice de Hannawalt para los picos del ensayo de difracción de rayos-X.

La composición mineralógica se determina por la técnica de difracción de rayos X de las escorias en las tres fracciones del árido utilizadas en las amasadas, utilizando un equipo PHILIPS PW1729/40, con un tubo emisor anticátodo de cobre de longitud de onda  $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$ .

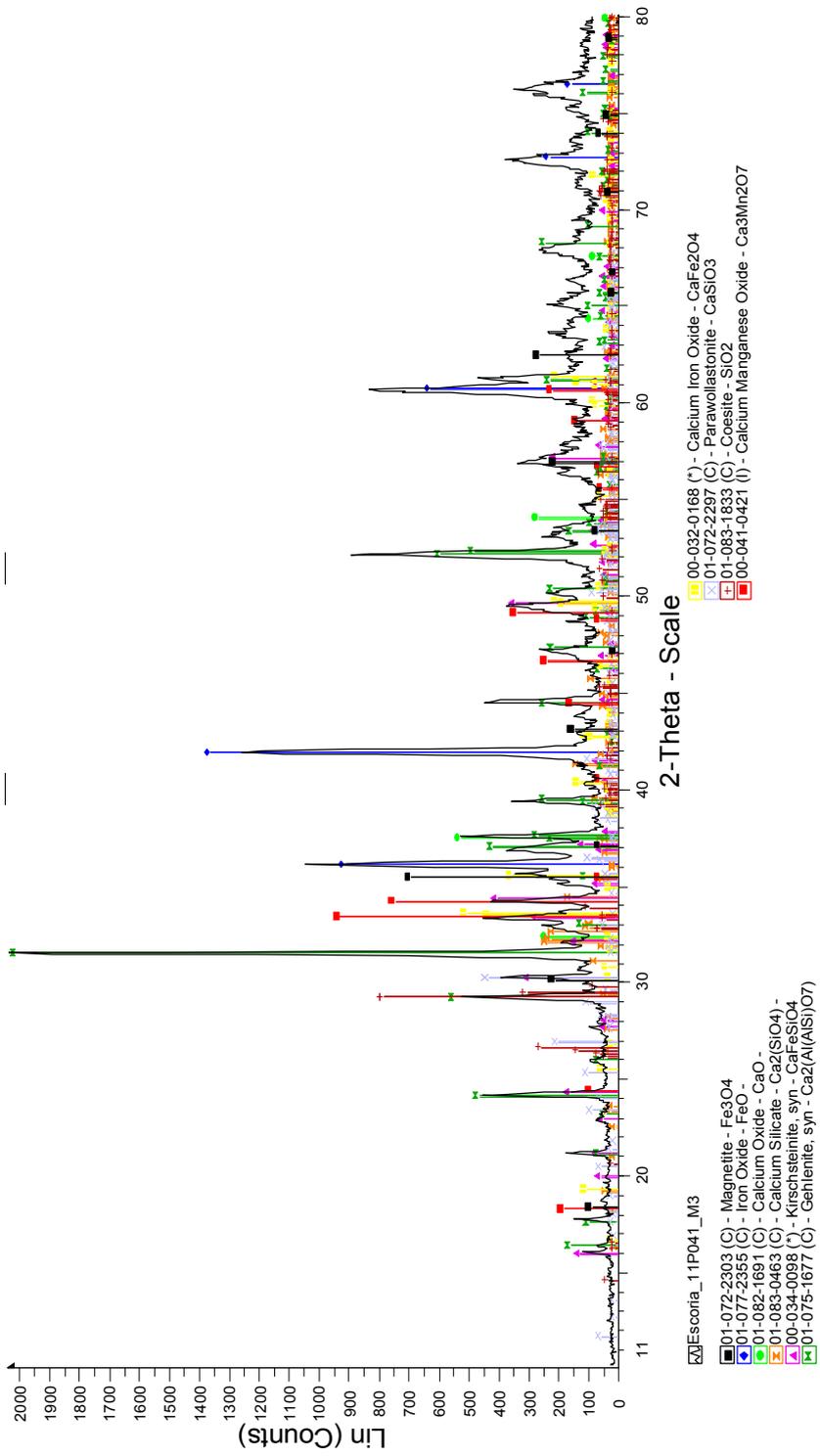


Imagen 3.6 Difractograma del árido grueso de EAF

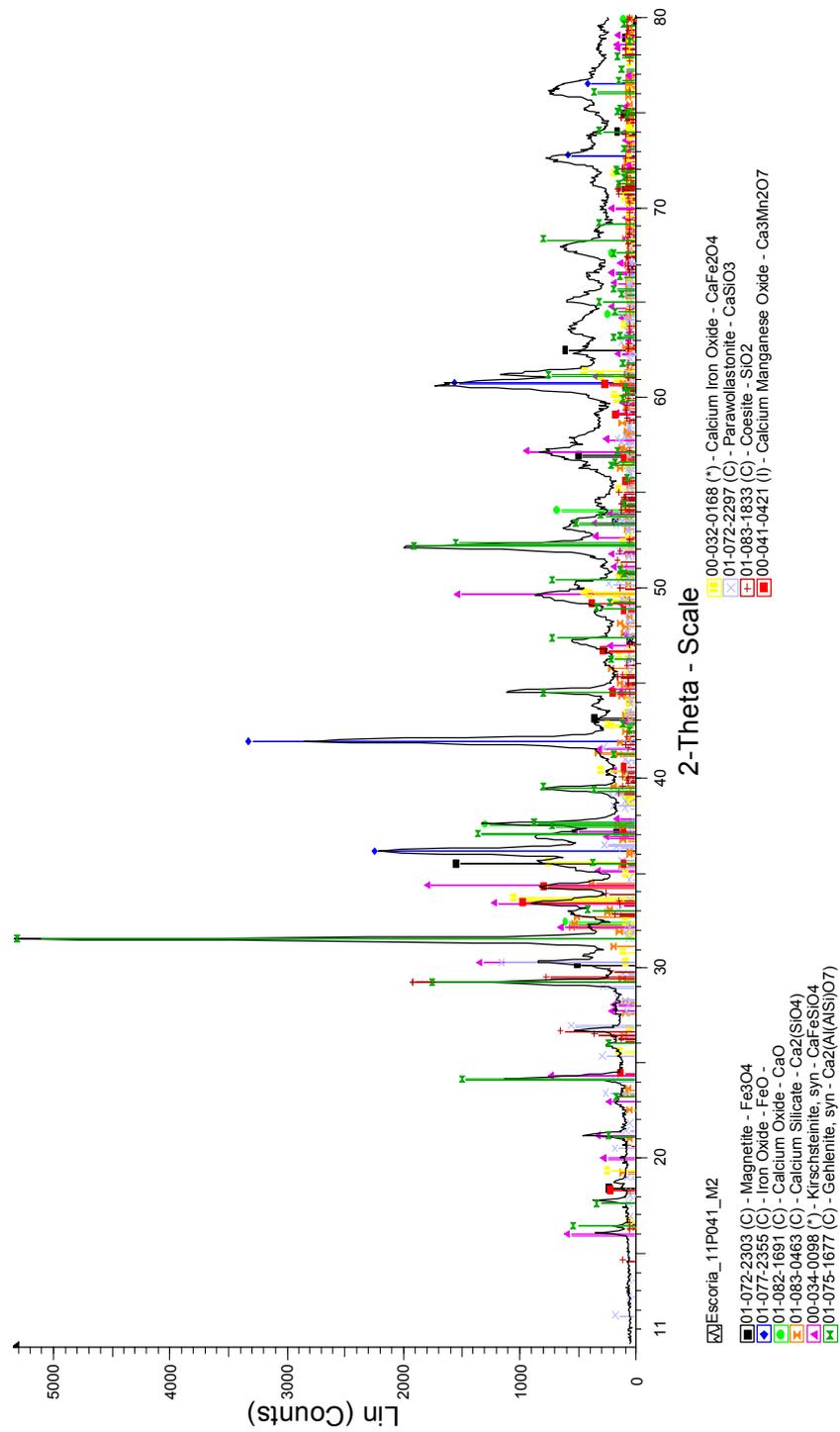


Imagen 3.7 Difractograma del árido medio de EAF

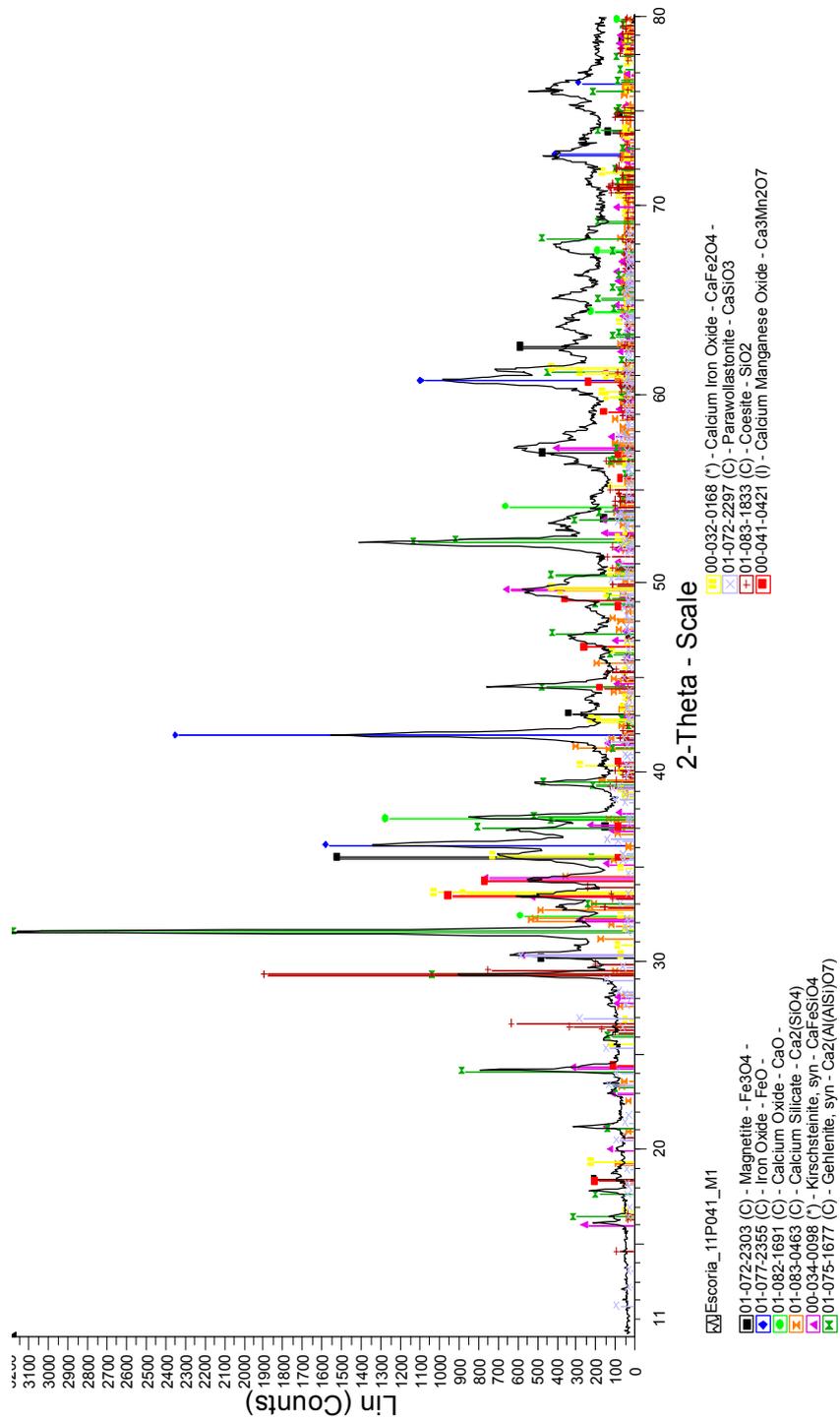


Imagen 3.8 Difractograma del árido fino de EAF

Las imágenes 3.6, 3.7 y 3.8, muestran los difractogramas de rayos X de las tres fracciones de la escoria negra EAF, mostrando en cada uno de ellos los componentes más importantes de cada una de las fracciones ensayadas. La proporción de estos compuestos presentes en cada una de las muestras se aprecian en la Tabla 3.6.

Mineral	Fórmula	Proporción		
		Muestra gruesa	Muestra media	Muestra fina
Gehlenita	$\text{Ca}_2(\text{Al}(\text{SiAl})\text{O}_7)$	Alta	Alta	Alta
Wustita	$\text{FeO}$	Alta	Alta	Alta
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Media	Media	Media
Coesita	$\text{SiO}_2$	Baja	Baja	Baja
Óxido de Calcio	$\text{CaO}$	Baja	Media	Media
Kirschtenita	$\text{CaFeSiO}_4$	Baja	Media	Baja
Óxido de Calcio Manganeseo	$\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$	Media	Baja	Baja
Silicato cálcico	$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$	Baja	Baja	Baja
Parawollastonita	$\text{CaSiO}_3$	Baja	Media	Baja
Óxido de hierro calcio	$\text{CaFe}_2\text{O}_4$	Baja	Baja	Baja

Tabla 3.6 Proporción de compuestos en las tres fracciones de EAF

A la vista de los resultados los componentes cristalinos obtenidos se pueden agrupar en dos grandes apartados: el de los óxidos de hierro y el de los silicatos, con predominio de cationes de calcio y aluminio.

De los óxidos de hierro que más destacan está en primer lugar la Wustita (óxido de hierro  $\text{FeO}$ ), seguida de la Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y en menor proporción aparece el óxido de hierro calcio ( $\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ).

Otros óxidos con presencia significativa son el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), que coexisten con el óxido de calcio manganeseo ( $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ ).

En el grupo de los silicatos predomina la Gehlenita o silicato de calcio y aluminio ( $\text{SiCa}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ ). Además, aparecen el silicato bicálcico ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), y otros silicatos como la Kirschteinita ( $\text{CaFeSiO}_4$ ) o la Parawollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ).

El contenido de cal libre (lima) es muy bajo y hay poca presencia del producto hidratado (Portlandita). El contenido de magnesia es muy escaso,

no apareciendo picos de magnesia libre (Periclasa) ni hidratada (Brucita), por lo que es despreciable en lo que se refiere al hinchamiento.

El resto de los compuestos cristalinos se muestran, en general, estables a lo largo del tiempo, con unos óxidos de hierro que se hidratan muy débilmente y cuya estabilidad es alta; y junto a ellos, unos silicatos cálcicos de los cuales alguna variedad de ellos (alita, belita, etc.) es susceptible de hidratación, pero sin variación apreciable en volumen, y dando lugar dicha hidratación a una mejora en las resistencias mecánicas y al desprendimiento de muy pequeñas cantidades de portlandita. No se ha observado tampoco variación importante asociada a la descomposición del silicato tricálcico.

### **3.1.5. Caracterización microestructural**

#### **3.1.5.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB)**

El estudio microestructural de la escoria negra EAF se efectúa mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), también denominada Scanning Electron Microscope (SEM). Esta técnica se utiliza para examinar la estructura microscópica de las muestras en la interfase y la cohesión en presencia y ausencia de residuos o materiales añadidos. El equipo de medida utilizado es un JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por rayos X.

Las observaciones realizadas por el microscopio se han producido a diferentes distancias de trabajo y en distintas zonas y se han completado con varios espectros de microanálisis por energía dispersa de rayos X sobre las zonas más significativas de la imagen de las muestras. Por ello, los resultados de los análisis de la morfología y de la composición química elemental de las escorias van emparejados.

Esta escoria posee como característica general estar formada por partículas de tamaño entre 2 y 20  $\mu\text{m}$ . no disgregadas, uniéndose entre ellas por formaciones cristalinas que provienen de la hidratación espontánea a la intemperie de alguno de los compuestos de la escoria nueva (silicatos bicálcicos y tricálcicos). Las partículas de escoria cuyo tamaño sobrepasa 10  $\mu\text{m}$ , están formadas por la mezcla de casi todos los componentes cristalinos identificados en ellas, de modo que su espectro de emisión de rayos X, dado por el microanálisis, coincide en sus picos y en el tamaño de los mismos con el análisis medio de la escoria tomado de modo general a pocos aumentos.

Sin embargo cuando se llevan a cabo observaciones y análisis sobre las partículas de menor tamaño o zonas concretas de las partículas grandes, comienza a apreciarse un predominio de ciertos compuestos cristalinos sobre otros en ellas. En primera instancia encontramos mayor o menor presencia de óxidos de hierro frente a silicatos, y en segunda instancia, dentro de estos últimos, predominio de cationes de calcio, aluminio o magnesio.

A continuación se muestran algunas imágenes captadas por el microscopio en las distintas fracciones del árido siderúrgico.

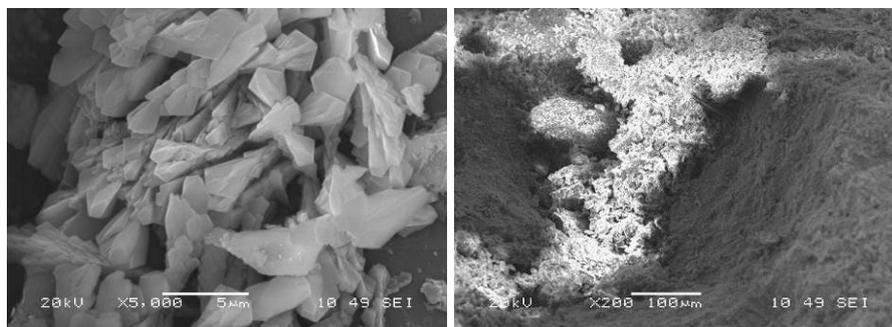


Imagen 3.9 Microscopía electrónica de barrido del árido grueso de EAF

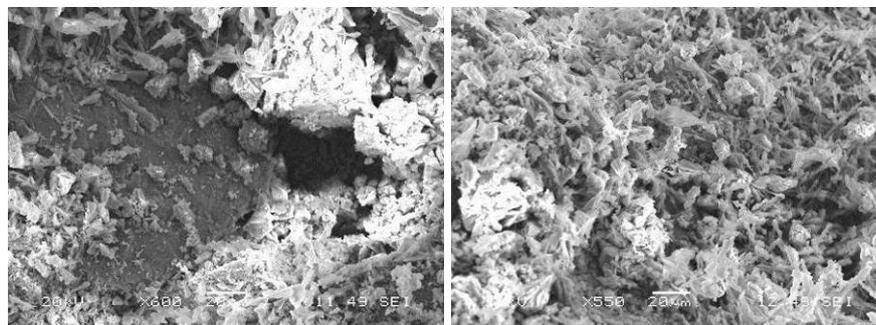


Imagen 3.10 Microscopía electrónica de barrido del árido medio de EAF

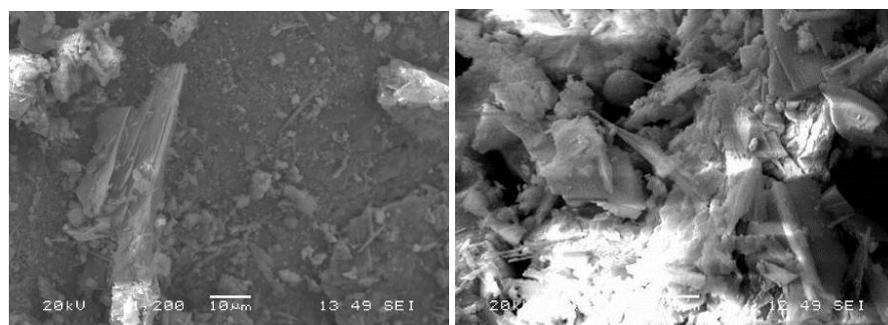
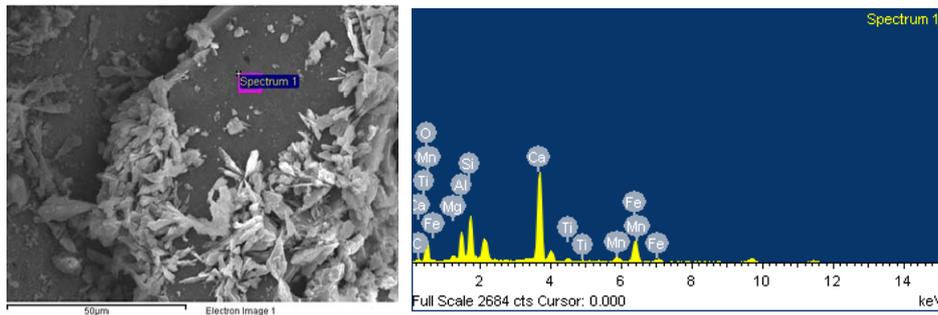


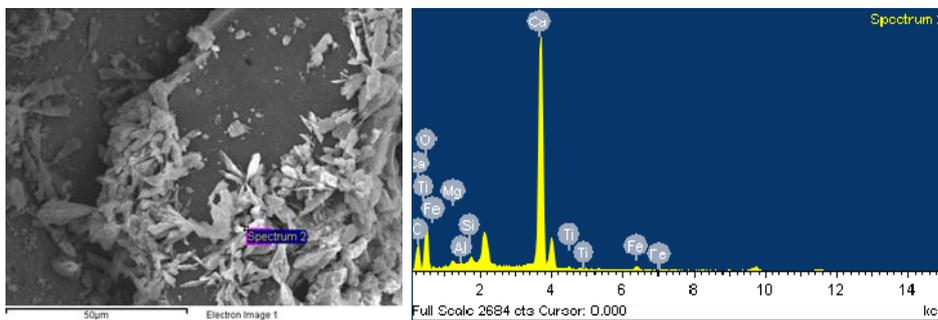
Imagen 3.11 Microscopía electrónica de barrido del árido fino de EAF

### 3.1.5.2. Microanálisis por energía dispersa de rayos X

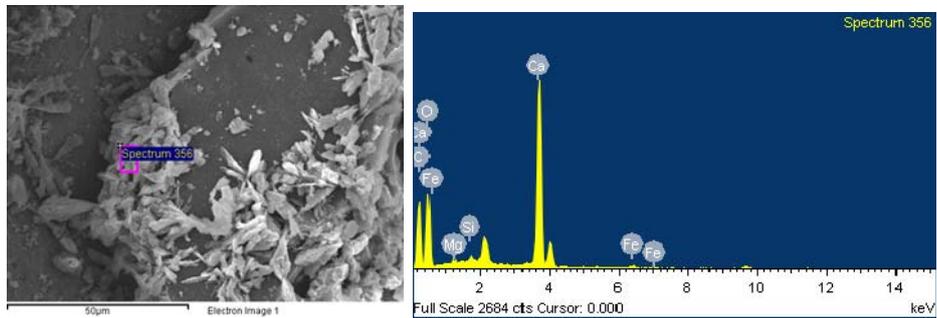
Se han analizado tres puntos de la zona 1 del árido grueso, otros dos de la zona 1 del árido medio y 4 de la zona 1 del árido fino con los siguientes resultados reflejados en las imágenes 3.12, 3.13 y 3.14 y en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9 adjuntas.



Spectrum 1 (zona 1) Escoria gruesa



Spectrum 2 (zona 1) Escoria gruesa



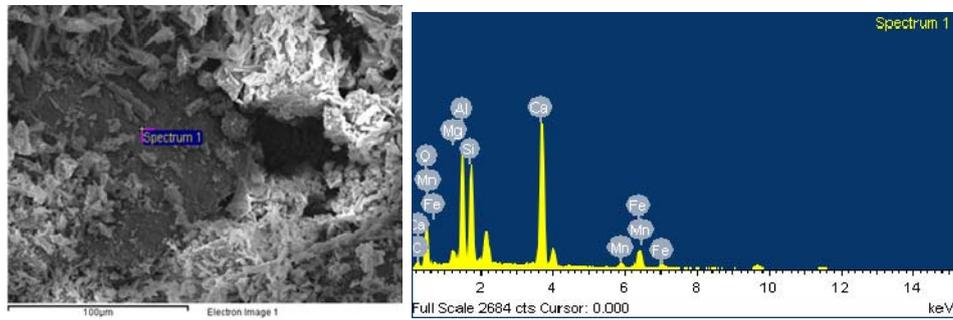
Spectrum 3 (zona 1) Escoria gruesa

Imagen 3.12 Microanálisis por energía dispersa de rayos X Escoria gruesa

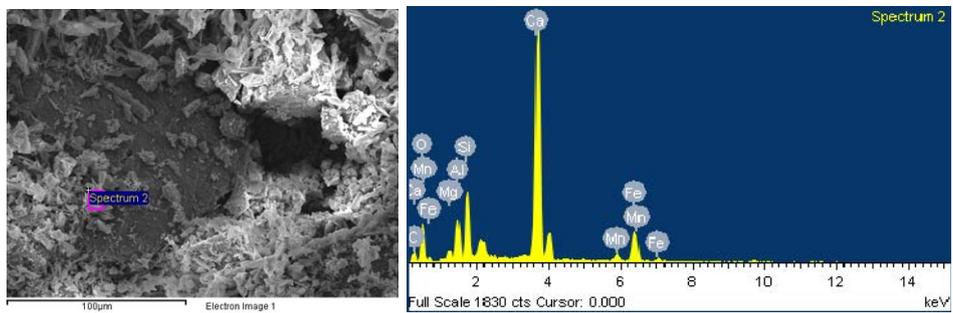
	Spec 1	Spec 2	Spec 3	Min.	Max.	Media
<b>C</b>	6,45	11,69	23,24	11,69	23,24	<b>13,80</b>
<b>O</b>	30,50	44,39	48,87	6,93	48,87	<b>41,26</b>
<b>Ca</b>	28,83	40,23	25,77	25,77	40,23	<b>31,61</b>
<b>Fe</b>	16,97	1,91	1,16	1,16	16,97	<b>6,68</b>
<b>Si</b>	9,42	0,58	0,47	0,47	9,42	<b>3,49</b>
<b>Mn</b>	3,38					<b>1,12</b>
<b>Mg</b>	1,16	0,50	0,49	0,49	1,16	<b>0,72</b>
<b>Ti</b>	1,23	0,48	-	0,48	1,23	<b>0,56</b>
<b>Al</b>	2,05	0,22	-	0,22	2,05	<b>0,75</b>
<b>Total</b>	100%	100%	100%			<b>100%</b>

Tabla 3.7 Microanálisis por energía dispersa de rayos X de la fracción gruesa de EAF

En la Tabla 3.7 se muestra los componentes mineralógicos del árido siderúrgico grueso en forma de óxidos resultado de los tres microanálisis por energía dispersa de rayos X anteriores.



Spectrum 1 (zona 1) Escoria media

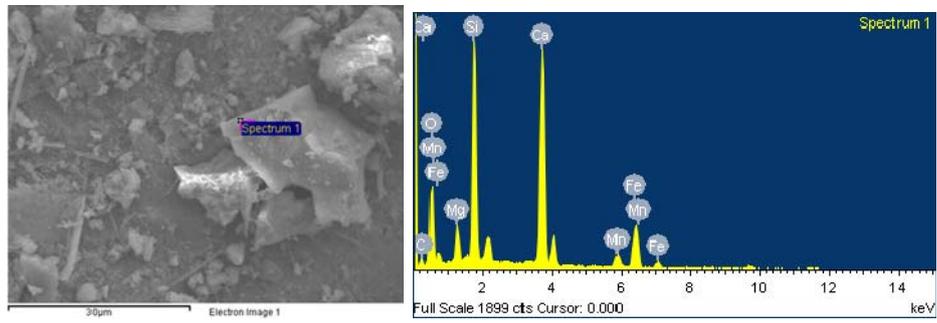


Spectrum 2 (zona 1) Escoria media

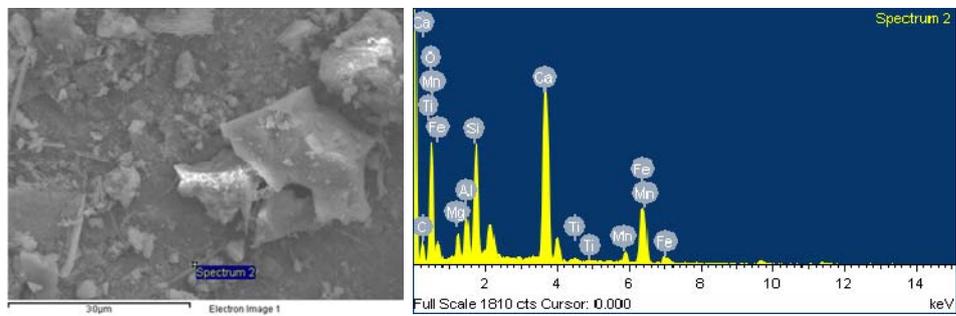
Imagen 3.13 Microanálisis por energía dispersa de rayos X Escoria media

	<b>Spec 01</b>	<b>Spec 02</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Media</b>
<b>O</b>	32,02	29,73	29,73	32,02	<b>30,88</b>
<b>Ca</b>	24,53	34,20	24,53	34,20	<b>29,37</b>
<b>Fe</b>	8,46	12,03	8,46	12,03	<b>10,25</b>
<b>Si</b>	12,22	7,34	7,34	12,22	<b>9,78</b>
<b>Al</b>	12,71	4,17	4,17	12,71	<b>8,44</b>
<b>C</b>	6,59	8,60	6,59	8,60	<b>7,60</b>
<b>Mn</b>	1,92	2,69	1,92	2,69	<b>2,31</b>
<b>Mg</b>	1,55	1,24	1,24	1,55	<b>1,40</b>
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>			<b>100%</b>

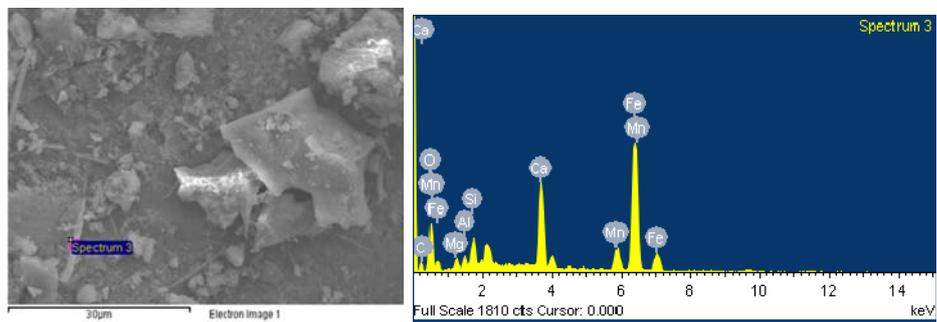
Tabla 3.8 Microanálisis por energía dispersa de rayos X de la fracción media de EAF



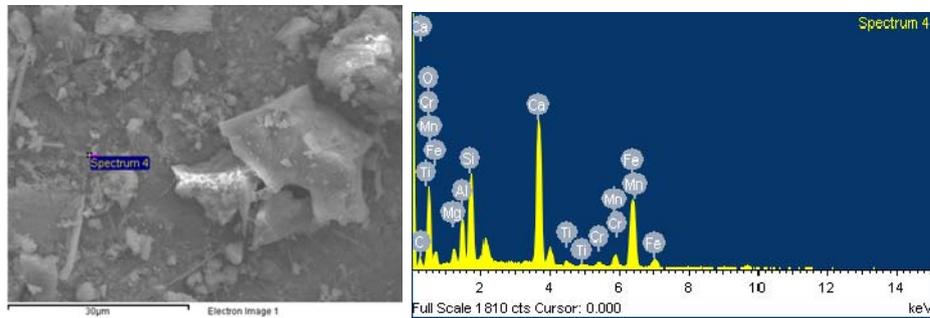
Spectrum 1 (zona 1) Escoria fina



Spectrum 2 (zona 1) Escoria fina



Spectrum 3 (zona 1) Escoria fina



Spectrum 4 (zona 1) Escoria fina

Imagen 3.14 Microanálisis por energía dispersa de rayos X Escoria fina

	Spec 01	Spec 02	Spec 03	Spec 04	Min.	Max.	Media
<b>O</b>	34,81	40,21	18,82	31,13	18,82	40,21	<b>31,24</b>
<b>Fe</b>	13,05	15,59	50,07	23,48	13,05	50,07	<b>25,55</b>
<b>Ca</b>	23,75	17,32	12,17	18,20	12,17	23,75	<b>17,86</b>
<b>Si</b>	16,27	7,92	3,13	8,58	3,13	16,27	<b>8,98</b>
<b>C</b>	5,57	10,61	6,08	7,28	5,57	10,61	<b>7,39</b>
<b>Mn</b>	3,19	2,55	6,65	3,40	2,55	6,65	<b>3,95</b>
<b>Mg</b>	3,36	2,32	1,57	1,97	1,57	3,36	<b>2,31</b>
<b>Al</b>	-	2,99	1,51	4,44	1,51	4,44	<b>2,24</b>
<b>Ti</b>	-	0,49	-	0,71	0,49	0,71	<b>0,30</b>
<b>Cr</b>	-	-	-	0,81	0,81	0,81	<b>0,20</b>
<b>Total</b>	100%	100%	100%	100%	-	-	<b>100%</b>

Tabla 3.9 Microanálisis por energía dispersa de rayos X de la fracción fina de EAF

Según estos microanálisis se puede apreciar la presencia de gran cantidad de oxígeno, hierro y calcio, además, la existencia en menor cantidad de silicio y aluminio hace pensar en la existencia de silicatos y de aluminatos junto a los compuestos químicos típicos de las escorias negras, como son los óxidos de calcio y magnesio.

### 3.1.6. Análisis termogravimétrico (TAG) y calorimétrico (DSC)

Se han sometido dos muestras de la fracción fina de EAF, una de la fracción media y una de la fracción gruesa, a análisis termogravimétrico y calorimétrico con el fin de determinar las temperaturas de transformación y las entalpías de reacción mediante los flujos de calor en función de la temperatura y del tiempo.

Con este análisis se puede interpretar las reacciones químicas y las transformaciones que se producen en el proceso de calentamiento en los compuestos mineralógicos de las muestras.

Las gráficas resultantes de los ensayos de TGA (Termogravimetría) y DSC (Calorimetría diferencial de barrido) se muestran a continuación.

Las variaciones de masa se representan mediante la línea de color verde y las de entalpía de color azul.

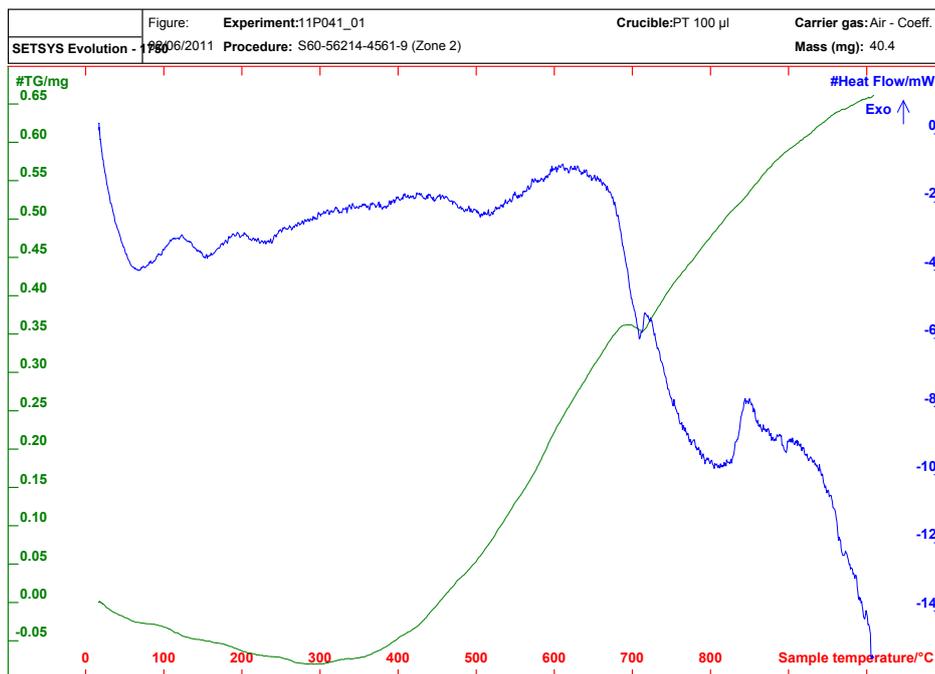


Imagen 3.15 Gráfica del análisis térmico sobre la muestra 1 de la fracción fina de EAF

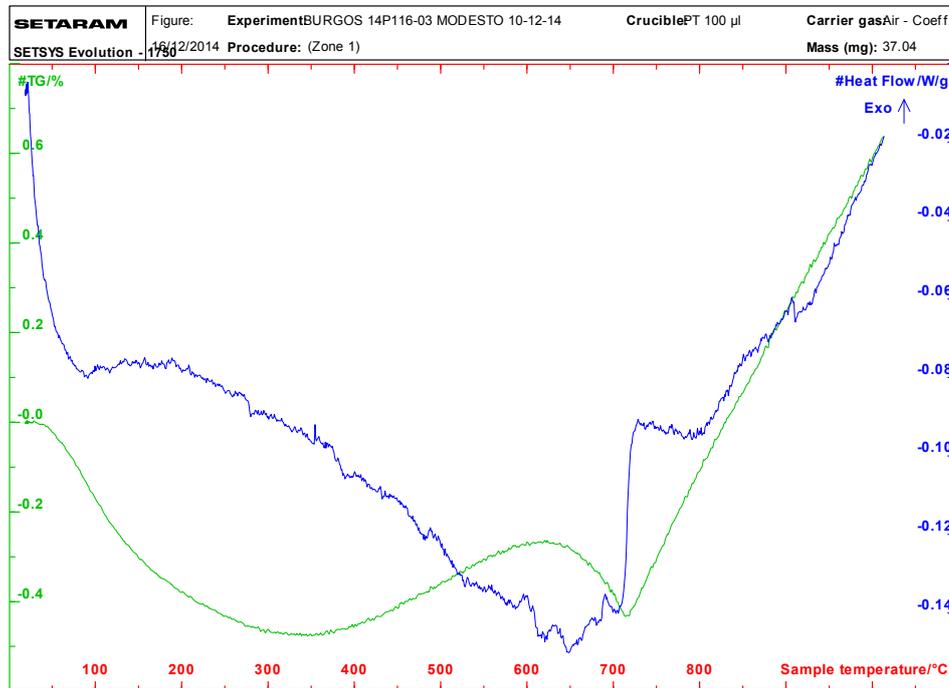


Imagen 3.16 Gráfica del análisis térmico sobre la muestra 2 de la fracción fina de EAF

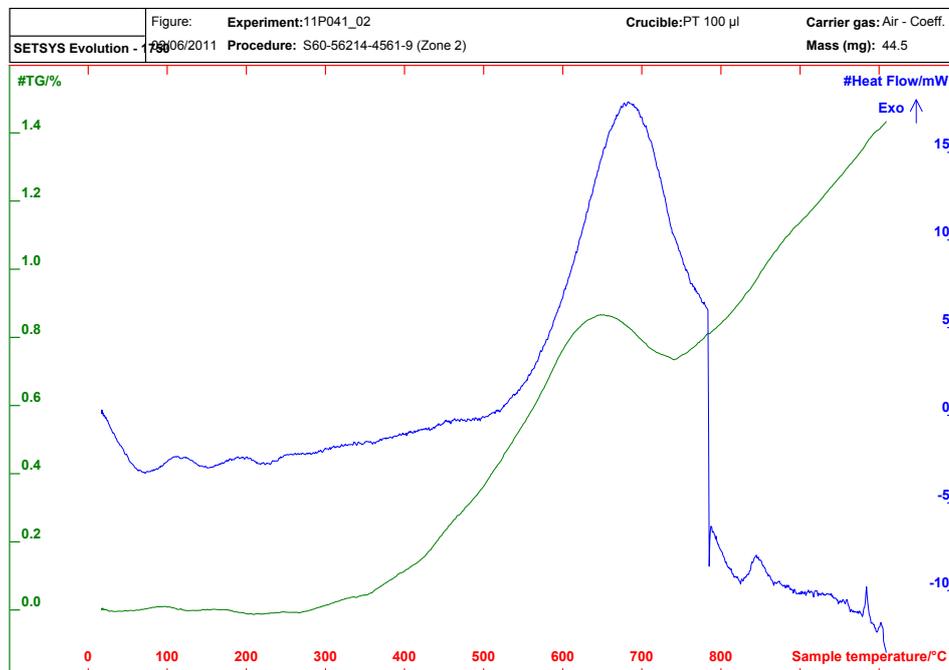


Imagen 3.17 Gráfica del análisis térmico sobre la fracción media de EAF

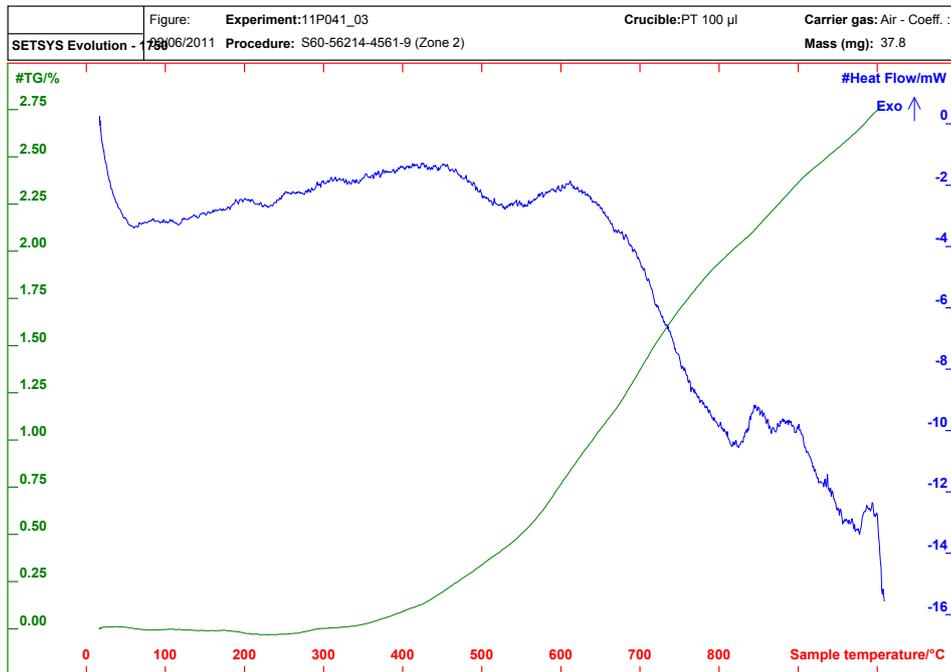


Imagen 3.18 Gráfica del análisis térmico sobre la fracción gruesa de EAF

Como se observa en las gráficas de la Imagen 3.15 a la Imagen 3.18 el calentamiento se ha realizado hasta la temperatura de 1000°C, a un ritmo de 5°C/minuto. Una vez concluido el proceso se pueden destacar las siguientes transformaciones en los componentes de las muestras:

1. Por debajo de 200°C se pierde la humedad capilar natural del material, con la consiguiente pérdida de masa.
2. A partir de 400°C se aprecia la ganancia de masa, que corresponde con la oxidación del Fe+2 a Fe+3 (wustita pasa a magnetita o hematites) y su lógica ganancia de oxígeno.
3. A partir de 700°C descomposición de la calcita  $\text{CaCO}_3$  por pérdida de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y transformación en cal viva (CaO) o lima. En la fracción media esta descomposición es más acusada y se corresponde con el contenido de carbono del análisis químico de dicha fracción (1,11%).

### 3.1.7. Caracterización física

La determinación de la granulometría del árido siderúrgico se realiza según lo prescrito en la norma UNE-EN 933-1 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la

granulometría de las partículas. Método tamizado” (Aenor 2012). A continuación, se detallan el análisis granulométrico y la curva granulométrica para cada tamaño de árido, arena, grava fina y grava gruesa de escoria, comparándola con los límites establecidos en la EHE-08 y los de la ASTM-33.

Las tablas de análisis granulométrico y las curvas de distribución granulométrica de partículas que pasa por cada uno de los tamices correspondientes, se reflejan en las tablas 3.11, 3.12 y 3.13 y en los gráficos 3.1, 3.2 y 3.3.

En la Tabla 3.10 se recogen una serie de propiedades de especial relevancia en cuanto a la caracterización física de la escoria negra.

Con las características reflejadas en las tablas y graficas anteriores se puede determinar que la escoria negra EAF cumple con los requisitos físicos establecidos por la instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) y se puede utilizar como árido para la elaboración de Hormigón.

Propiedad y normativa	Escoria negra		Límites EHE-08	
	0,063/4 mm	4/31,5 mm	Fracción fina	Fracción gruesa
Densidad aparente de partículas (Kg/m <sup>3</sup> ) UNE-EN 1097-6	3640	3510	–	–
Densidad de partículas tras secado en estufa (Kg/m <sup>3</sup> ) UNE-EN 1097-6	3510	3130	–	–
Densidad de partículas saturadas con la superficie seca (Kg/m <sup>3</sup> ) UNE-EN 1097-6	3540	3240	–	–
Absorción de agua (%)UNE-EN 1097-6	1,12	3,51	≤ 5	≤ 5
Pérdida de peso en cinco ciclos de sulfato magnésico (%) UNE-EN 1367-2	–	1,65	–	≤ 18
Coefficiente de friabilidad (%)UNE-EN 1097-1	–	15,40	–	≤ 40
Desgaste de los Ángeles (%) UNE-EN 1097-2	–	23,87	–	≤ 40
Índice de Lajas (%) UNE-EN 933-3	–	2,80	–	< 35
Equivalente en arena(%) UNE-EN 933-8	98	–	> 70-75	–
Terrones de arcilla (%) UNE 7133	Ausencia	Ausencia	≤ 1	≤ 0,25

Tabla 3.10 Caracterización física-mecánica del árido siderúrgico EAF con los límites de la EHE-08

Análisis granulométrico de la arena de escoria 0/4 mm						
Luz Tamiz mm	Retenido (Kg)		% Retenido		% Pasa	
	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
31,500	0,000	0,000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
16,000	0,000	0,000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
8,000	0,002	0,002	0,10%	0,10%	99,90%	99,90%
4,000	0,011	0,013	0,55%	0,65%	99,45%	99,35%
2,000	0,401	0,414	20,09%	20,74%	79,91%	79,26%
1,000	0,734	1,148	36,77%	57,52%	63,23%	42,48%
0,500	0,518	1,666	25,95%	83,47%	74,05%	16,53%
0,250	0,238	1,904	11,92%	95,39%	88,08%	4,61%
0,125	0,068	1,972	3,41%	98,80%	96,59%	1,20%
0,063	0,017	1,989	0,85%	99,65%	99,15%	0,35%
Fondo	0,007	1,996	0,35%	100,00%	99,65%	0,00%
1,996			100,00%			
Porcentaje finos (f)			0,35%			
Módulo de finura (MF)			3,57%			

Tabla 3.11 Granulometría de la fracción fina de escoria AEF (0/4)

**Curva granulométrica arena de escoria 0/4mm**

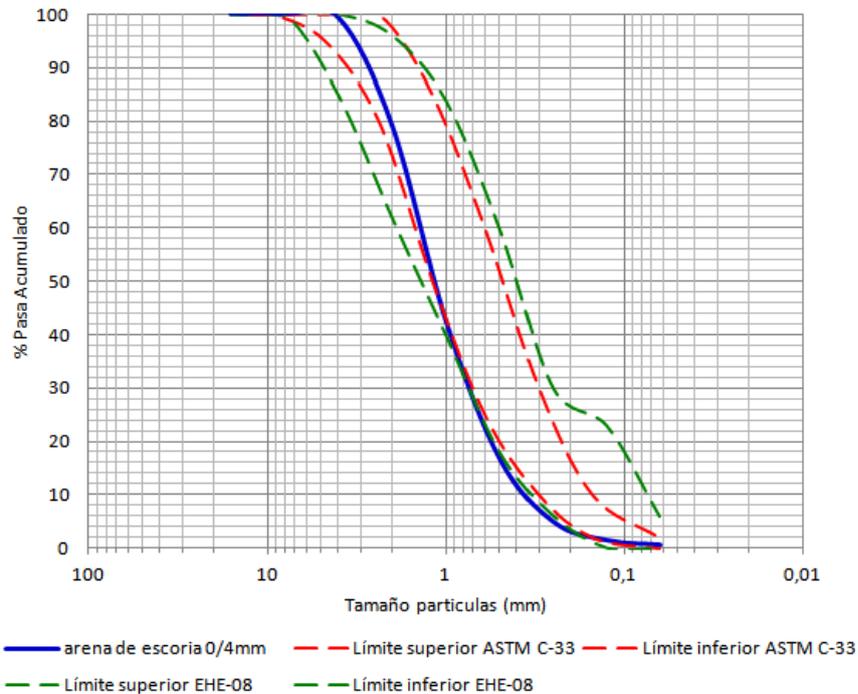


Gráfico 3.1 Curva granulométrica de la arena de escoria EAF con los límites ASTM y EHE-08

Análisis granulométrico de la grava fina de escoria 4/10 mm						
Luz Tamiz mm	Retenido (Kg)		% Retenido		% Pasa	
	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
31,500	0,000	0,000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
16,000	0,000	0,000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
8,000	0,393	0,393	19,11%	19,11%	80,89%	80,89%
4,000	1,373	1,766	66,78%	85,89%	33,22%	14,11%
2,000	0,201	1,967	9,78%	95,67%	90,22%	4,33%
1,000	0,043	2,010	2,09%	97,76%	97,91%	2,24%
0,500	0,012	2,022	0,58%	98,35%	99,42%	1,65%
0,250	0,010	2,032	0,49%	98,83%	99,51%	1,17%
0,125	0,012	2,044	0,58%	99,42%	99,42%	0,58%
0,063	0,007	2,051	0,34%	99,76%	99,66%	0,24%
Fondo	0,005	2,056	0,24%	100,00%	99,76%	0,00%
		2,056	100,00%			
Porcentaje finos (f)			0,24%			
Módulo de finura (MF)			5,76%			

Tabla 3.12 Granulometría de la fracción media de escoria AEF (4/10)

**Curva granulométrica grava fina de escoria 4/10mm**

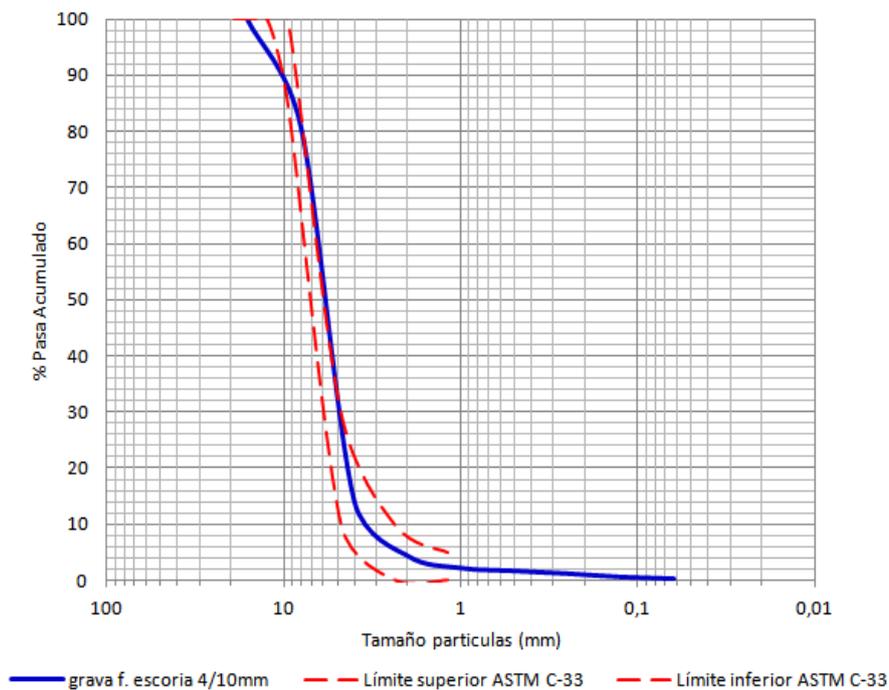


Gráfico 3.2 Curva granulométrica de la grava fina de escoria EAF con los límites ASTM

Análisis granulométrico de la grava gruesa de escoria 10/20 mm						
Luz Tamiz mm	Retenido (Kg)		% Retenido		% Pasa	
	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
25,000	0,000	0,000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
20,000	0,517	0,517	5,19%	5,19%	94,81%	94,81%
16,000	1,593	2,110	15,98%	21,16%	84,02%	78,84%
8,000	6,263	8,373	62,81%	83,97%	37,19%	16,03%
4,000	1,154	9,527	11,57%	95,55%	88,43%	4,45%
2,000	0,130	9,657	1,30%	96,85%	98,70%	3,15%
1,000	0,023	9,680	0,23%	97,08%	99,77%	2,92%
0,500	0,049	9,729	0,49%	97,57%	99,51%	2,43%
0,250	0,091	9,820	0,91%	98,49%	99,09%	1,51%
0,125	0,078	9,898	0,78%	99,27%	99,22%	0,73%
0,063	0,050	9,948	0,50%	99,77%	99,50%	0,23%
Fondo	0,023	9,971	0,23%	100,00%	99,77%	0,00%
	9,971		100,00%			
Porcentaje finos (f)			0,23%			
Módulo de finura (MF)			5,85%			

Tabla 3.13 Granulometría de la fracción gruesa de escoria AEF (10/20)

### Curva granulométrica grava gruesa de escoria 10/20mm

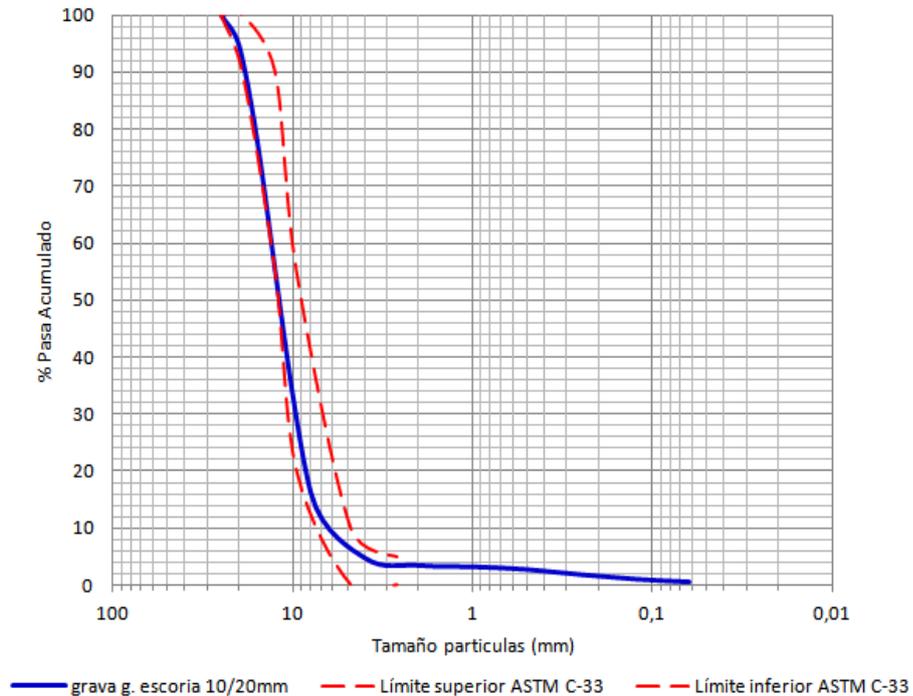


Gráfico 3.3 Curva granulométrica de la grava gruesa de escoria EAF con los límites ASTM

## 3.2. ÁRIDOS NATURALES

El árido natural utilizado para la elaboración del hormigón patrón y como arena de complemento para el hormigón de escorias con fibras, es el árido natural silíceo rodado utilizado habitualmente en la zona. Este árido natural de naturaleza silícica procede de depósitos fluviales, extraído con medios mecánicos y seleccionado mediante hidroclasificación, sin aporte de ningún proceso químico. Ha sido suministrado por la empresa Gravas y Hormigones Sáiz S.A. de la gravera de Espinosa de Juarros en Burgos, en sacas de 1 m<sup>3</sup> y en dos tamaños de granulometrías:

### 3.2.1. Grava natural silícica

La grava silícica se ha recibido en dos tamaños de granulometrías:

- Grava gruesa silícica 12/20 mm
- Grava fina silícica 4/12 mm

El aspecto de las dos fracciones de grava silícica se muestra en la Imagen 3.19 donde se aprecian áridos naturales de aristas redondeadas y algunas fracturadas exentas de arcillas y materias inorgánicas.



Imagen 3.19 Muestras de grava silícica gruesa 12/20 y fina 4/12

### 3.2.1.1. Granulometrías

Los análisis granulométricos de cada una de las fracciones de la grava natural silícica se muestran a continuación en el Gráfico 3.4 y el Gráfico 3.5.

Tamiz (mm)	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
% pasa	100,0	98,6	77,1	43,8	10,1	4,3	2,6	1,9	1,6	1,2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4

Tabla 3.14 Granulometría de grava gruesa silícica.

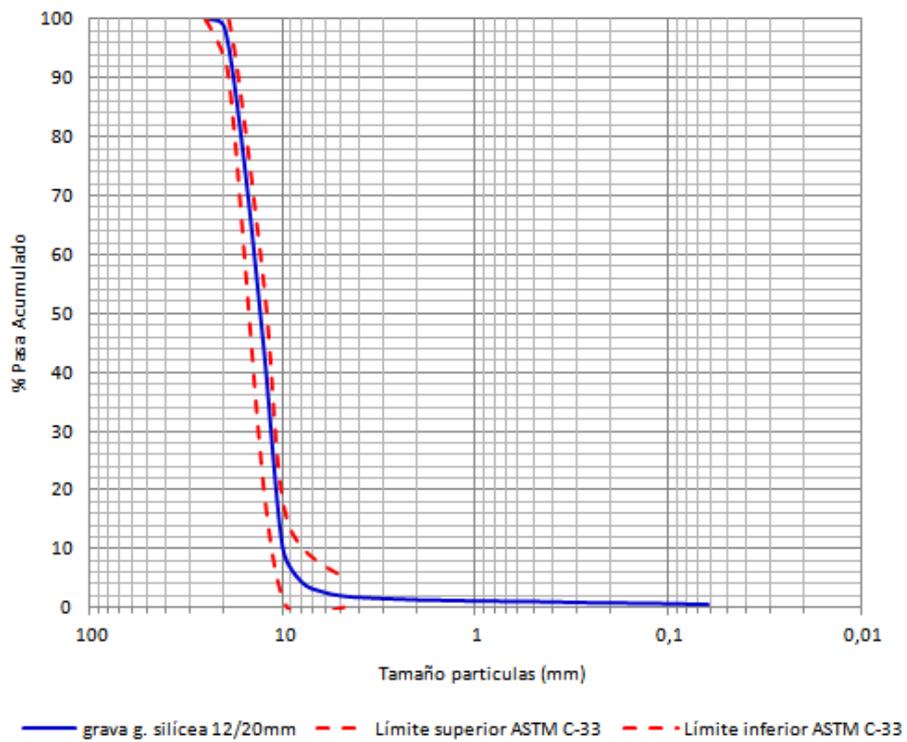


Gráfico 3.4 Análisis granulométrico de la grava gruesa silícica con los límites ASTM

Tamiz (mm)	14	12,5	10	8	6,3	5	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
% pasa	100,0	99,6	93,1	59,4	30,5	12,5	5,4	1,6	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3

Tabla 3.15 Granulometría de grava fina silícica.

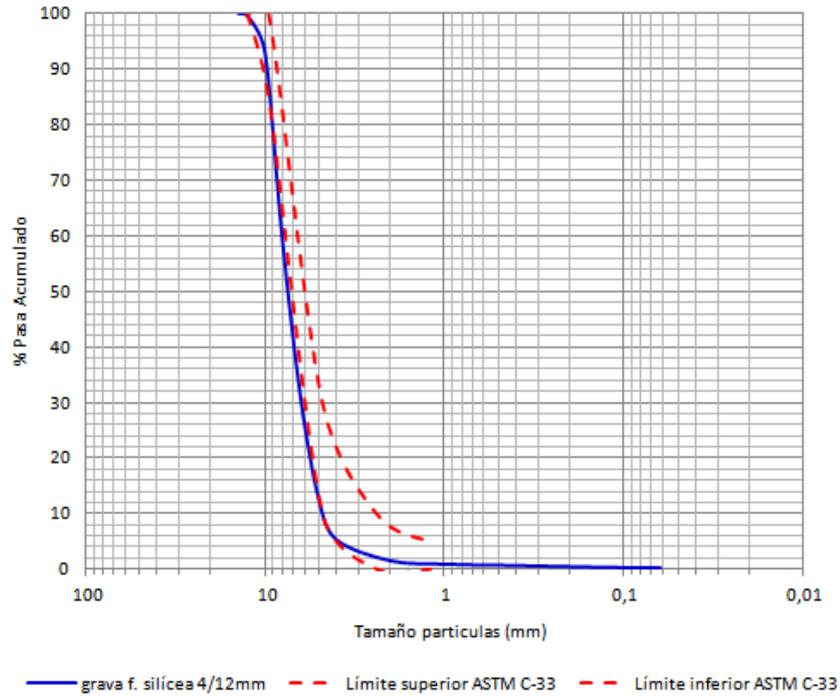


Gráfico 3.5 Análisis granulométrico de la grava fina silícica con los límites ASTM

### 3.2.2. Arena natural silícica

La arena natural silícica de la misma procedencia que las gravas anteriores, ha sido suministrada con un tamaño de 0/4 mm en sacas de  $m^3$  con un contenido de  $SiO_2$  > de 96%.



Imagen 3.20 Muestra de arena silícica 0/4

### 3.2.2.1. Granulometría

Tamiz (mm)	5	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
% pasa	98,7	96,5	87,2	73,2	47,7	17,1	5,4	1,6

Tabla 3.16 Granulometría de la arena silícea.

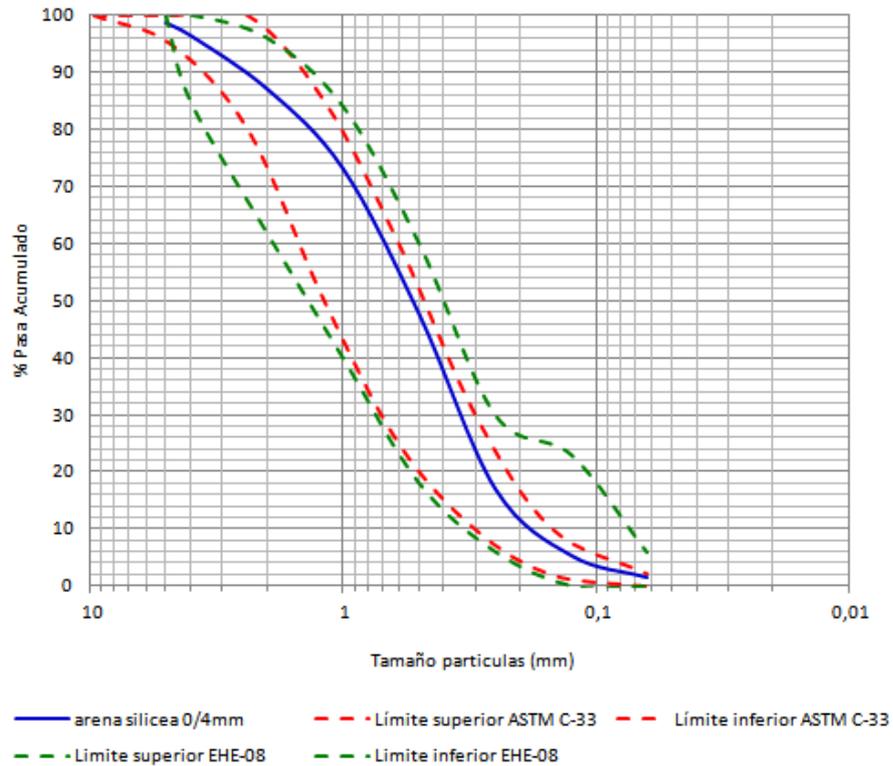


Gráfico 3.6 Curva granulométrica de la arena silícea con los límites ASTM y EHE-08

En la curva granulométrica se puede observar que la arena natural silícea está perfectamente situada entre los límites de la EHE-08 y de la ASTM C 33.

### 3.2.3. Características del árido natural

Las características físico-mecánicas y químicas más importantes del árido natural silíceo en las tres fracciones de árido, que han sido aportadas por la empresa suministradora del árido (Gravas y Hormigones Sáiz S.A) se presentan en Tabla 3.17 donde también se compara con los límites establecidos en la actual Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08.

Propiedad y normativa	Árido silíceo			Límites según EHE-08	
	0/4 mm	4/12 mm	12/20 mm	Fracción fina	Fracción gruesa
Materia orgánica (%) UNE-EN 1744-1	más claro	–	–	más claro que sust. patrón	–
Partículas bajo peso específico (%) UNE-EN 1744-1	0,00	0,00	–	≤ 0,5	≤ 1
Contenido total en azufre (%) UNE-EN 1744-1	0,0014	–	–	≤ 1	≤ 1
Sulfatos solubles en ácidos (%) UNE-EN 1744-1	0,00	–	–	≤ 0,8	≤ 0,8
Cloruros (%) UNE-EN 1744-1	0,0021	–	–	≤ 0,05	≤ 0,05
Índice de lajas UNE-EN 933-3	–	5	–	–	< 35
Desgaste de los Ángeles UNE-EN 1097-2	–	25	–	–	≤ 40
Resistencia a ciclos de hielo-deshielo (%) UNE-EN 1367-1	–	0,90	–	–	–
CPA UNE-EN 1097-8	–	36	–	–	–
Coefficiente de Absorción de Agua (%) UNE-EN 1097-6	–	0,59	–	≤ 5	≤ 5
Densidad real (g/cm³) UNE-EN 1097-6	–	2,598	–	–	–
Densidad Real Saturada superficie seca (g/cm³) UNE-EN 1097-6	–	2,614	–	–	–
Equivalente en arena (%) UNE-EN 933-8	89	–	–	> 70-75	–
Contenido en finos (%) Análisis granul. Tamizado UNE-EN 933-1	1,58	0,25	0,41	≤ 6	≤ 1,5

Tabla 3.17 Características físico-mecánicas y químicas del árido natural silíceo

### 3.3. FIBRAS METÁLICAS

Las fibras metálicas que se han utilizado como refuerzo en este trabajo son fabricadas por Bekaert y su denominación es **Dramix RL-45/50-BN**. Las fibras Dramix son filamentos de acero, deformados y cortados en determinadas longitudes, para refuerzo de hormigones, morteros y otros materiales compuestos. Es una fibra de alambre suelta y estirada en frío y con extremos conformados para mejorar la adherencia al hormigón.

La **R** de su denominación representa el acabado conformado de sus extremos.

La **L** significa la forma de suministro (encoladas en peines o sueltas), en este caso alambres sueltas

El nº **45** define la clase de la fibra, en función de su esbeltez (= "l/d"), siendo "l" su longitud y "d" el diámetro de la fibra.

El nº **50** representa la longitud de la fibra.

La **B** es el material de que está hecha, en nuestro caso acero normal.

La **N** es la calidad del material, en este caso bajo en carbono.

Las principales características de las fibras metálicas Dramix RL-45/50 BN se muestra en la Tabla 3.18.

Propiedades/Datos técnicos	DRAMIX RL-45/50-BN
Longitud (mm)	50
Diámetro (mm)	1,05
Longitud/diámetro	45
Esbeltez	48
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7,9
Resistencia a la tracción (MPa)	> 1000
Módulo de Young (MPa)	210.000
Numero de fibras por kg	2800
Longitud de alambre en 1 kg (m)	140

Tabla 3.18 Características según la hoja de datos de producto de las fibras metálicas Dramix RC-45/50-BN



Imagen 3.21 Aspecto de las fibras metálicas Dramix RC-45/50-BN y de su etiquetado

Estas fibras se suministran sueltas en sacos de papel degradables de 20 Kg (Imagen 3.21), que se pueden añadir directamente a la hormigonera, siempre que la velocidad de giro en ésta no sea menor de 12 rpm.

No se deben añadir las fibras como primer componente en la mezcladora, siendo posible su incorporación junto a la arena y los áridos, o bien al hormigón mezclado en fresco. Después de añadirse las fibras, se debe continuar mezclando a alta velocidad, durante 4-5 minutos (aprox. 70 rotaciones).

Las cuantías recomendadas por el fabricante para hormigones utilizados en pavimentos con este tipo de fibra metálica varían de 20 kg/m<sup>3</sup> a 60 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.4. FIBRAS SINTÉTICAS

Las fibras sintéticas utilizadas en esta tesis doctoral han sido fabricadas por la marca Sika y la denominación de las mismas es **SikaFiber M-48**.

Consiste en una macro-fibra de poliolefinas (homopolímero) diseñada para ser mezclada con hormigones con el fin de aumentar su durabilidad, evitar la fisuración y aportar resistencias a flexotracción, a impacto, etc, pudiendo llegar a sustituir total o parcialmente a las armaduras.

Se trata de fibras de monofilamento plano y rizado de color negro fabricado por extrusión, con un tratamiento químico superficial que mejora la adherencia (Imagen 3.22) y que cumple con las especificaciones de la Norma UNE-EN 14889-2 y cuyas principales características se reflejan en la siguiente tabla:

Propiedades/Datos técnicos	SikaFiber M-48
Composición química	100% poliolefinas - HOMOPOLÍMERO
Proceso de transformación	extrusión
Densidad (20°C) (kg/cm <sup>3</sup> )	aprox. 0,91
Absorción de agua (%)	0
Grosor (deniers)	3500
Diámetro equivalente (mm)	aprox. 0,93
Longitud (mm)	48
Esbeltez (mm)	60
Frecuencia de la fibra (ud/Kg)	32895
Resistencia a la tracción (MPa) ASTM D-638	> 400
Elongación (%) ASTM D-638	7
Módulo de elasticidad (GPa) ASTM D-790	> 6
Temperatura de distorsión (°C) ASTM D-648	110
Temperatura de descomposición (°C) ASTM D-648	280

Tabla 3.19 Características según la hoja de datos de producto de las fibras sintéticas SikaFiber M-48



Imagen 3.22 Aspecto de las fibras sintéticas Sikafiber M-48

Estas fibras se suministran en sacos de papel degradable, pudiéndose añadir el saco cerrado con las fibras, directamente a la hormigonera pues la bolsa pasado un tiempo se deshace al entrar en contacto con el medio alcalino del hormigón, por lo que hay que prolongar el amasado al menos durante 5 minutos desde su aporte.

### 3.5. CEMENTO PÓRTLAND

Para la elaboración de las distintas amasadas se ha utilizado un cemento Portland tipo CEM I 42,5 R fabricado por la empresa Cementos Alfa S.A. del grupo Portland Valderribas en su factoría de Mataporquera (Cantabria). Este cemento se ha suministrado en envases de papel de 35 Kg. (Imagen 3.23).



Imagen 3.23 Envase de cemento

El certificado de características técnicas, expedido por la fábrica de Mataporquera para su cemento CEM I 42,5 R, se resume en la Tabla 3.20.

Propiedades/Datos técnicos	Cemento CEM I 42,5 R	Requisitos Norma EN/UNE
<b>Componentes</b>		
Clinker (%)	95	95-100
Caliza (L) (%)	5	-
Regulador de fraguado (%)	5	-
<b>Características físicas</b>		
Principio de fraguado (min)	170	> 60
Final de fraguado (min)	220	< 720
Expansión de fraguado Le Chatelier (mm)	0,1	< 10
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,15	-
Superficie específica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3400	-
Agua de consistencia normal (%)	30,9	-
<b>Características químicas</b>		
Pérdida por calcinación (%)	3,2	< 5,0
Residuo insoluble (%)	1,4	< 5,0
Contenido en cloruros (Cl-) (%)	0,01	< 0,10
Contenido en sulfatos (SO <sub>3</sub> ) (%)	3,2	< 4,0

Tabla 3.20 Datos y características técnicas CEM I 42,5 R, aportados por el fabricante

La determinación de las características mecánicas a flexotracción y compresión del cemento se han realizado según norma UNE -EN 196-1 “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.” (Aenor 2005), con los siguientes resultados (Tabla 3.21).

<b>Características mecánicas</b>		
Edad (días)	Flexotracción (MPa)	Compresión (MPa)
7	7,80	47
28	8,70	56
Variación 7-28 días (%)	11,54%	19,15%

Tabla 3.21 Características mecánicas del CEM I 42,5 R

Con el objeto de completar las características químicas del cemento se ha realizado un análisis químico mediante fluorescencia de rayos X cuyos resultados se expresan en la Tabla 3.22.

<b>Composición química del cemento</b>	
<b>Componente</b>	<b>Valor (%)</b>
CaO	60,4
SiO <sub>2</sub>	21,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0
Otros	3,0
Pérdida al fuego	2,0
MgO	1,5
K <sub>2</sub> O	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-
MnO	-
TiO <sub>2</sub>	-

Tabla 3.22 Análisis químico del cemento por fluorescencia de rayos X (FRX)

### 3.6. AGUA

El agua que se ha utilizado para realizar los ensayos es el agua potable suministrado por el Ayuntamiento de Burgos (en concreto por la empresa Aguas de Burgos S.A.) al Laboratorio de Materiales de Construcción de la Universidad de Burgos. Esta agua está tratada y destinada para el consumo y libre de impurezas, en cumplimiento de lo establecido en el R.D 140/2003 de 7 de Febrero de 2003. Por lo tanto, se considera igualmente apta para su empleo en la fabricación de hormigón. Los parámetros de esta agua facilitados por la empresa Aguas Burgos S.A, en Enero de 2015, se reflejan en la Tabla 3.23.

Parámetro	Unidades	Valor
<b>Físico-Químicos</b>		
Olor	Índice de dilución	1
Sabor	Índice de dilución	1
Color	mg/l Pt/Co	5
pH	Uds. pH	8,01
Turbidez	UNF	0,30
Conductividad	µS/cm	104,40
Nitratos	mg/l	< 5,0
Nitritos	mg/l	< 0,03
Amonio	mg/l	< 0,25
Cloro libre Residual	mg/l	0,44
Fluoruro	mg/l	< 0,10
Sodio	mg/l	9,70
Cloruro	mg/l	21,30
Sulfato	mg/l	19,80
Calcio	mg/l	16,90
Dureza Total	°F	4,70
Bicarbonato	mg/l	54,90
Hierro	mg/l	< 0,0001
Aluminio	mg/l	0,04
Cobre	mg/l	< 0,001
Suma de trihalometanos	mg/l	< 0,01
Índice de Langelier	–	-0,40
<b>Microbiológicos</b>		
Escherichia Coli	UFC en 100 ml	0,00
Enterococos	UFC en 100 ml	0,00
Clostridium Perfringens	UFC en 100 ml	0,00
Bacterias Coliformes	UFC en 100 ml	0,00
Recuento de colonias a 22°C	UFC en 100 ml	8,00

Tabla 3.23 Análisis del agua potable de Burgos facilitado por la empresa suministradora

### 3.7. ADITIVOS

En los hormigones reforzados con fibras se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superplastificantes). El Anejo 14 de la EHE 2008 establece que, cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ion cloruro total aportado por los componentes no debe exceder del 0.4% del peso del cemento.

Al adicionar fibras al hormigón (sobre todo en altas proporciones), éste sufre una reducción sustancial de docilidad, si además se emplean áridos siderúrgicos en la mezcla, con la consiguiente pérdida de trabajabilidad que conlleva, se justifica más aún el empleo de este tipo de aditivos.

Con el fin de reducir la aportación de agua, para no afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superplastificantes. En las diferentes amasadas de hormigón realizadas en esta investigación, bien sean previas o definitivas, bien tenga fibras de refuerzo con árido de escoria negra EAF o simplemente sea de referencia o patrón solamente con escoria negra, el superplastificante utilizado ha sido el denominado **Viscocrete -5920** de la marca comercial Sika (Imagen 3.24), cuyas características más importantes que figuran en la hoja de datos del producto se reflejan en la Tabla 3.24.

Datos del producto	
Apariencia/Color	Líquido marrón amarillento
Conservación	entre 5°C y 35°C
Propiedades/Datos técnicos	
Composición química	Policarboxilato modificado en base acuosa
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Aprox. 1,08
Valor de pH	Aprox. 5
Contenido en sólidos (%)	36
Contenido en cloruros (%)	0

Tabla 3.24 Características del superplastificante Sika Viscocrete – 5920



Imagen 3.24 Aspecto del superplastificante Sika Viscocrete 5920 en su envase.

La dosificación recomendada por el fabricante oscila entre el 0,5% y el 1,5% del peso del cemento. Para la dosificación del hormigón patrón en este trabajo se utilizará el 1%, mientras que para el hormigón con escorias y fibras será del 1,5%, ya que se suman los dos componentes que reducen la trabajabilidad, las fibras y la escoria.

**Fase experimental previa**

## **Capítulo IV**



## 4. FASE EXPERIMENTAL PREVIA

### 4.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta Tesis Doctoral es analizar las características de un hormigón en el que aproximadamente el 75% de sus áridos son áridos siderúrgicos (escoria negra de horno eléctrico de arco EAF) y el resto áridos naturales a base de arenas silíceas, para utilizarlos en soleras o pavimentos reforzándolos con fibras en sustitución del mallazo de reparto que tradicionalmente se utiliza en estos casos.

En esta fase experimental se trata de obtener la dosificación de fibras, tanto metálicas como sintéticas, que mejores resultados aporten al hormigón con áridos siderúrgicos, analizando los resultados obtenidos en los diferentes ensayos previos de laboratorio al que han sido sometidos con las diferentes cuantías de fibras.

No es la intención de esta Tesis Doctoral estudiar la dosificación del hormigón utilizado por lo que se parte de una dosificación ensayada en otras investigaciones y contrastada con buenos resultados (Turmo, Banthia et al. 2008, Manso, Hernandez et al. 2011), adaptándolas a las características del hormigón que se pretende utilizar.

### 4.2. DOSIFICACIÓN

Se toma como referencia un Hormigón Patrón con áridos naturales de composición silíceas al que se le refuerza con fibras metálicas en una cuantía de  $30 \text{ Kg/m}^3$  y al que se le denomina **P**, tomado del estudio realizado por Turmo, et al.2008, mientras que el hormigón con escorias (**E**, **EM** y **ES**) la dosificación se ha adaptado en función de las densidades de los hormigones, teniendo en cuenta que el hormigón con áridos siderúrgicos tiene una densidad alrededor de los  $2800 \text{ Kg/m}^3$ , sustituyendo el árido natural por árido siderúrgico pero manteniendo el 50% de árido fino natural, según las investigaciones realizadas por Manso et al 2011, (Manso, Hernandez et al. 2011).

Las amasadas con fibras metálicas y áridos siderúrgicos se denominan **EM1** y **EM2** y contienen  $30$  y  $45 \text{ Kg/m}^3$  de fibras respectivamente. Las elaboradas con fibras sintéticas y áridos siderúrgicos tendrán cuantías de  $3,5$  y  $5 \text{ Kg/m}^3$  y se las denominará **ES1** y **ES2** respectivamente.

También se realizará un hormigón con escorias pero sin fibras como referencia o patrón que se le denomina **E**, a fin de contrastar los resultados de los hormigones con fibras, no solo con el hormigón patrón con fibras metálicas si no también con el hormigón patrón de escorias y así poder apreciar si las mejoras de los resultados son atribuibles a las fibras o también a la utilización de las escorias como árido en dicho hormigón.

En la Tabla 4.1 se reflejan los componentes de las amasadas de esta fase experimental previa.

Nomenclatura	Árido empleado			Fibras	Cuantía kg/m <sup>3</sup>
	Grueso	Medio	Fino		
P	Natural	Natural	Natural	Metálicas	30
E	EAF	EAF	EAF/Natural	-	-
EM1	EAF	EAF	EAF/Natural	Metálicas	30
EM2	EAF	EAF	EAF/Natural	Metálicas	45
ES1	EAF	EAF	EAF/Natural	Sintéticas	3,5
ES2	EAF	EAF	EAF/Natural	Sintéticas	5

Tabla 4.1 Amasadas de la fase previa con áridos y fibras en su composición

No se ha considerado necesario hacer un hormigón patrón con áridos naturales sin fibras porque ya se conocen suficientemente las características del hormigón tradicional y es más interesante utilizar como referencia un hormigón tradicional reforzado con fibras.

Se establecen una serie de parámetros que se van a mantener constantes en todas las dosificaciones de las diferentes amasadas como son:

- La cantidad de cemento de 363 kg/m<sup>3</sup>
- La relación agua/cemento de 0,5
- Una relación árido grueso/ árido fino/ cemento de 3/3/1 (aproximado)
- En las dosificaciones de hormigón con escorias se mantiene un 50% de árido silíceo de la proporción total del árido fino (arenas)

Aunque la cantidad de cemento a primera vista puede parecer elevada para el uso de estos hormigones en soleras y pavimentos, este incremento proporciona otras ventajas que, a la larga, benefician al hormigón como puede ser: mejora en la durabilidad del hormigón y aporte de finos

mejorando la trabajabilidad del mismo. Teniendo en cuenta que al combinar el uso de escorias en el amasado junto a la incorporación de fibras es sabida la pérdida que estos dos elementos combinados perjudican a dicha trabajabilidad, facilitando la disgregación del mismo, por lo que ese incremento en el cemento puede aportar una mejora en su trabajabilidad.

En el Gráfico 4.1 se representa la curva granulométrica completa resultado de la mezcla de los tres tamaños de árido silíceo empleados en la amasada patrón **P**.

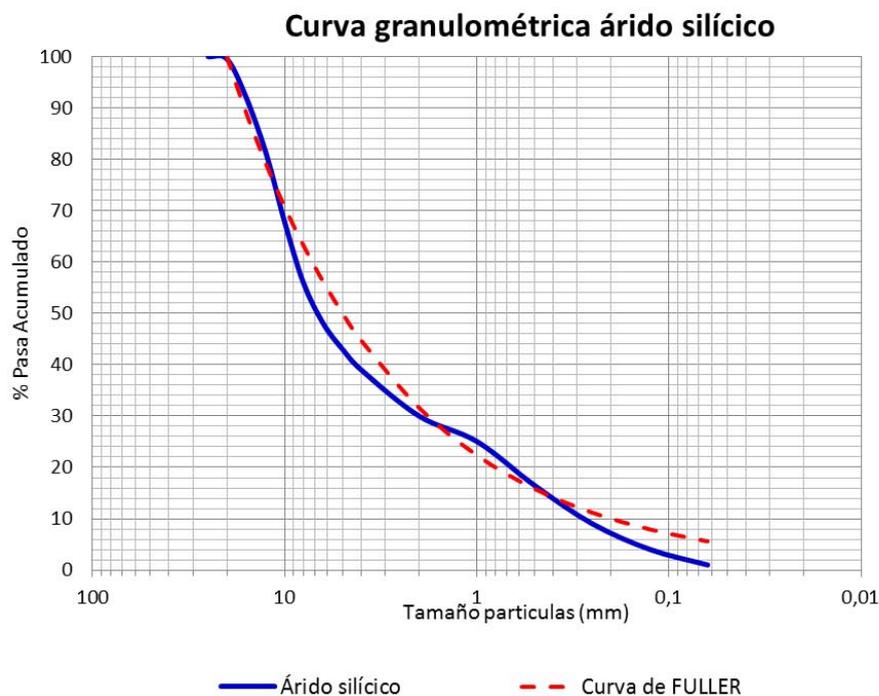


Gráfico 4.1 Curva granulométrica completa del árido silíceo con la referencia de Fuller

La curva granulométrica del árido silíceo se adapta bastante a la curva de fuller con una pequeña diferencia en la parte de los finos, pero hay que tener en cuenta que el suministro del material se efectúa en sacas de  $m^3$  con los tres tamaños separados, por lo que ese desfase en los finos es difícil de corregir a partir de las arenas de naturaleza silíceas utilizadas, dado que éstas carecen en origen de esa porción fina. Tampoco se pretende en ningún momento su corrección pues se trata de realizar un hormigón patrón de características similares al siderúrgico utilizado en estos estudios.

En la siguiente Gráfico 4.2 se representa la curva granulométrica completa del árido siderúrgico mezcla de las tres fracciones de la escoria negra con la sustitución del 50% de la arena de escoria por arena silícea.

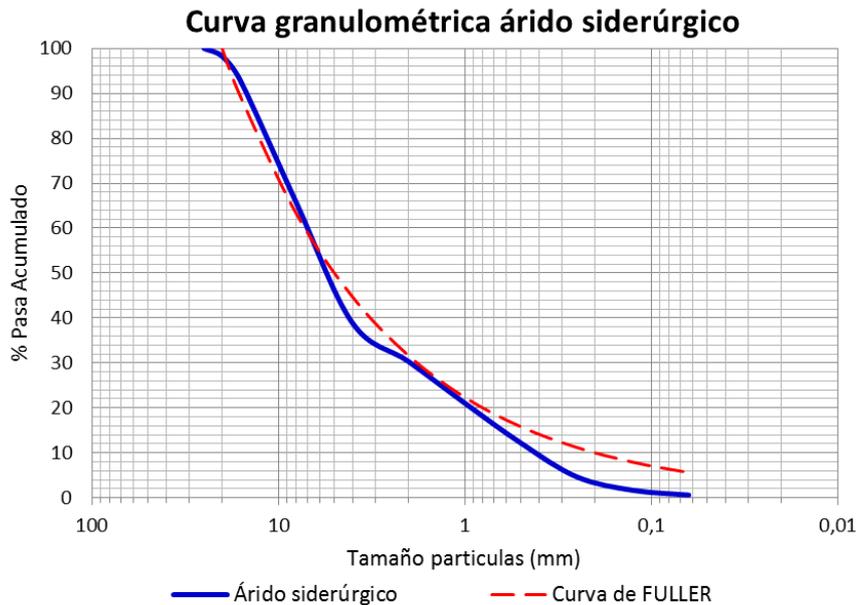


Gráfico 4.2 Curva granulométrica completa del árido siderúrgico con la referencia de fuller

Como puede observarse la curva granulométrica completa se adapta bien a la de fuller menos en la parte baja correspondiente a los finos. Esto denota una falta de finos en esta dosificación, compuesta fundamentalmente por árido siderúrgico, circunstancia descrita repetidamente por otros autores (Manso Villalaín 2001, Losáñez González 2005, Arribas García 2011). Esta escasez de finos puede ser fácilmente corregida mediante la aportación de, por ejemplo, arenas de machaqueo de origen calizo, sin embargo se ha optado por la no aportación de más tipos de áridos que los dos referidos anteriormente. Por otra parte y con la intención de ser coherentes desde el punto de vista científico, se consideró más adecuado, tal y como ya se ha dicho previamente, que las dosificaciones en la amasada patrón y en las compuestas por áridos siderúrgicos tuvieran la mayor similitud posible en este aspecto.

La relación agua/cemento en un hormigón es un índice de la porosidad final de las matriz del hormigón, y por tanto, de su resistencia mecánica y rigidez; pero ello es cierto tratándose de áridos naturales (calizo, silíceo,

dolomítico,...) cuya capacidad de absorber agua en la porosidad accesible es bastante baja.

Para conseguir esta relación A/C de 0,5 y dado que la utilización de áridos siderúrgicos junto con la incorporación de fibras produce una merma en la trabajabilidad de los hormigones, se incorpora a la mezcla de estas amasadas previas el superplastificante Viscocrete 5920 de la marca comercial SIKA, que mejore las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido, actuando como reductor de agua de amasado y proporcionando mejoras en la trabajabilidad de la mezcla, añadiendo porcentajes sobre el peso del cemento que oscilan entre el 1% para la mezcla patrón **P** sin escorias y el 1,5% para el resto.

En el caso de un árido mucho más poroso, como es la escoria negra, la relación agua/cemento será significativa de cara a su influencia en las propiedades mecánicas de resistencia y rigidez del hormigón final, sólo en el caso de que el árido se encuentre en las condiciones de humedad cercanas al estado saturado con superficie seca y dicha relación agua/cemento incida directamente sobre el estado de la matriz de hormigón.

La dosificación del hormigón Patrón (**P**) con áridos naturales se refleja en la Tabla 4.2.

<b>Dosificación Patrón P (Cantidades por m<sup>3</sup>)</b>	
Cemento	363 Kg
Agua	181 l
Arena silícica 0/4	804 Kg
Grava fina 4/12	574 Kg
Grava gruesa 12/20	464 Kg
Superplastificante 1% C	3.63 l

Tabla 4.2 Dosificación Patrón

Partiendo de esta dosificación y como se ha expuesto anteriormente (manteniendo la cantidad de cemento, el agua y la proporción entre los áridos), se adapta esta mezcla teniendo en cuenta que la densidad del hormigón con escorias está alrededor de 2.800 Kg/m<sup>3</sup>.

Se mantiene un 22% de la arena silícica para mejorar la trabajabilidad y la granulometría, completándose los finos con otro 23% de arena de escoria 0/4, lo que representa un 45% de áridos finos frente al 43% de la patrón. Esta diferencia mejorará la docilidad de la mezcla. La grava fina de

escoria se aportará en un 30% y la gruesa en un 25%, un 1% menos cada una para compensar el incremento de finos.

Como resultado de este ajuste, la dosificación para el hormigón con escorias para las amasadas **E**, **EM** y **ES** queda de la siguiente forma reflejado en Tabla 4.3:

Dosificación hormigón con escorias (Cantidades por m <sup>3</sup> )	
Cemento	363 Kg
Agua	181 l
Arena silícica 0/4	498 Kg
Arena de escoria 0/4	514 Kg
Grava fina de escoria 4/10	669 Kg
Grava gruesa de escoria 10/20	550 Kg
Superplastificante 1.5% C	5.44 l

Tabla 4.3 Dosificación del hormigón con áridos siderúrgicos

De esta dosificación se realizarán 5 amasadas diferentes, una de las cuales sin fibras (**E**) servirá como referencia junto con la anterior patrón (**P**) de áridos naturales, variando únicamente la dosificación de las fibras de refuerzo y el tipo, metálicas o sintéticas.

La dosificación de los hormigones en las diferentes amasadas preliminares en Kg para un m<sup>3</sup> de hormigón se refleja en la Tabla 4.4.

Dosificación	P	E	EM1	EM2	ES1	ES2
Cemento (Kg)	363	363	363	363	363	363
Agua (l)	181	181	181	181	181	181
Arena silícica 0/4 (Kg)	804	498	498	498	498	498
Grava fina silícica 4/12 (Kg)	574	-	-	-	-	-
Grava gruesa silícica 12/20 (Kg)	464	-	-	-	-	-
Arena de escoria 0/4 (Kg)	-	514	514	514	514	514
Grava fina de escoria 4/10 (Kg)	-	669	669	669	669	669
Grava gruesa de escoria 10/20 (Kg)	-	550	550	550	550	550
Superplastificante 1-1.5% C (Kg)	3.63	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44
Fibras Metálicas (Kg)	30	-	30	45	-	-
Fibras Sintéticas (Kg)	-	-	-	-	3.5	5

Tabla 4.4 Dosificación de 1 m<sup>3</sup> de las diferentes amasadas

## 4.3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

### 4.3.1. Amasado

Para el amasado del hormigón en la elaboración de las probetas se ha empleado una hormigonera de eje vertical utilizada en los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Burgos (Imagen 4.1), de 120 litros de capacidad, que se caracteriza por una menor absorción de aire durante la mezcla, menor tiempo de mezcla, y garantizar una perfecta homogeneidad de las mezclas que tienen un bajo porcentaje de agua en la relación agua/cemento.



Imagen 4.1 Hormigonera de eje vertical de 120 litros

En la elaboración del hormigón de estas amasadas previas, se mezclan en primer lugar los áridos y el cemento en seco. Posteriormente se le aporta el agua despacio para que se distribuya homogéneamente en la mezcla y, posteriormente, se le añade el plastificante, pudiendo mezclarse éste también con el agua de amasado. Por último se añade la cantidad correspondiente de fibras de acero o sintéticas, distribuyéndolas uniformemente en la mezcla, y amasándolas hasta que presente una dispersión perfecta en la mezcla.

El vertido de las fibras se debe realizar lentamente, entre 20 y 60 kg por minuto, con la amasadora girando a su máxima velocidad hasta garantizar la distribución homogénea de las fibras en la masa de hormigón tal como se dice en la norma EHE – 08, Anejo 14 “Instrucción de hormigón estructural 2008” (Ministerio-Fomento 2008).

En la amasada **ES2** (5 Kg. de fibras sintéticas) se ha apreciado el amontonamiento de fibras o ‘erizos’ en el contorno de la hormigonera durante el amasado (Imagen 4.2.), deshaciéndose posteriormente al final del amasado. En el resto de las amasadas no se apreciaron estos amontonamientos de fibras.

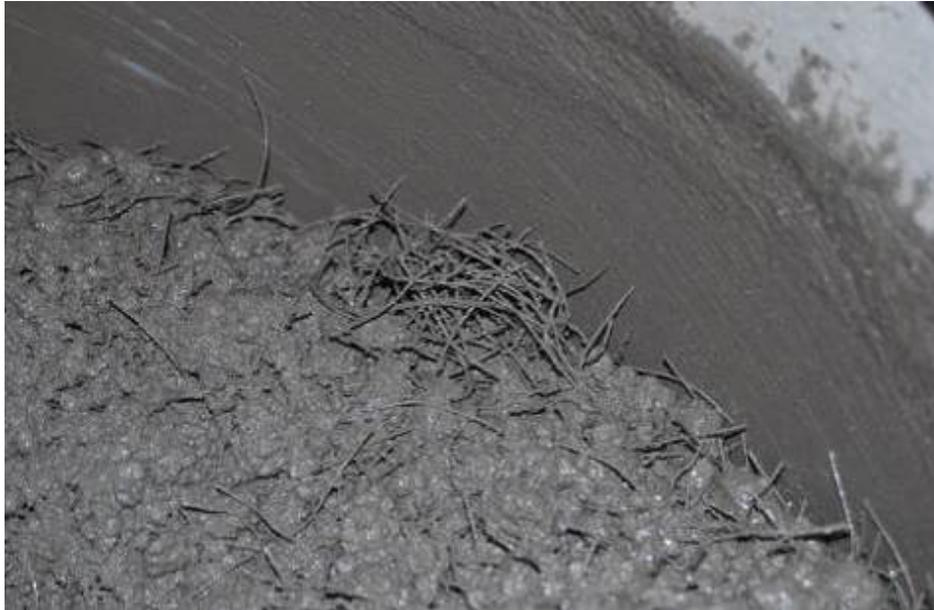


Imagen 4.2 Formación de erizos en la amasada ES2

#### 4.3.2. Consistencia

La característica cuantificable casi a primera vista más importante del hormigón fresco es la consistencia. En estas amasadas previas se utiliza únicamente para determinar esta característica el cono de Abrams en dos situaciones, antes de aportar las fibras y con las fibras ya mezcladas.

Una vez finalizado el tiempo de amasado de los componentes del hormigón, sin haber añadido las fibras correspondientes en cada amasada, se ha efectuado el ensayo del cono de Abrams conforme a lo señalado en la norma UNE EN 12350-2 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento” (Aenor 2006). Posteriormente después de añadidas las fibras y cuando se encuentren perfectamente amasadas y con una dispersión uniforme en la mezcla, se procede nuevamente a efectuar el mismo ensayo.

El proceso y los equipos utilizados en el ensayo son:

- **Tolva de llenado:** recipiente provisto de un collarín que permite acoplarse a la parte superior del molde para facilitar su vertido dentro del mismo
- **Cogedor:** cogedor curvo de acero

- **Molde:** molde metálico troncocónico de 30 cm de altura, 10 cm de diámetro superior y 20 cm de diámetro inferior
- **Espátula:** espátula metálica de 250 mm de longitud
- **Chapa base:** placa rígida metálica sobre la cual se fija el molde
- **Regla:** regla metálica graduada en centímetros y milímetros
- **Barra compactadora:** barra de acero de sección transversal circular, recta, con un diámetro de 16 mm y una longitud de 600 mm, con sus extremos redondeados

Para realizar el ensayo se ha humedecido el molde y la chapa base para evitar el rozamiento del hormigón con la superficie y, a continuación, se ha fijado el molde sobre la chapa base anclándolo con dos soportes para evitar cualquier movimiento del molde y la pérdida de material por su parte inferior.

Se ha llenado el molde en tres tongadas, de modo que cada capa ocupaba aproximadamente un tercio de la altura del molde una vez compactado el hormigón.

La compactación de cada capa se ha efectuado realizando 25 golpes con la barra compactadora y distribuyendo uniformemente los golpes en la sección transversal de cada capa. A la hora de compactar la segunda y la última capa, se ha tenido en cuenta que, aparte de compactar toda su altura, había que penetrar con la barra ligeramente en la capa inferior para lograr una homogeneidad entre capas. En el llenado de la última capa, se ha procurado que el hormigón rebosase antes de comenzar el proceso de compactado.

Después de compactar la última capa, se ha retirado el hormigón sobrante con la ayuda de una espátula metálica, dejando la superficie enrasada con la parte superior del molde.

Se ha retirado el molde levantándolo con precaución en dirección vertical, en un tiempo de 5 a 10 segundos, de una manera uniforme y sin causar al hormigón ningún movimiento lateral o de torsión. La operación completa, desde el comienzo del llenado del molde hasta la retirada del mismo, se ha realizado sin interrupción y se completó en un tiempo inferior a 150 segundos.

Inmediatamente después de retirar el molde, se midió y registró el asentamiento determinando la diferencia entre la altura del molde y la del

punto más alto de la probeta de hormigón asentada. Para poder determinar este descenso, se colocó la barra compactadora sobre la parte superior del molde totalmente horizontal (Imagen 4.3), y se tomó la medida sobre la probeta con la regla perpendicular a la barra.

Se efectuó una medición del cono antes de aportar las fibras a la mezcla y otra posterior con las fibras mezcladas.

Los resultados obtenidos con el cono de Abrams (en mm) en las diferentes amasadas se reflejan en la Tabla 4.5.

Cono de Abrams (mm)	Tipo de hormigón					
	P	E	M1	M2	S1	S2
Sin fibras	75	5	6	5	10	10
Con fibras	58	-	5	4	7	8
Consistencia	Plástica/blanda	Seca	Seca	Seca	Seca	Seca

Tabla 4.5 Medidas en el cono de Abrams y consistencias

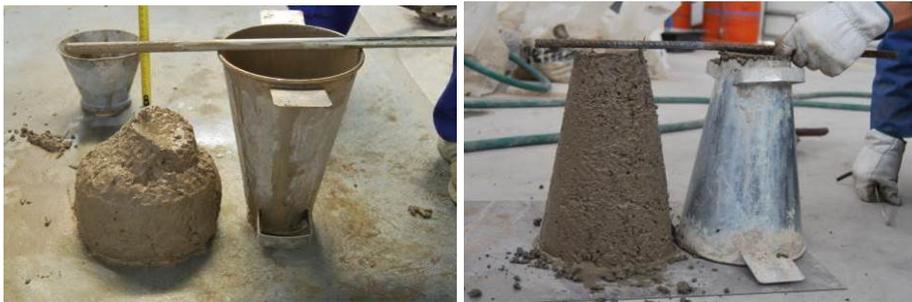


Imagen 4.3 Cono de hormigón patrón y hormigón con escorias y fibras

### 4.3.3. Elaboración de probetas

Una vez realizado el amasado, se procede al llenado de las distintas probetas de acuerdo con las normas UNE EN 12390 -2 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”.(Aenor 2009) y la UNE 83504 “Hormigones con fibras. Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio” (Aenor 2004). La forma y dimensión de los moldes son los normalizados, pero al llevar el hormigón en su composición fibras, la dimensión menor de los moldes ha de ser mayor o igual de tres veces el tamaño máximo de los áridos y dos veces la longitud de la fibra, por lo que cumplen los moldes normalizados utilizados como son las probetas cúbicas de 150x150x150 mm y 100x100x100 mm, las prismáticas de 150x150x600

mm y 100x100x400 mm y la cilíndrica de 150 mm. de diámetro x 300 mm de altura (Imagen 4.4).



Imagen 4.4 Probetas cilíndricas y prismáticas

El sistema de compactado utilizado es la mesa vibrante (Imagen 4.5), con una frecuencia mínima de 120 Hz (7200 ciclos/min). El llenado de las probetas se realiza en dos capas con su consiguiente vibrado para las prismáticas y en tres para las cilíndricas, hasta eliminar las posibles coqueas y por último retirar el hormigón sobrante, fratasando la superficie vista de las mismas.



Imagen 4.5 Mesa vibrante para el compactado de probetas

Las probetas una vez llenas se mantendrán en sus moldes protegidas para evitar la desecación al menos 24 horas y no más de 48 horas. Posteriormente se desmoldan y se introducen en la cámara húmeda para su curado.

Las condiciones de conservación de las probetas en cámara húmeda serán a temperatura de  $20 \pm 2$  °C y a más del 95% de humedad, según se contempla en la norma UNE 83504 (Aenor 2004).

## 4.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Los ensayos realizados en esta fase previa para determinar qué cuantía de fibras proporciona mejores comportamientos mecánicos al hormigón con escoria negra EAF como árido son:

- Resistencia a compresión a los 7, 28 y 90 días
- Resistencia a flexión (flexotracción)
- Resistencia a la tracción indirecta (brasileño)
- Resistencia a la penetración de agua a presión

### 4.4.1. Resistencia a compresión

La realización de este ensayo se ha efectuado de acuerdo con la norma UNE 83507 “Hormigones con fibras. Rotura por compresión” (Aenor 2004) al tratarse de hormigón con fibras HRF y para la amasada **E** según la Norma UNE-EN 12390-3: 2009/AC “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de las probetas” (Aenor 2011). El equipo utilizado es una máquina universal de ensayos mecánicos, de la marca SERVOSIS, modelo MES de 3000 KN de capacidad, que dispone de un equipamiento electromecánico para controlar los ensayos de tracción indirecta, compresión y flexión (Imagen 4.6).



Imagen 4.6 Equipo utilizado para la determinación de resistencia a compresión

La máquina está provista de un sistema de regulación de carga y dispone de varios platos de acero en las caras de contacto con las probetas. El plato inferior tiene unas marcas que sirven de guía para un correcto centrado de la probeta. El elemento de lectura de cargas dispone de un indicador de la carga máxima alcanzada.

Para llevar a cabo el ensayo, las probetas se colocan centradas respecto al plato inferior de la máquina y, a continuación, se hace descender el eje del pistón hasta que el plato superior haga contacto completo con la cara superior de la probeta cúbica.

Para determinar la resistencia a compresión se han utilizado probetas cilíndricas de diámetro 150 mm. x 300 mm. de altura, refrentadas con mortero de azufre (Imagen 4.7) siguiendo la norma UNE 83506 “Hormigones con fibras. Refrentado de probetas con mortero de azufre” (Aenor 2004).



Imagen 4.7 Probetas preparadas para ensayar a compresión

Los ensayos a compresión se han efectuado a edades del hormigón de 7, 28 y 90 días de cada una de las amasadas y los resultados obtenidos con media de tres probetas de cada dosificación y de cada edad, se recogen expresado en MPa en el siguiente Gráfico 4.3.

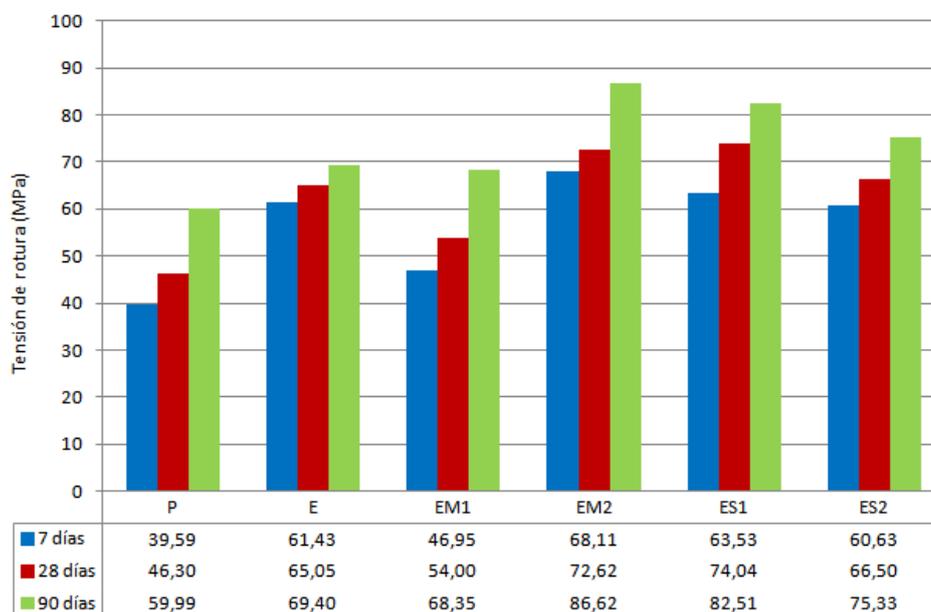


Gráfico 4.3 Resistencias a compresión fase experimental a 7, 28 y 90 días

A la vista de los resultados obtenidos se puede destacar que todas las masas con áridos de escoria negra EAF a los 28 días consiguen unas resistencias superiores a los 54 MPa, que abstrayéndose de la influencia de las fibras supone un 43% de incremento medio sobre la patrón **P**.

También se aprecia, dentro de las masas con escorias, dos grupos diferenciados, el primero (**E, EM1 y ES2**) con resistencias más bajas mientras que el segundo (**EM2 y ES1**) con mayores resistencias, por lo que no se puede atribuir ventajas a las fibras con respecto a la resistencia a compresión.

La resistencia de masa patrón **P** sin escorias pero con fibras se queda bastante por debajo del resto, lo que también hace pensar que la mayor resistencia del resto de las masas es más atribuible a las escorias que a las fibras.

#### 4.4.2. Resistencia a flexión (flexotracción)

El objetivo principal de estos ensayos es determinar la resistencia del hormigón con áridos siderúrgicos reforzado con fibras, bajo condiciones de flexión con la aplicación de dos cargas iguales y simétricas, colocadas a los tercios de la luz (flexotracción). Las probetas prismáticas, con un tamaño de 150x150x600 mm o de 100x100x400 mm, han sido ensayadas según la

norma UNE 83509 “Hormigones con fibras. Rotura por flexotracción” (Aenor 2004).

Los ensayos se han realizado en ambiente de laboratorio, a una velocidad de aplicación de carga de 1 kN/s utilizando una máquina de ensayos ICON modelo 120 TF, con un módulo de mandos marca SISTEMAS DE ENSAYOS modelo SDC - 01 con una capacidad máxima de carga de 1200 kN (120 Tm). Consta de un motor y depósito hidráulico unido a un bastidor de acero que aloja un plato inferior y otro superior, entre los que se colocan las probetas. Se aplica para ensayos mecánicos de resistencia a compresión, flexión y tracción de diversos materiales.

Este ensayo se realiza sobre probetas prismáticas con cargas aplicadas en los tercios de la luz entre ejes de apoyos, estas probetas prismáticas, deben tener una longitud total mínima de 150 mm y mayor que el triple del canto de la probeta a ensayar (Imagen 4.8).

La relación entre el ancho y el canto de la probeta no debe ser superior a 1,5. No obstante, habitualmente ambas dimensiones son iguales. Se recomienda emplear las probetas de sección 100x100 mm o de 150x150 mm. La dimensión más pequeña de la probeta nunca será inferior a tres veces el tamaño máximo del árido grueso, ni a dos veces la dimensión máxima de la fibra.



Imagen 4.8 Equipo de ensayo a flexotracción con probeta de ensayo

En esta fase experimental para el ensayo de flexotracción se han empleado dos tamaños de probetas, 150x150x600 mm y 100x100x400 mm, dado que la dimensión máxima de las fibras empleadas son de 50 mm y 48 mm, se cumple con el apartado anterior de la norma UNE 83509 (Aenor 2004).

El mecanismo para la aplicación de las cargas consistirá en dos rodillos para apoyo de la probeta y dos rodillos para aplicación de la carga. La

distancia entre rodillos de apoyo debe ser 3 veces la dimensión menor de la probeta,  $d_2$  con una precisión en su separación de  $\pm 0,5$  mm.

La tensión de rotura se calcula por medio de la expresión:

$$f_{cd} = \frac{Fl}{d_1 d_2^2}$$

Donde

$f_{cd}$  es la tensión de rotura por flexión, en N/ mm<sup>2</sup>

F es la carga de rotura, en N

L es la distancia entre apoyos, en mm

$d_1$  es el ancho medio de la probeta, en mm

$d_2$  es el canto medio de la probeta, en mm

Los resultados del ensayo de flexotracción se reflejan en el Gráfico 4.4.

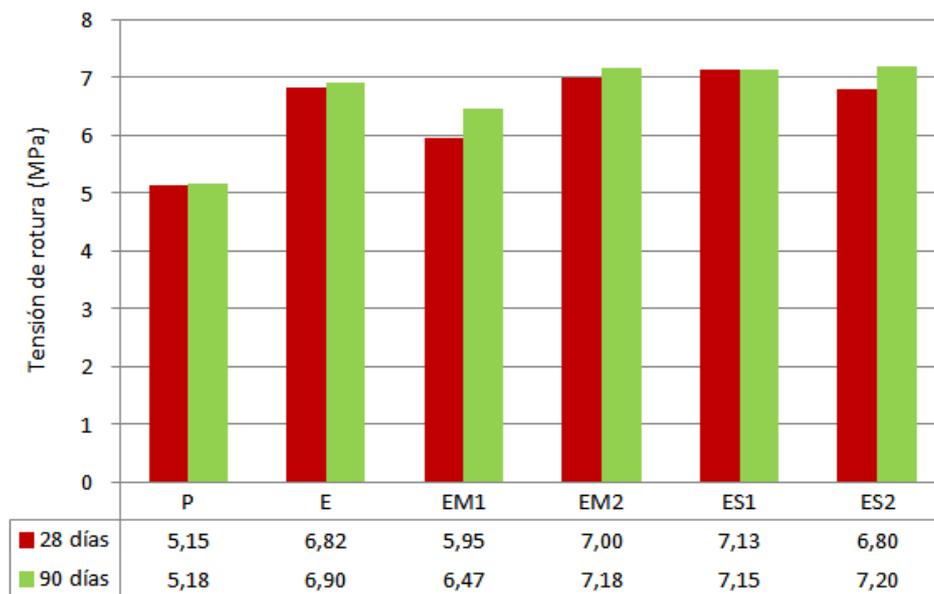


Gráfico 4.4 Resistencias medias a flexotracción fase experimental a 28 y 90 días

Los resultados del ensayo de flexotracción, son muy semejantes a los de compresión del ensayo anterior, las amasadas con escoria presentan una resistencia media superior en un 30,8% con respecto a la amasada patrón **P** sin escorias. Todas las amasadas con escorias presentan una resistencia muy semejantes, bien sea con fibras o sin ellas, salvo la

amasada **EM1** que muestra algún problema de amasado y/o hidratación de cementos y áridos siderúrgicos.

#### 4.4.3. Tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Este ensayo se realiza según la norma UNE EN 12390-6 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas” (Aenor 2010) y consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

Este ensayo se ha realizado con la misma prensa con la que se ha realizado el ensayo de compresión, adaptándola los dispositivos de apoyo curvos necesarios para el ensayo (Imagen 4.9).

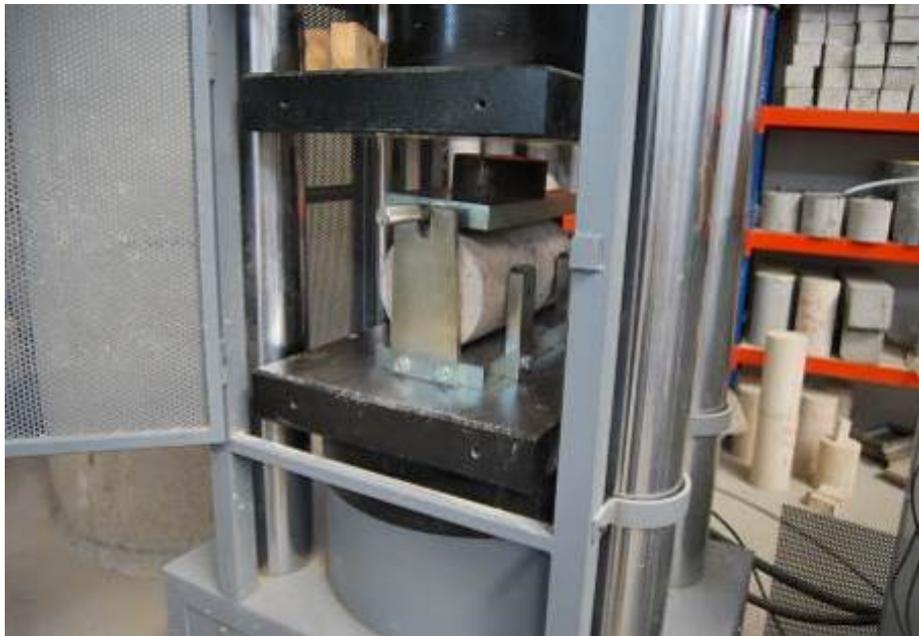


Imagen 4.9 Equipo de ensayo de tracción indirecta

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano

diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo. Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

La probeta se coloca centrada en la prensa, se sitúan con cuidado las bandas de apoyo y, si fuera necesario, las piezas de carga, a lo largo de la parte superior e inferior del plano de carga de la probeta (Imagen 4.10).

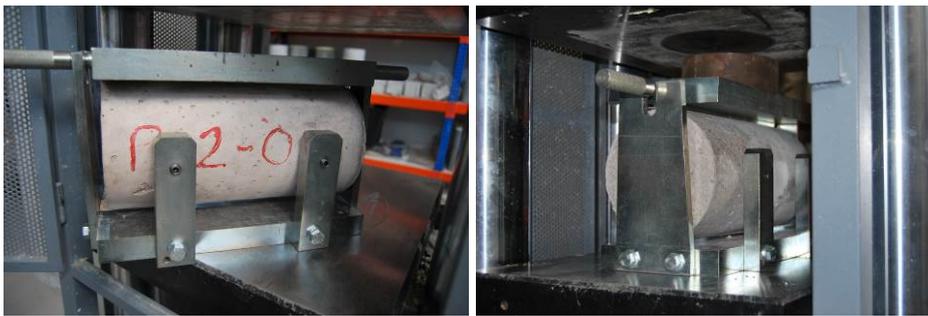


Imagen 4.10 Ensayo de probetas a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta viene dada por la fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld}$$

Donde

$f_{ct}$  es la resistencia a tracción indirecta, en (MPa) o  $N/mm^2$

F es la carga máxima en N

L es la longitud de la línea de contacto de la probeta, en mm

d es la dimensión de la sección transversal, en mm

Los resultados de este ensayo de tracción indirecta se reflejan en el Gráfico 4.5.

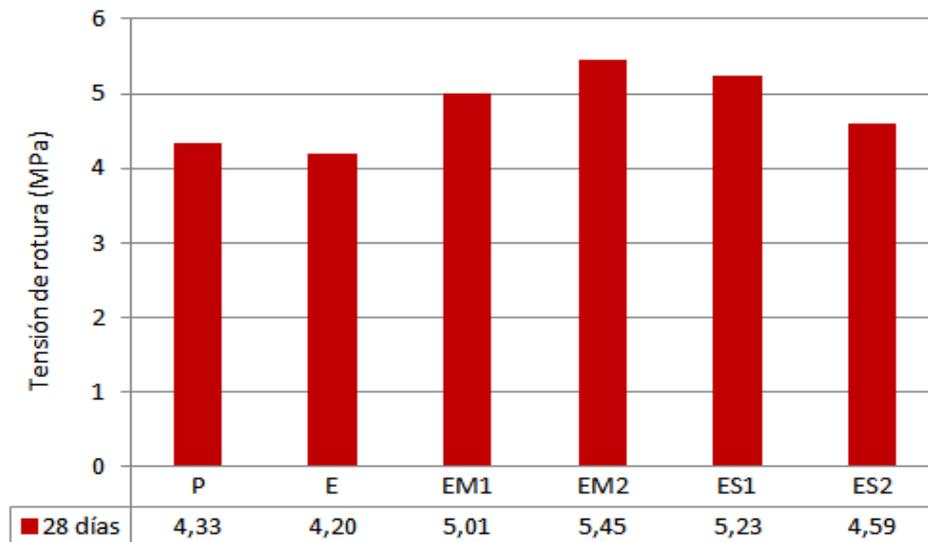


Gráfico 4.5 Resistencias medias a tracción indirecta en la fase experimental

Se constata mejor resistencia en las amasadas con áridos siderúrgicos que la patrón **P**, salvo la amasada **E** sin fibras por lo que aquí sí que muestran las fibras su característica para resistir esfuerzos de tracción.

De las amasadas con fibras la que tiene mejor comportamiento en este ensayo es la **EM2** con mayor cantidad de fibras metálicas seguida de la **ES1** que muestra siempre mejor comportamiento que la **ES2** con mayor cuantía de fibras sintéticas. Es posible que la mayor cantidad de fibras en esta amasada perjudique las características resistentes, bien por amasado más problemático, bien por una menor hidratación de los compuestos, etc.

#### 4.4.4. Resistencia a la penetración de agua a presión

Dado que el principal uso del hormigón que se está investigando en este trabajo es el de utilizarlo en pavimentos y soleras y por el hecho de estar en contacto con el terreno y con las inclemencias atmosféricas en muchas ocasiones, parece lógico que se analice el comportamiento de estos ante la posibilidad de penetración de agua en el hormigón, propiedad que influirá notablemente en su durabilidad.

Este ensayo se ha realizado según la norma UNE – EN 12390-8 “Ensayos de Hormigón endurecido. Parte 6: Profundidad de penetración de agua a presión” (Aenor 2009). El equipo utilizado para el ensayo es de la marca PROETI SA y modelo HO 330 (Imagen 4.11), y se han utilizado

probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, con una edad de curado de las mismas como mínimo de 28 días.

Para la realización del ensayo primero, nada más desmoldar la probeta, se desbasta la superficie de la cara de la probeta que va a estar expuesta a la presión del agua con un cepillo de púas metálicas y se cura según la norma UNE – EN 12390-2. Se debe realizar un sellado impermeable con caucho u otro material similar. Las dimensiones de la zona de ensayo deben ser de aproximadamente la mitad de la longitud del lado o del diámetro de la superficie de ensayo.

No se aplica el agua a presión a la cara fratasada de la probeta. La probeta se coloca en el equipo de ensayo y se aplica al agua una presión de  $(500 \pm 50)$  kPa durante  $(72 \pm 2)$  h. Durante el ensayo, se observa periódicamente el estado de las superficies de la probeta de ensayo no expuestas al agua a presión para identificar la posible presencia de agua.



Imagen 4.11 Equipo de ensayo de penetración de agua a presión

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retira la probeta del equipo de ensayo. Se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua para retirar el exceso de agua. Se rompe la probeta en dos mitades, perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua. Cuando se rompa la probeta, y durante el examen, la cara de la probeta expuesta a la presión de agua se situará en el fondo. Tan pronto como la cara partida se ha secado de forma tal que se puede ver

claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la probeta dicho frente de penetración (Imagen 4.12).

El resultado del ensayo es la profundidad máxima de penetración, redondeada al mm más próximo, no obstante como la EHE-08, en su punto 37.3.3, establece valores máximos y valores medios de penetración, también se aportarán datos de superficie de penetración y de altura media de penetración. Estos datos quedan reflejados en el Gráfico 4.6.

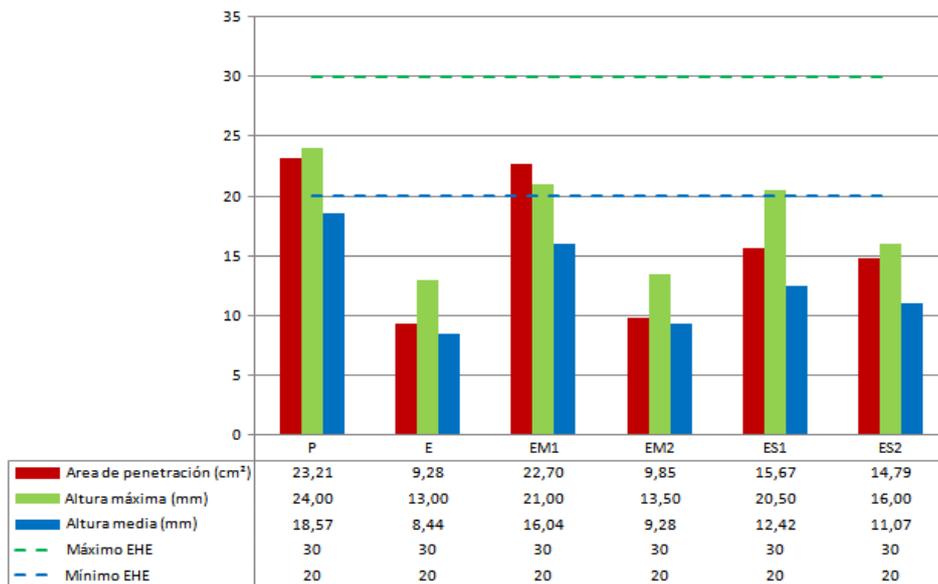


Gráfico 4.6 Áreas, altura máxima y media de penetración de agua a presión con los límites máximo y mínimo de penetración de la EHE, en la fase experimental

Con respecto a la superficie de penetración, se aprecia en el Gráfico 4.6 que las amasadas menos permeables corresponden a las amasadas **E** y **EM2** y las más permeables las amasadas **P** y **EM1**, estando las otras dos en una posición intermedia. Esto ratifica lo afirmado anteriormente en lo que respecta a las menores resistencias obtenidas en la amasada **EM1**. Certifica el buen comportamiento de la **EM2** y demuestra también que la amasada **P** es un hormigón más poroso que el resto lo que se correlaciona bien con sus menores resistencias. En el caso de **ES1** y **ES2** las porosidades son análogas entre ambas.

Por lo que respecta a los límites marcados por la EHE, el máximo (en color verde) está muy alejado de todos los valores máximos de penetración resultantes de las distintas amasadas (Gráfico 4.6), mientras que el mínimo (en azul) aplicable a las columnas de altura media en azul, ningún valor

llega a alcanzarlo, la única amasada que se aproxima es la amasada patrón P que es la que obtiene peores resultados.



Imagen 4.12 Probetas antes y después del ensayo de penetración de agua a presión

## 4.5. CONCLUSIONES FASE EXPERIMENTAL

### 4.5.1. Conclusiones sobre el hormigón fresco

Analizaremos en primer lugar los resultados del hormigón fresco teniendo en cuenta que estas son las amasadas previas. Se han realizado diferentes tanteos previos al amasado de los diferentes tipos de hormigón variando la cantidad del agua o del plastificante, hasta conseguir la dosificación ideal. Obtenemos así las siguientes conclusiones en el caso del hormigón fresco:

La utilización de escorias como áridos en el hormigón con una relación agua/cemento próxima a 0.5 supone tener un cono de Abrams entre 0.5 y 2 cm. Aunque incrementemos el porcentaje de superplastificante el descenso en el cono de Abrams permanece estable, incluso sobrepasando el porcentaje recomendado por el fabricante para un uso normal. La única apreciación destacable es que la escoria amasada permanece en su posición sin descender el cono, pero se nota una caída apreciable de finos en el suelo.

Para realizar la puesta en obra real de este tipo de hormigones con escoria y reforzados con fibras con los medios existentes en obra, se aconseja no bajar la relación agua/cemento de 0,5, ya que no es lo mismo compactar probetas en el laboratorio con mesa vibratoria o vibradores de aguja que hacerlo con más volumen de hormigón in situ en la obra.

Otro aspecto importante a destacar a la hora de la distribución de la fibras en la mezcla, lo constituye el mejor comportamiento de las fibras metálicas frente a las sintéticas, destacando la amasada de menor cuantía, frente a las de mayor donde se apreciaban más cantidad de fibras en el contorno exterior del tambor de la hormigonera que en el interior y centro del mismo.

En cuanto a las fibras sintéticas se puede destacar el apelotonamiento de fibras en la parte inferior de los brazos giratorios de la hormigonera, debido a que, al no ser tan rígidas como las metálicas al discurrir próximas a estos, se doblan, quedándose fijas en ellos. En la amasada con las fibras sintéticas de mayor cuantía se llegó a apreciar la formación de bolas de fibras o erizos, aunque al final del amasado se deshicieron.

#### **4.5.2. Conclusiones sobre el hormigón endurecido**

A la vista de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos del hormigón endurecido, se analizarán éstos en el orden que se han expuesto los resultados en los puntos anteriores.

Se podría pensar que los resultados obtenidos de tensión de rotura a compresión en las diferentes probetas ensayadas de las distintas amasadas, especialmente las que tienen escorias en su composición, podrían corresponder a un hormigón de altas prestaciones, cuando no se ha pretendido en este trabajo tal fin.

Analizando los resultados obtenidos en el ensayo a compresión y reflejados en el Gráfico 4.3, destacan las amasadas **EM2** y **ES1** en cualquiera de las tres edades en las que se han ensayado, que corresponden a los hormigones con escorias y fibras metálicas con la mayor cuantía de  $45 \text{ kg/m}^3$  (**EM2**) y la que lleva fibras sintéticas con la menor cuantía,  $3,5 \text{ Kg/m}^3$  (**ES1**), con valores de 86,62 MPa y 82,51 MPa que se consiguieron a los 90 días.

Es de común aceptación que la adición de fibras al hormigón no conlleva un incremento significativo de la resistencia del hormigón a compresión,

pudiéndose producirse ligeros incrementos o descensos de la misma (ACI-Committee-544 1988).

En el hormigón con fibras de esbeltez 45, 65 y 80, y volúmenes de fibras de 0.5%, 1.0% y 1.5% se encontraron incrementos de la resistencia a compresión entre 4-19% respecto de hormigones idénticos sin fibras (Yazici, Inan et al. 2007). En este trabajo podemos contrastar que este incremento sí que se produce en las amasadas **EM2**, **ES1** y **ES2**., con incrementos medios del 7%, 12% y 22%, según la edad del hormigón. No así la amasada **EM1** que incluso ha decrecido con respecto a la amasada patrón **E** con escorias sólo.

Si nos atenemos a los resultados a los 28 días de edad, todas las amasadas de áridos siderúrgicos obtienen un incremento medio del 43% con respecto a la patrón **P** con áridos naturales y con fibras, lo que nos da pie a pensar que tienen más influencia en este incremento los áridos siderúrgicos que las fibras para este tipo de ensayo.

El hecho de tener tan altas resistencias puede parecer que se está utilizando una cantidad excesiva de cemento. No obstante, una reducción de 50 a 80 Kg/m<sup>3</sup>, no representaría un ahorro importante en el coste final del producto, y sí un posible deterioro del hormigón que afectaría a su resistencia, durabilidad y una pérdida de finos que supondría una merma significativa en su trabajabilidad, ya que se está trabajando con dos materiales que demandan mayor cantidad de finos para su utilización como componentes del hormigón, las escorias y las fibras.

Los resultados que se han obtenido en los ensayos de flexotracción y tracción indirecta, Gráfico 4.4 y Gráfico 4.5, son muy semejantes, destacando el mejor comportamiento de las amasadas **EM2** y **ES1**, al igual que en los ensayos de compresión, correspondiendo a las amasadas con fibras metálicas con mayor cuantía y la de fibras sintéticas con la cuantía menor.

En el ensayo de tracción indirecta se aprecia claramente la influencia de las fibras ya que todas las amasadas con fibras presentan resistencias muy superiores a las de la patrón **P** con fibras y áridos naturales e incluso a la **E** con escoria negra.

El comportamiento en general de las diferentes amasadas en cuanto a permeabilidad es bueno, ya que la EHE-08 en su punto 37.3.3 dice que un hormigón se considerará suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente

para los casos más normales de exposición ambiental, altura máxima de profundidad < 50 mm y altura media < 30 mm; y para los casos de exposición más extremos, altura máxima de profundidad < 30 mm y altura media < 20 mm, según los datos reflejados en el Gráfico 4.6, cumplen incluso para el caso de exposición ambiental más desfavorable, no llegando a alcanzar en ningún caso ni el mínimo exigible, pudiendo considerarse que el hormigón, en todas las amasadas han resultado suficientemente impermeables, obteniendo un resultado mejor incluso que en el hormigón patrón, que también cumple. Destacando la amasada **EM2** y la **ES2** que son las de mayor cuantía de fibras tanto metálicas como sintéticas.

Como conclusión, una vez se ha tenido en cuenta los datos anteriores de los diversos ensayos, se puede afirmar que las cuantías que mejores resultados han obtenido en los diferentes ensayos son:

- Para las fibras metálicas la cuantía de 45 Kg/m<sup>3</sup> correspondiente a la amasada **EM2**
- Para las fibras sintéticas la cuantía de 3,5 Kg/m<sup>3</sup> correspondiente a la amasada **ES1**

Por lo tanto, a partir de ahora se trabajará con estas dos cuantías de fibras en la fase definitiva de caracterización de los Hormigones.



**Caracterización de los hormigones**

## **Capítulo V**



## 5. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez establecidas las cuantías que mejores resultados han arrojado en la fase experimental, pasamos a analizar el comportamiento del hormigón con escoria negra reforzado con fibras metálicas ( $45 \text{ Kg/m}^3$ ), referido a partir de este punto en el resto del documento como dosificación **ML**, y del hormigón con escoria negra reforzado con fibras sintéticas ( $3,5 \text{ Kg/m}^3$ ) como amasada **SL**.

Con el fin de conocer el modo en el que dichas fibras afectan al comportamiento del hormigón, se crea una amasada patrón que denominamos **EL** cuya composición radica en un hormigón con escoria negra sin el refuerzo de ningún tipo de fibras.

### 5.2. DOSIFICACIÓN

La dosificación con que se trabajará en esta fase definitiva es similar a aquella de la que partimos en la fase previa, basada como ya se ha especificado anteriormente en investigaciones anteriores de hormigones con fibras HRF (Turmo, Banthia et al. 2008) y de hormigones con escoria negra EAF (Manso, Hernandez et al. 2011), manteniendo las cantidades de los componentes tanto de cemento como de la escoria negra en sus tres fracciones (gruesa 10/20, media 4/10 y fina 0/4) y el 50% de sustitución de arena de escoria negra por arena silícica aportada para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. La relación definitiva agua/cemento se concretó en 0,55, con el fin de mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco.

En las amasadas que se han realizado en esta fase, el volumen de hormigón realizado cada vez oscila entre  $0.5 \text{ m}^3$  y  $1 \text{ m}^3$  por lo que la hormigonera utilizada ha sido una hormigonera autopropulsada de  $1,5 \text{ m}^3$  de capacidad, con el fin de poder realizar unas losas exteriores reales de  $2,5 \times 2,5 \times 0,15 \text{ m}$  de cada uno de los hormigones de referencia y también con el fin de realizar todas las probetas de un mismo tipo de hormigón en la misma amasada y poder realizar los diferentes ensayos con probetas hechas en la misma mezcla.

La dosificación de los hormigones en las diferentes amasadas en  $\text{Kg}$  para un  $\text{m}^3$  de hormigón se refleja en la Tabla 5.1.

Dosificación	EL	SL	ML
Cemento	363	363	363
Agua ( A/C 0.55)	199	199	199
Arena silícica 0/4	498	498	498
Arena de escoria 0/4	514	514	514
Grava fina de escoria 4/10	669	669	669
Grava gruesa de escoria 10/20	550	550	550
Superplastificante 1.5% C	5.44	5.44	5.44
Fibras Metálicas	-	-	45
Fibras Sintéticas	-	3.5	-

Tabla 5.1 Dosificación de 1 m<sup>3</sup> de las diferentes amasadas

### 5.3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

#### 5.3.1. Relación A/C

Debido a los resultados obtenidos en la medición de la consistencia con el ensayo del cono de Abrams en la fase previa, donde se obtenía una consistencia seca, no superando en ningún caso un descenso en el cono de más de 10 mm, en las dosificaciones con escorias y fibras, se decide utilizar una relación A/C de 0.55 en estas amasadas. Teniendo en cuenta que las resistencias mecánicas de las amasadas previas que se han obtenido son muy superiores a las que se requieren en un hormigón para utilizarlo en soleras y pavimentos, la reducción de resistencia al incrementar la relación A/C a 0,55, no afectará a las características del hormigón con escorias reforzado con fibras.

Los áridos empleados en las amasadas se encuentran en atmosfera seca correspondiente a la zona interior de almacenaje de los talleres de la Escuela Politécnica Superior de la UBU que es donde se realizan las correspondientes amasadas, por lo que este incremento compensa ligeramente el estado seco de los áridos. Algunos investigadores como la doctora Arribas García en su tesis Doctoral (Arribas García 2011), incrementaba la cantidad del agua de amasado en función del coeficiente de absorción teórica de los áridos y del estado de los áridos en el momento de la fabricación del hormigón.

### 5.3.2. Consistencia y docilidad

La consistencia es la aptitud de un hormigón para conservar las posiciones relativas de sus componentes en estado fresco; en este sentido es sinónimo del término, quizás más gráfico de “cohesión”.

La docilidad es la aptitud de un hormigón para admitir deformaciones plásticas, adaptándose a la forma del molde, bajo determinadas condiciones de compactación sin perder su homogeneidad (ACHE 2000).

En esta fase, para determinar la consistencia del hormigón de las distintas amasadas se han utilizados dos sistemas diferentes, teniendo en cuenta que en las amasadas previas no se habían producido un descenso en el cono de Abrams de más de 10 mm y como además se incorpora fibras a la mezcla del hormigón, se ha optado por utilizar el cono invertido para medir la docilidad de la mezcla siguiendo las indicaciones que marca la norma UNE 83503 “Hormigones con fibras. Medida de la docilidad por medio del cono invertido” (Aenor 2004) y la del consistómetro Vebe para medir el asentamiento y por lo tanto la docilidad de la mezcla según la Norma UNE-EN 12350-3 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 3: Ensayo Vebe” (Aenor 2006).

El ensayo de asentamiento del cono de Abrams se ha realizado según marca la Norma UNE-EN 12350-2 ya descrito en la fase experimental y la media de los resultados obtenidos en esta fase definitiva en las diferentes amasadas están reflejadas en la Tabla 5.2



Imagen 5.1 Ensayo de asentamiento

El ensayo de la medida de la docilidad por medio del cono invertido es específico de los hormigones con fibras para determinar la docilidad de estos HRF. El ensayo se ha realizado siguiendo las indicaciones de la Norma UNE 83503 y consiste en medir el tiempo que tarda en vaciarse de hormigón el cono invertido colgado de la tapa de un recipiente de  $355 \pm 2$

mm de diámetro y de  $305 \pm 2$  mm de altura de tal forma que la base más pequeña del cono quede a  $100 \pm 5$  mm del fondo del recipiente.

El cono invertido se llena de hormigón en tres capas de un tercio del volumen del mismo, evitando compactar cada capa pero alisándola por medio de la barra para evitar la existencia de huecos. Una vez lleno se alisa con la paleta o la barra. A continuación y midiendo el tiempo que transcurre, se vibra el cono con un vibrador de aguja de  $25 \pm 3$  mm de diámetro y con una frecuencia mínima de 7000 ciclos/min, situándole vertical y centrado en la base superior del cono y haciéndole descender ya vibrando hasta el fondo del recipiente en  $3 \pm 1$  segundos, evitando tocar el cono con el vibrador. Se detiene el vibrador cuando el cono quede vacío es decir cuando llegue a ser visible el extremo inferior del mismo, midiendo el tiempo de vaciado.



Imagen 5.2 Ensayo del Cono invertido

Los resultados medios de los tiempos de vaciado del cono invertido en las amasadas definitivas se muestran en la Tabla 5.2

El ensayo del consistómetro Vebe consta de dos fases, en la primera se mide el asentamiento del hormigón fresco previamente compactado en el molde con forma de tronco de cono (cono de Abrams) determinado su consistencia y posteriormente se pone en marcha la mesa vibradora del aparato y se mide el tiempo que tarda la cara inferior del disco transparente en cubrirse totalmente de pasta (tiempo Vebe).



Imagen 5.3 Ensayo consistómetro Vebe

Dosificación	EL	SL	ML
Cono de Abrams (mm)	140	60	130
Cono invertido (seg)	67	92	75
Vebe tiempo contacto (seg)	4	5	4

Tabla 5.2 Resultados de asentamientos, cono invertido y webe

Si tenemos que definir la consistencia obtenida con los diferentes métodos utilizados para definir la consistencia de las amasadas, podemos apreciar resultados bastante contradictorios.

Según el cono de Abrams las amasadas **EL** y **ML** tienen consistencia fluida, mientras que la **SL** refleja una consistencia blanda en el límite con la plástica. Sin embargo para HRF es el método menos recomendado para evaluar la consistencia de estos hormigones como se ha mencionado anteriormente en el capítulo 2.4.1.

Con respecto a los otros dos métodos recomendados para los HRF, consistómetro Vebe y el cono invertido, los valores de tiempo recomendados para utilizar como método apropiado el consistómetro Vebe oscilan entre 5 y 30 segundos para que el disco transparente se cubra totalmente de pasta, en nuestro ensayo obtenemos 4, 5 y 4 segundos que

están en el límite inferior de la franja recomendada y que representa una consistencia semi-seca.

Por lo que respecta al cono invertido los valores normales en segundos para vaciar el cono invertido que se recomienda para utilizar este sistema van de 10 a 30 segundos, por lo que los valores obtenidos en las diferentes amasadas 67, 92 y 75 segundos se disparan muy por lo alto.

Hay que tener en cuenta que estas recomendaciones de valores están establecidas para hormigones convencionales con fibras, es decir con áridos naturales. Al intervenir en la mezcla de nuestro hormigón con fibras escoria negra en un porcentaje aproximado del 75% del árido total, todos estos valores correlacionados de estos tres métodos se trastocan, no pudiendo relacionarles entre sí. El beneficio obtenido por el vibrado en un HRF convencional, anulando la rigidez estática que las fibras proporcionan al hormigón, se ve descompensado con la rugosidad de las escorias que impiden ese deslizamiento.

En base a estos razonamientos se cree que los valores del cono de Abrams pueden considerarse válidos para establecer los tipos de consistencia de las diferentes amasadas, reconociendo que el hormigón conseguido es un hormigón poco trabajable como consecuencia de los dos componentes, fibras y escorias, que intervienen en su fabricación. No obstante el hormigón que se está estudiando en esta tesis, es para utilizarlo en pavimento y soleras que aunque sea poco trabajable, su puesta en obra no es tan exigente como pudiera serlo para otros elementos constructivos y tampoco requiere obligatoriamente bombeo para su puesta en obra.

### **5.3.3. Densidad del hormigón fresco**

Para determinar la densidad del hormigón fresco de las distintas amasadas a realizar se ha seguido la Norma UNE 12350-6 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad (Aenor 2009).

El ensayo consiste en llenar un recipiente rígido del que se conoce su masa y volumen, con hormigón fresco en dos o más capas. Se compacta, en nuestro caso por medio de un vibrador de aguja, manteniéndole en posición vertical y sin tocar las paredes ni el fondo del recipiente, con una duración de la vibración mínima para conseguir una compactación total del hormigón. Se enrasa la superficie retirando la pasta sobrante de la superficie y limpiado el exterior del recipiente. Se pesa el recipiente con su contenido para determinar su masa ( $m_2$ ) (Imagen 5.4).

La densidad se calcula mediante la fórmula:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Donde:

D densidad del hormigón fresco ( $\text{kg/m}^3$ )

$m_1$  masa del recipiente vacío (kg)

$m_2$  masa del recipiente lleno de hormigón y compactado (kg)

V volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ )



Imagen 5.4 Ensayo de densidad del hormigón fresco

La media de los resultados de la densidad del hormigón fresco de las diferentes amasadas se refleja a continuación en la Tabla 5.3.

Dosificación	EL	SL	ML
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	2860	2852	2865

Tabla 5.3 Valores de la densidad del hormigón fresco en las diferentes amasadas

La densidad del hormigón fresco resultante en las diferentes amasadas tiene un valor muy superior al hormigón normal como resultado de la incorporación de los áridos siderúrgicos EAF en la mezcla, pues la densidad de estos con respecto a los áridos naturales, viene a ser de un 10 a un 15% mayor.

La diferencia entre las tres amasadas es muy pequeña, la de mayor densidad corresponde a la amasada que incorpora fibras metálicas por la densidad de estas, y la de menor corresponde a la mezcla con fibras de polipropileno de menor densidad. Sin embargo se debe reiterar que las diferencias no son en absoluto significativas al ser inferiores incluso al 1%.

### 5.3.4. Compactibilidad

En la determinación del grado de compactibilidad de hormigón fresco se ha seguido las indicaciones de la Norma UNE – EN 12350-4 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 4: Grado de compactibilidad” (Aenor 2009). Esta norma especifica un método para determinar la consistencia del hormigón mediante la valoración del grado de compactibilidad.

El ensayo consiste en llenar de hormigón fresco con una paleta, un recipiente de base 200±2 mm x 200±2 mm y de altura 400±2 mm, evitando cualquier tipo de compactación. Una vez lleno, se quita el hormigón sobrante, enrasándolo con los bordes superiores y a continuación se compacta en una mesa vibrante o con vibrador de aguja hasta que no se observe reducción de volumen. Se mide la distancia entre la superficie del hormigón compactado y el borde superior del recipiente en cuatro puntos para sacar la media con lo que se determina el valor “s” (Imagen 5.5).

El gado de compactibilidad viene determinado por la fórmula:

$$c = \frac{h}{h - s}$$

Donde:

*h* altura interior del recipiente (mm)

*s* valor medio de las cuatro distancias de la superficie del hormigón compactado a los cuatro bordes del recipiente (mm)

Los resultados obtenidos del grado de compactibilidad se expresan a continuación en Tabla 5.4.

Dosificación	EL	SL	ML
Grado de Compactibilidad (c)	1,25	1,18	1,16

Tabla 5.4 Grados de compactibilidad de las diferentes amasadas



Imagen 5.5 Ensayo de grado de compactibilidad

A la vista de los resultados de la tabla Tabla 5.4 y según la tabla 5 del apartado 4.2.1 de la norma UNE EN 206-1 “Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad” (Aenor 2000) la consistencia de las tres amasadas determinada con este ensayo corresponde a la C2, ya que los valores están comprendidos entre 1,25 a 1,11 no existiendo ninguna relación directa entre las consistencias contempladas en dicha norma como son: el ensayo de asentamiento, el ensayo Vebe, ensayo de compactibilidad y la mesa de sacudidas.

La compactibilidad del hormigón está directamente relacionada con la consistencia del hormigón fresco. Dependiendo de la consistencia se requiere un esfuerzo mayor o menor de compactación del hormigón fresco.

## **5.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO**

### **5.4.1. Caracterización microestructural**

La durabilidad del hormigón y sus resistencias mecánicas, guardan una estrecha relación con las características de la pasta de cemento, del árido utilizado y de la interacción entre ellos.

Conocer los procesos y reacciones que se suceden en la hidratación de los componentes mineralógicos del Clinker de cemento Portland es necesario para determinar la calidad de los hormigones y morteros de los que forman parte. Las reacciones químicas que se producen en la pasta formada por la mezcla de cemento y agua han sido muy estudiadas con técnicas que analizan sus propiedades físicas y químicas (Mehta 1986, Puertas, Blanco et al. 1989, Sidorova 2013).

Con la adición del agua los componentes del cemento comienzan a hidratarse, estas reacciones de hidratación son muy rápidas y disminuyen de velocidad con el paso del tiempo. Una vez producida la hidratación, comienza el fraguado de la pasta, perdiendo su consistencia plástica y empezando a desarrollar sus resistencias mecánicas.

La hidratación de cemento portland origina diferentes fases morfológicas de silicatos cálcicos hidratados (denominados genéricamente “gel C-S-H”), hidróxido cálcico (CH), ettringita (fase  $AF_f$ ) monosulfoaluminato hidratado (fase  $AF_m$ ), y ocasionalmente pequeñas cantidades de otras fases. Todos estos compuestos junto con los componentes del Clinker no hidratados forman el conjunto de elementos microestructurales sólidos de la pasta de cemento (Mehta 1986, Puertas, Blanco et al. 1989).

El silicato cálcico hidratado (C-S-H) es el más abundante constituyendo alrededor del 50 al 60% de los componentes sólidos de la pasta (Diamond 1976). Este componente genera importantes cantidades de enlaces por unidad de superficie, siendo el principal responsable de la capacidad adherente del material y de su durabilidad en el tiempo. Aunque su estructura no es cristalina, si contiene una cierta ordenación con formas variables, por lo que también es responsable de otras propiedades de la pasta de cemento como la porosidad, la permeabilidad o su fluencia (Goñi, Guerrero et al. 2011).

Los dos compuestos mineralógicos que se forman en el proceso de hidratación de los silicatos de calcio son el silicato bicálcico (belita) y silicato tricálcico (alita). Estos dos silicatos de calcio al hidratarse se convierten en silicato cálcico hidratado, denominado tobermorita gel, liberando distintas cantidades de hidróxido de calcio.

Otro compuesto que también se forma en los procesos de hidratación del Clinker de cemento Portland es el hidróxido cálcico o Portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], que se estructura en formas planas o hexagonales de gran tamaño y constituyen el 20-25% del volumen de sólidos de la pasta de cemento, siendo esencial su presencia para mantener el pH de la pasta de cemento entre 12-13, protegiendo las armaduras de los hormigones armados de la corrosión electroquímica.

Un alto contenido de hidróxido cálcico en la pasta del cemento hidratado puede tener un efecto adverso sobre la durabilidad química del hormigón, debido a la elevada solubilidad de CH en medios acuosos (Puertas, Blanco et al. 1989).

La resistencia de la pasta de cemento condiciona el comportamiento de la matriz cementicia en los hormigones y morteros de los que forma parte y es una consecuencia directa de las fuerzas de adhesión y cohesión (fuerzas de Van Der Waals) que se producen entre los diferentes cristales de CSH, de  $\text{AF}_t$  y  $\text{AF}_m$  y las placas de CH.

La durabilidad de los hormigones y morteros depende de la estabilidad de los componentes mineralógicos formados en los procesos de fraguado y endurecimiento, la desestabilización de los enlaces químicos por la acción de sustancias externas o la porosidad generada en los procesos de hidratación pueden tener una influencia muy importante en su durabilidad.

La zona de transición entre el árido y la pasta cementicia es considerada la fase de resistencia límite, es decir, la zona más débil del hormigón

(Mehta and Monteiro 1993). Dicha zona ha sido estudiada desde mediados del siglo XX (Farran 1956) por numerosos investigadores, existiendo un consenso unánime en aceptar que la debilidad de la zona de transición aumenta con la relación a/c y la porosidad presente en esta fase. La longitud de la zona de transición oscila entre 30  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$  (Scrivener 1989).

Las características del árido ejercen una notable influencia en el comportamiento de la zona de transición, de tal forma que la morfología, propiedades físico-químicas y la composición química de los áridos pueden contribuir de manera positiva, mejorando la adherencia e interacción química entre ellos y la pasta (George and Sorrentino 1982, Monteiro 1985).

Numerosos autores (Amaral de Lima 1999, Manso Villalaín 2001, Losáñez González 2005, Pellegrino and Gaddo 2009, Etxeberria, Pacheco et al. 2010, Papayianni and Anastasiou 2010, Arribas García 2011), entre otros, han constatado que los hormigones elaborados con áridos siderúrgicos, presentan una mayor resistencia a compresión que el hormigón fabricado con áridos naturales, como en esta tesis se ha podido comprobar en los ensayos de la fase experimental.

La incorporación de las fibras en el hormigón no mejora inicialmente la resistencia de la pasta cementicia sino que su aportación se realiza a partir de la fisuración, cuando estas fibras cosen las fisuras retrasando y haciendo más dúctil el fenómeno de agotamiento del material compuesto.

Las variables que más influyen sobre las propiedades de los hormigones con fibras son además de las características de la matriz, el contenido en fibras y la eficacia de éstas de estas (ACI-Committee-544 1988 ), dado que en el material compuesto, las tensiones de tracción son soportadas conjuntamente por las fibras y por la matriz hasta que ésta se fisura, instante a partir del cual el esfuerzo aplicado se transfiere progresivamente a las fibras.

La eficacia de las fibras depende de la posibilidad de transferir tensiones a estas desde la matriz, fenómeno que a su vez, es función de las fuerzas tangenciales que se desarrollen en la interfase fibras-matriz.

En el hormigón fresco debido al fenómeno de exudación, se forma una película de agua alrededor de las fibras (Wei, Mandel et al. 1986, Bentur and Cree 1987). Los granos de cemento, con tamaños comprendidos entre 1  $\mu\text{m}$  y 70  $\mu\text{m}$ , no se depositan fácilmente cerca de la superficie de las

fibras, con una notable tendencia a formarse grandes cristales de portlandita en el espacio disponible, nucleándose así parte de este producto en torno de las fibras (Bentur and Cree 1987).

Para cada tipo de fibra, la adherencia fibra-matriz es función de la microestructura de la zona de transición; es decir, depende más de la tendencia a la exudación de la matriz que de la resistencia de ésta. Y como la exudación está íntimamente relacionada con la cantidad de agua de amasado, ésta da una mejor relación con la capacidad adherente de las fibras que la resistencia de la matriz (Bentur and Cree 1987). Por lo tanto resulta vital para mejorar la eficacia del refuerzo disminuir la relación agua/cemento, incrementando así la resistencia a tracción y la microdureza de la zona de transición (Wei, Mandel et al. 1986).

La eficacia de las fibras es proporcional a la esbeltez de las mismas ( $l/d$ ), y su tensión normal suele ser inferior a la de agotamiento, utilizándose en la práctica fibras con una esbeltez ( $l/d$ )  $\leq 100$ .

Es esencial que la adherencia de la unión entre fibra y matriz sea elevada para minimizar el arrancado de fibras. En efecto, la resistencia de la unión tiene gran importancia en el momento de seleccionar la combinación matriz-fibra. La resistencia a la tracción final del compuesto depende, en gran parte, de la magnitud de esta unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la matriz a las fibras.

Con el fin de comprobar esta unión fibra y matriz y la calidad de la matriz cementicia así como la existencia de poros en esta, se han realizado sobre unas muestras de las tres amasadas, unas micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido de electrones retrodispersados (backscattered) y bajo vacío, barrido con nitrógeno, donde se puede apreciar una buena calidad de matriz cementicia, muy compacta, apreciándose fisuras producidas por el ensayo a compresión a las que fueron sometidas las probetas antes de tomar las muestras. A continuación se muestran una serie de estas micrografías de las tres amasadas:

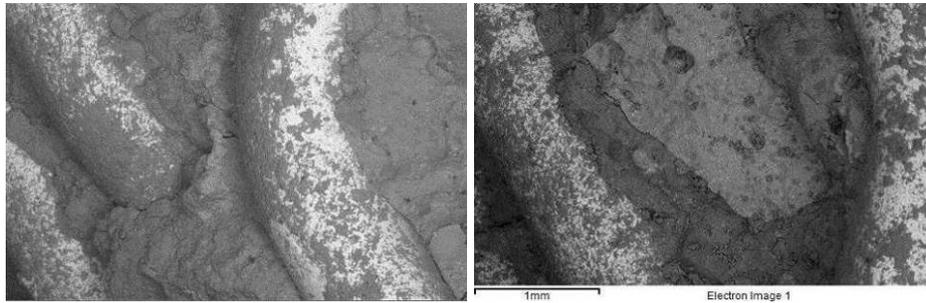


Imagen 5.6 Hormigón ML Izq: Fibras metálicas entre matriz cementicia, en oscuro arena silícea. Dcha: fibra metálica con árido siderúrgico en claro entre matriz cementicia y fisuras del ensayo de compresión

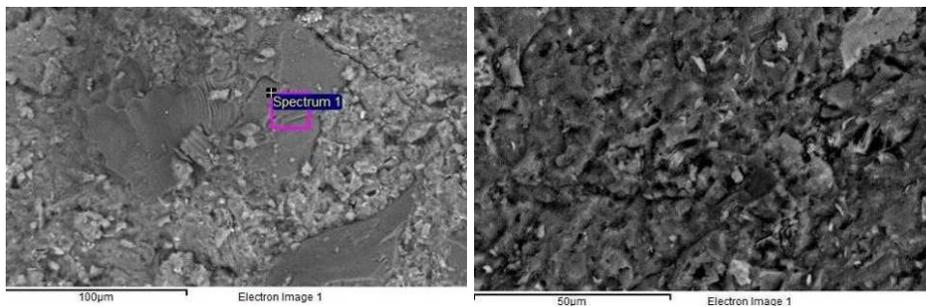


Imagen 5.7 Hormigón ML Izq: Partículas de arena silícea y grietas del ensayo de compresión. Dcha: silicatos cálcicos hidratados, baja porosidad y buena calidad

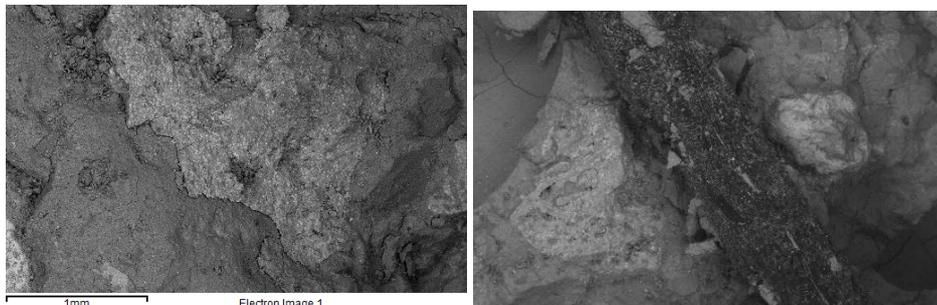


Imagen 5.8 Hormigón SL Izq: Partícula de escoria negra y fisuras de compresión. Dcha: fibra de polipropileno en matriz cementicia con partículas de escoria negra y arena silícea

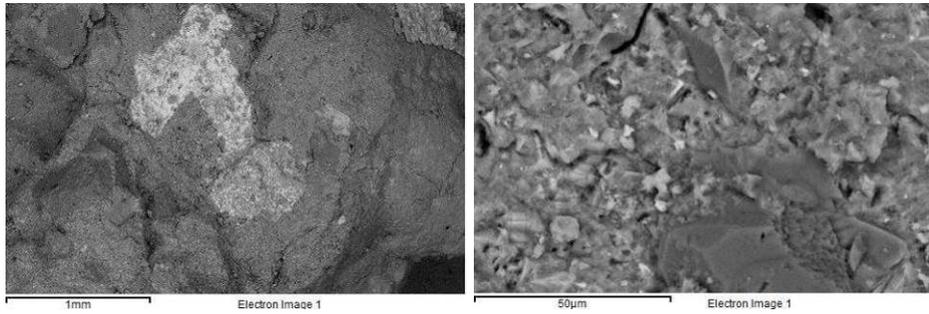


Imagen 5.9 Hormigón SL Izq: Vista general de árido de escoria negra en claro, arena silícea en oscuro y matriz cementicia. Dcha: Aspecto de matriz cementicia con árido silíceo, baja porosidad y fisuras de compresión

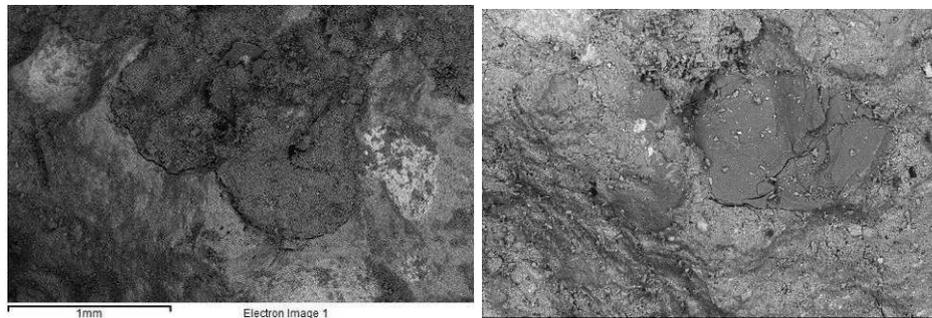


Imagen 5.10 Hormigón P Izq: escorias negras en claro, matriz cementicia y más oscuro arena silícea. Dcha: Aspecto general de partícula de arena silícea en matriz cementicia

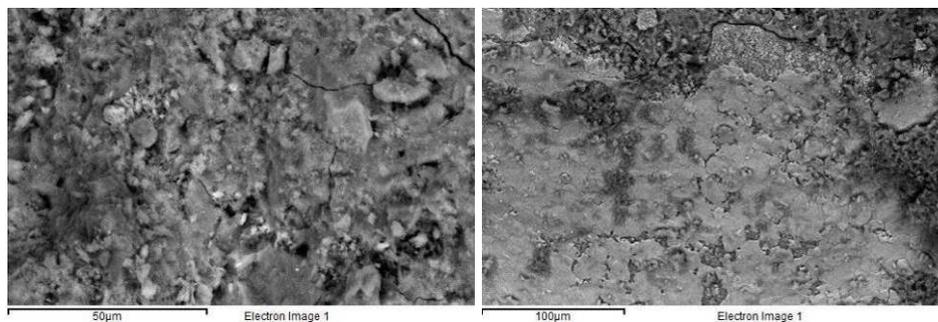


Imagen 5.11 Hormigón P Izq: Aspecto general de matriz cementicia con baja porosidad y fisuras de compresión. Dcha: vista de matriz cementicia con árido de escoria negra y capa de recubrimiento

Por lo general se aprecia en las micrográficas anteriormente expuestas una matriz cementicia de buena calidad con porosidad escasa apreciándose perfectamente los diferentes componentes del hormigón con colores más claros los de mayor densidad y en más oscuro los de menor densidad. También se aprecian en casi todas las imágenes las fisuras producidas por el ensayo a compresión al que fueron sometidas las probetas antes de seleccionar las diferentes muestras.

### 5.4.2. Porosimetría de intrusión de mercurio MIP

Las propiedades mecánicas y en gran medida la durabilidad de los materiales de base cementicia dependen de la porosidad de la pasta y la interfase entre áridos y la pasta de cemento, es por tanto importante realizar el ensayo de porosimetría.

El ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio nos permite determinar la porosidad del hormigón de forma indirecta, de manera que los resultados obtenidos muestran la distribución y volumen de los poros en función del tamaño aparente de acceso a los poros.

El método consiste en introducir mercurio a altas presiones, obteniéndose el volumen de mercurio absorbido para cada intervalo de presión considerado.

El equipo mediante el cual se realiza el ensayo es un Micrometrics Autopore IV 9500, el cual alcanza presiones de 32.000 Psi, lo que se traduce en una capacidad de determinación del tamaño de poro de hasta 0,0067  $\mu\text{m}$ .

Los resultados obtenidos en lo que a microporosidad se refiere se recogen en la Tabla 5.5 que se muestra a continuación.

Porosimetría de intrusión de mercurio MIP	Dosificación		
	EL	SL	ML
Diámetro mínimo de poro (nm)	3,60	3,60	3,60
Diámetro máximo de poro (nm)	216.134,0	216.081,1	215.992,4
Microporosidad (%)	12,33	11,48	10,27

Tabla 5.5 Resultados del ensayo de porosimetría de intrusión de mercurio

El menor diámetro de poro es de 3,60 nm, mientras que el máximo diámetro de poro tiene un valor de 216  $\mu\text{m}$ . Apenas existen diferencias entre las diferentes dosificaciones en lo relevante al diámetro máximo y mínimo de poro.

Los valores de microporosidad nos muestran que la dosificación **ML** obtiene el mejor resultado, siendo este de 10,27%, mientras que la dosificación **EL** obtiene un valor de 12,33%, constituyendo el dato más alto. Para la mezcla **SL** se obtiene una microporosidad de 11,48%. Teniendo en cuenta la contribución nada despreciable del propio árido de escoria negra a este valor, que no ha sido específicamente determinada, nos encontramos en valores de porosidad capilar del orden del 10%, acordes

con los buenos valores de resistencia mecánica a compresión y de permeabilidad de estos hormigones.

Los mejores resultados en cuanto a microporosidad se obtienen para las dosificaciones que incorporan las fibras, ya sean sintéticas o metálicas.

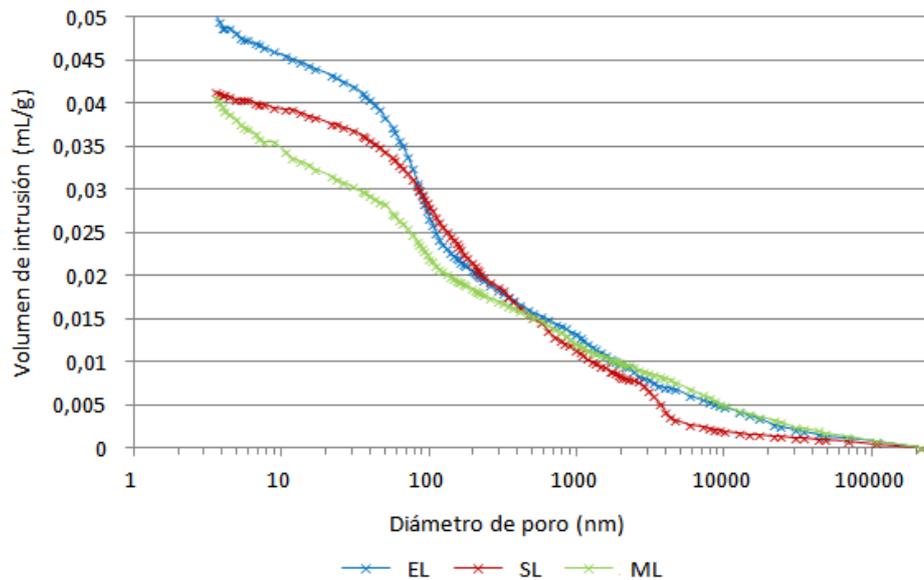


Gráfico 5.1 Diámetro de poro vs. Volumen de intrusión acumulado

El Gráfico 5.1 muestra el volumen de intrusión acumulado de los diferentes hormigones. Se observa que el volumen de intrusión acumulado más alto corresponde a la dosificación **EL**, seguida de la **SL** y por último la **ML**, de modo que mediante esta representación se reafirman los datos de microporosidad anteriormente comentados.

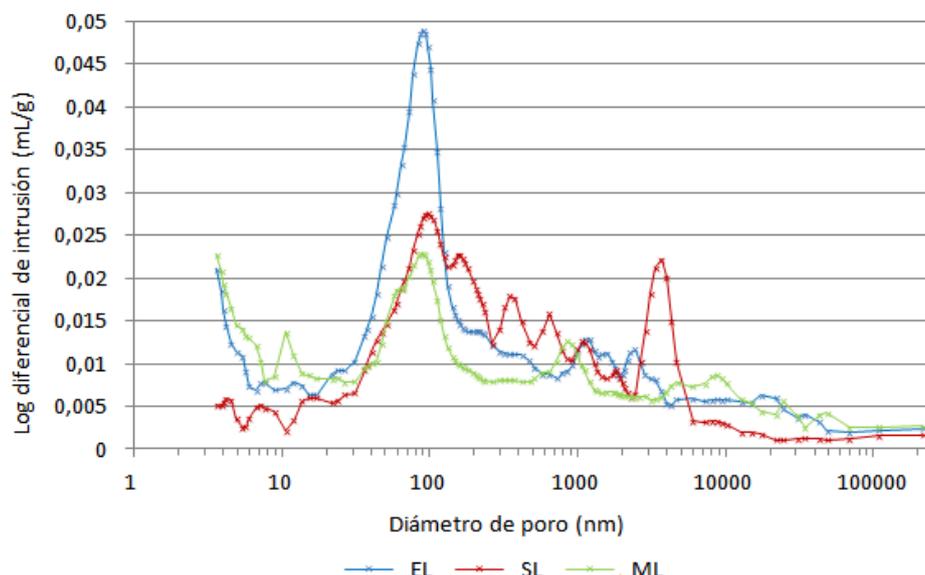


Gráfico 5.2 Diámetro de poro vs. Longitud diferencial de intrusión

En el Gráfico 5.2 se puede visualizar el diámetro de poro que más veces se encuentra presente en la muestra, correspondiéndose con el pico más alto de la curva de distribución. Este punto, igualmente, constituye el diámetro crítico de poro.

### 5.4.3. Absorción de Agua por Capilaridad

La absorción de agua por capilaridad se determina a partir del coeficiente de absorción capilar, este coeficiente depende de la interconexión de la red de poros existente en el interior del hormigón. Este ensayo se especifica en la norma UNE 83982 “Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund” (Aenor 2008).

Las probetas empleadas en este ensayo son cilíndricas, de diámetro  $150 \pm 2$  mm y de altura  $70 \pm 2$  mm. Para la realización del ensayo se requiere de un acondicionamiento previo de las mismas realizado según establece la norma UNE 83966 “Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad” (Aenor 2008).

Una vez acondicionadas y pesadas las probetas, se colocan en un recipiente previamente nivelado y se introduce agua hasta conseguir una altura de  $5 \pm 1$  mm de la lámina de agua en la cara lateral de la probeta,

debiéndose mantener este nivel constante durante la realización de la totalidad del ensayo.



Imagen 5.12 Probetas en el ensayo de absorción de agua por capilaridad

Las pesadas se realizan según se establece en la norma UNE 83982 y precedidas de un ligero secado de la cara en contacto con el agua.

Se comprueba que en la pesada de entre las 384 h y las 456 h, desde el inicio del ensayo, se ha alcanzado en todas las probetas la constancia de masa (diferencia entre dos pesadas inferior al 0,1%) por lo que se desiste de hacer más pesadas y finaliza la realización del ensayo.

En la Tabla 5.6, observamos que el menor coeficiente de absorción capilar y, por tanto, el mejor resultado, se obtiene para la dosificación **ML**, seguida de la **SL** y, por último, de la **EL**.

La porosidad efectiva del hormigón obtiene el mejor resultado para el hormigón tipo **ML**, seguido del **SL**, siendo la dosificación **EL** la que muestra los resultados más desfavorables. Estos valores contribuyen a reafirmar los datos obtenidos en el apartado 5.4.2. de porosimetría por intrusión de mercurio.

Absorción de agua por capilaridad	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>K, Coeficiente de absorción capilar (kg/(m<sup>2</sup>*√min))</b>	0,00228	0,00209	0,00167
<b>Ee, Porosidad efectiva del hormigón (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>	0,0538	0,0493	0,0395
<b>m, Resistencia a la penetración de agua por absorción capilar (min/cm<sup>2</sup>)</b>	558,4	558,4	558,4

Tabla 5.6 Datos del ensayo de absorción de agua por capilaridad

La resistencia a la penetración de agua por absorción capilar hace referencia al tiempo necesario para que la probeta alcance la saturación,

este valor es el mismo para todas las dosificaciones debido a que todas ellas alcanzan el valor de masa constante en el mismo intervalo de tiempo.

En el Gráfico 5.3 se representa la ganancia de masa por superficie ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) en función de la raíz cuadrada del tiempo ( $\text{min}^{0,5}$ ).

En correlación con los resultados mostrados en la Tabla 5.6, observamos que para la dosificación **ML**, con el coeficiente de absorción capilar más bajo, igualmente le corresponde la menor ganancia de masa por superficie, como muestra el Gráfico 5.3, de igual manera sucede para el resto de dosificaciones.

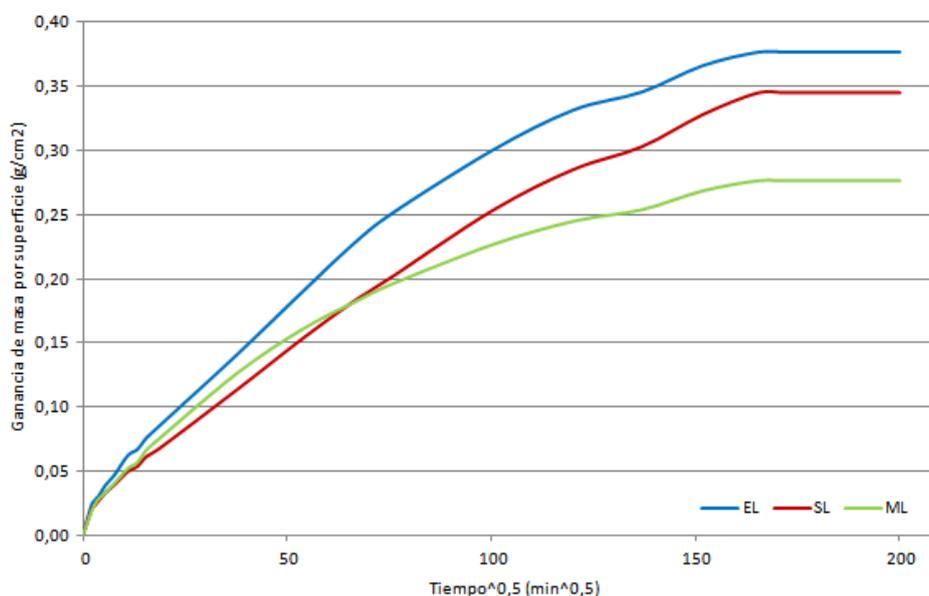


Gráfico 5.3 Curvas de absorción de agua en el hormigón endurecido

Según la norma UNE 83982 y Fagerlund, esta curva se caracteriza por presentar un estado inicial 1, en el que se produce el llenado de agua a través de los poros capilares, y un estado 2, que corresponde a la continuidad de este llenado a través de los poros de aire mediante el proceso de difusión y disolución del aire.

El estado inicial 1 comprende desde el comienzo de la realización del ensayo hasta el momento en el que el frente de agua alcanza la superficie superior de la probeta ( $t_n^{0,5}$ ), este punto queda representado gráficamente por el cambio de tendencia que experimenta la curva, situado en nuestro caso en torno a los  $165 \text{ min}^{0,5}$ .

El estado 2 se establece desde el momento en el que el frente de agua alcanza la superficie superior de la probeta ( $tn^{0.5}$ ) hasta la finalización del ensayo, además en este estado la ganancia de peso de las probetas es nula debido a que ya se ha alcanzado la saturación del material.

#### 5.4.4. Resistencia a compresión

Los ensayos de las probetas de las distintas amasadas se han roto a tres edades significativas del curado del hormigón como como son a los 7, 28 y 90 días para poder analizar su evolución en el tiempo y se han realizado siguiendo las indicaciones de la Norma UNE 83507 para las amasadas de hormigón con fibras (**SL y ML**) y con la Norma UNE-EN 12390-3: 2009/AC para la amasada patrón (**EL**) como ya se ha descrito en el apartado 4.4.1.

Es sabido, y se ha reflejado en el capítulo de caracterización de materiales, que la resistencia a la fragmentación de los áridos siderúrgicos es superior a la de los áridos naturales por lo que como hemos podido apreciar en las resistencias a compresión de las diferentes amasadas en la fase previa, las resistencias a compresión de los hormigones que contienen áridos siderúrgicos en su composición, son superiores a los que están amasados con áridos naturales como quedó reflejado en el Gráfico 4.3.

La Tabla 5.7 y el Gráfico 5.4 presenta los valores de resistencia a compresión de los diferentes tipos de hormigones con fibras (**SL y ML**) y si fibras como amasada patrón (**EL**).

Resistencia a compresión (MPa)	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>7 Días</b>	46,14	53,31	60,25
<b>28 Días</b>	58,80	57,70	67,85
<b>90 Días</b>	72,11	62,52	80,55
<b>Incremento de 7-28 Días</b>	27,44%	8,23%	12,61%
<b>Incremento de 28-90 Días</b>	22,64%	8,35%	18,72%

Tabla 5.7 Resistencias a compresión e incrementos a distintas edades

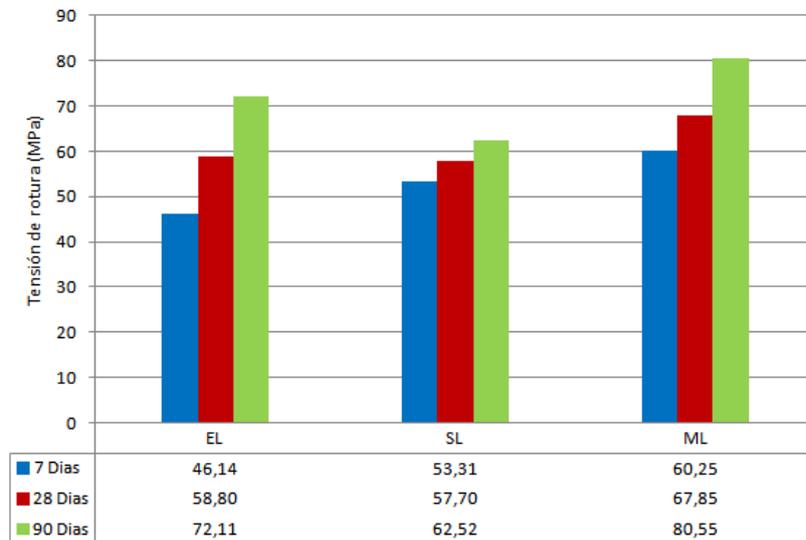


Gráfico 5.4 Resistencias a compresión a distintas edades

La rotura a compresión de las probetas de hormigones con altas prestaciones y las que están próximas a estas como es nuestro caso, cuando no llevan fibras, suelen presentar una rotura explosiva debida a la acumulación de energía, provocando que la probeta pueda saltar en pedazos. Al añadir fibras, este hormigón admite una mayor deformación que evita la rotura explosiva.

La resistencia a compresión de las tres amasadas a 28 días, sobrepasan los 57 MPa, y la evolución en el tiempo de las amasadas **ML** y **EL** son parejas, aunque mantengan una diferencia de 10 MPa aproximadamente, tienen un incremento de un 20% aproximadamente mientras que la **SL** solo incrementa un 8% lo que demuestra que el aporte de fibras para la resistencia a compresión no tiene influencia en el resultado como se comentó en el apartado 4.4.1.

#### 5.4.5. Resistencia a flexión (flexotracción)

El objetivo principal de este ensayo es determinar la resistencia del hormigón con áridos siderúrgicos y reforzado con fibras, bajo condiciones de flexión con la aplicación de dos cargas iguales y simétricas, colocadas a los tercios de la luz (flexotracción). Las probetas prismáticas, con un tamaño de 150x150x600 mm. o de 100x100x400 mm. han sido ensayadas según la norma UNE 83509 cuyo procedimiento operativo y la descripción del equipo utilizado ya ha sido descrito en el apartado 4.4.2.

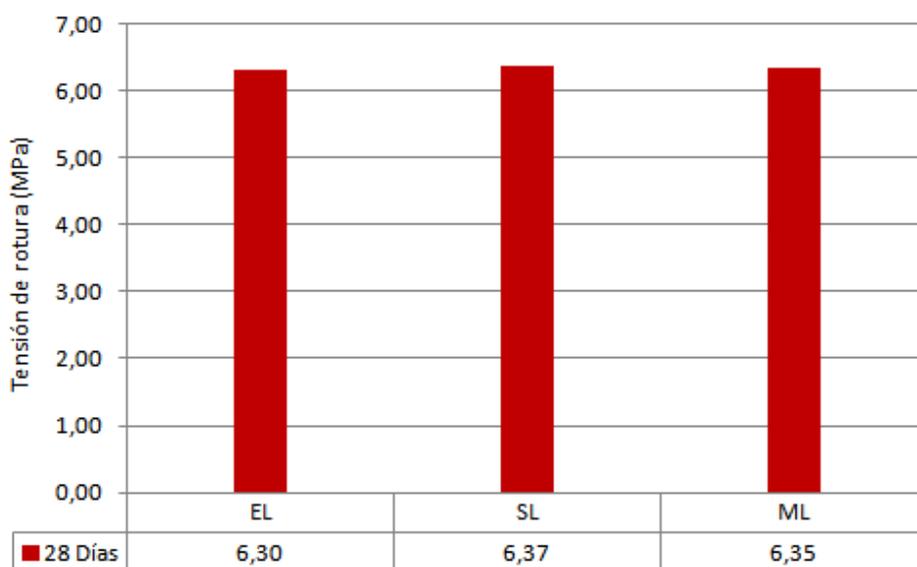


Gráfico 5.5 Resultados del ensayo a flexotracción a 28 días

Analizando los resultados del ensayo a flexotracción se aprecia unos resultados muy homogéneos tanto en las amasadas con fibras como en la amasada patrón sin ellas; esto es debido a la abundante rugosidad que de la escoria negra que consigue mejor adherencia matriz-árido, muy superior a la de los áridos naturales como quedó reflejado en los ensayos previos.

Hay que tener en cuenta que la aportación de las fibras al hormigón se refleja a partir de la primera fisura manifestándose como tenacidad hasta la rotura total. En este ensayo la tensión de rotura se mide hasta la fisuración de ahí el poco incremento en la tensión de las dos amasadas con fibras con respecto a la patrón **EL**.

#### 5.4.6. Tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta como ya mencionamos en el punto 4.4.3 destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Este ensayo se realiza según la norma UNE EN 12390-6 y para edades del hormigón de 28 días en las diferentes amasadas. El procedimiento operativo y la descripción del equipo se realizaron en la fase experimental previa.

Los datos medios obtenidos en este ensayo para las diferentes amasadas se muestran en el Gráfico 5.6

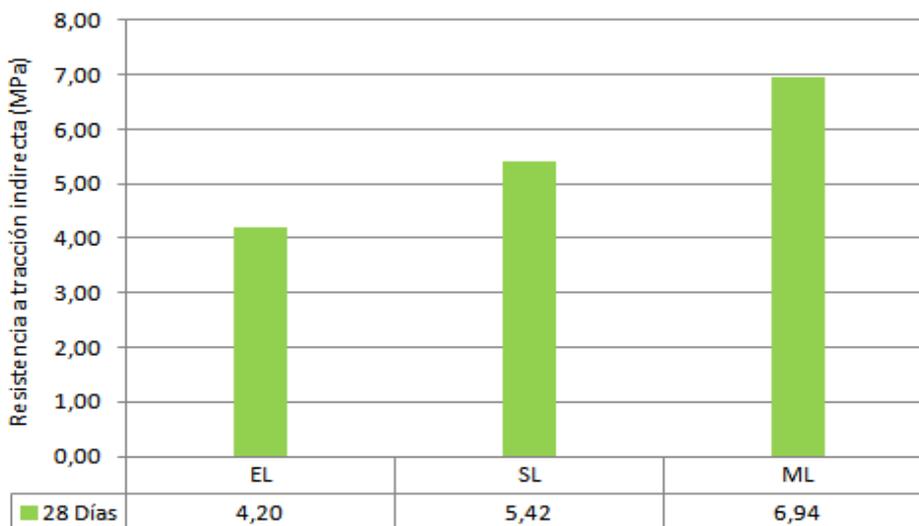


Gráfico 5.6 Resistencia a tracción indirecta a 28 días

En este ensayo se puede apreciar que la incorporación de fibras en el hormigón proporciona una resistencia a tracción indirecta muy superior a la del hormigón sin fibras **EL**, más destacada en la amasada **ML** con un incremento del 65% y del 29% en la amasada **SL** sobre la amasada sin fibras. Aparentemente la aportación de fibras metálicas produce mejores resistencias en este ensayo a tracción indirecta o Brasileño.

#### 5.4.7. Módulo de elasticidad

Se plantea la realización de este ensayo con el fin de conocer el módulo de elasticidad del hormigón con escoria negra, e igualmente se pretende observar si se producen mejoras en dicho parámetro con la incorporación de fibras a este hormigón.

Para la realización de este ensayo se sigue la norma UNE 83316 “Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión” (Aenor 1996). Entre los diferentes ensayos que permiten determinar este parámetro, se selecciona el recogido en la norma UNE 83316 en base a la disponibilidad de los equipos de ensayo en el laboratorio de la Universidad de Burgos.

Durante la realización del presente documento, esta norma ha sido anulada y sustituida por la norma UNE-EN 12390-13 “Ensayos de hormigón

endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión” (Aenor 2014). Sin embargo, los ensayos si fueron realizados durante el período vigente de la misma.

La norma UNE-EN 83316, por la que se realiza este este ensayo, especifica un método para la determinación del módulo de elasticidad estático en compresión del hormigón endurecido.

El ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas refrentadas y curadas de diámetro 150 mm y altura 300 mm.

Se somete a las probetas a cinco ciclos de carga-descarga (Imagen 5.13) y durante los mismos se registran las variables de carga y deformación, esta última con la ayuda de un extensómetro.

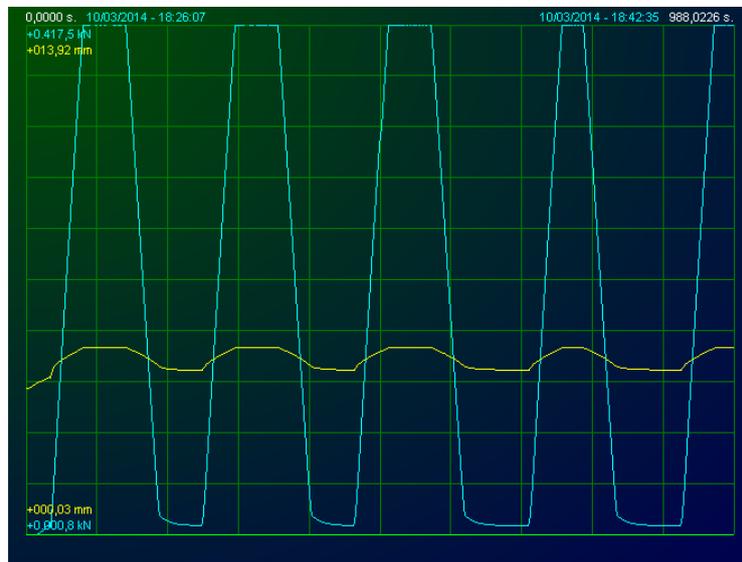


Imagen 5.13 Ciclos de carga- descarga registrados durante la realización del ensayo

El módulo elástico constituye una constante del material en su régimen elástico y se define como la relación entre las tensiones y las deformaciones en una dirección en concreto.

A continuación, se muestra la gráfica en la que se representan los diagramas tensión- deformación obtenidos en las probetas objeto de ensayo. Este valor del módulo elástico a compresión se corresponde con la pendiente de las rectas representadas.

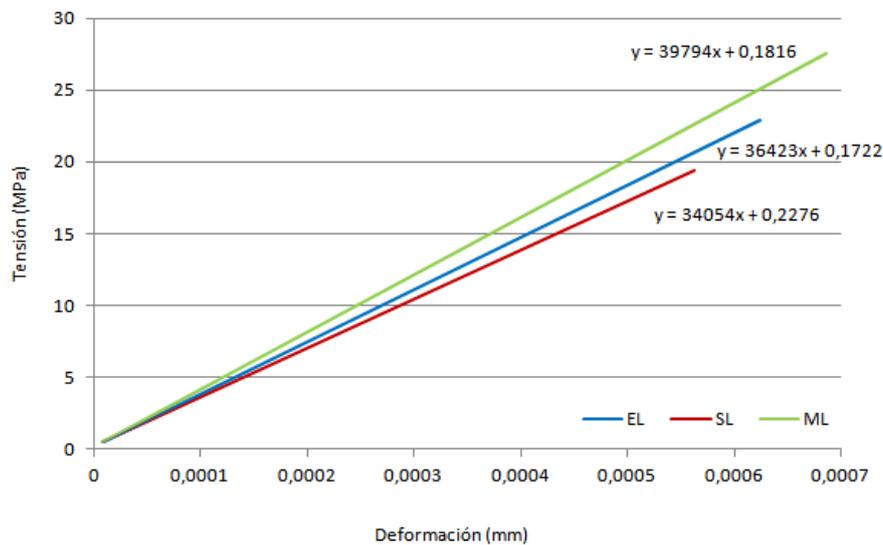


Gráfico 5.7 Pendiente de las rectas correspondientes al módulo elástico de las probetas

Los valores concretos obtenidos en la realización de este ensayo se muestran en la Tabla 5.8. Los resultados obtenidos se redondean a 500 MPa siguiendo las indicaciones de la norma.

Módulo de elasticidad estático en compresión	Dosificación		
	EL	SL	ML
Modulo elástico (MPa)	36000	34000	40000

Tabla 5.8 Resultados medios obtenidos en el ensayo de módulo de elasticidad a compresión

Analizando los resultados obtenidos podemos concluir que los mejores datos se obtienen con la adición de fibras metálicas a la matriz de hormigón con escoria negra, mientras que la dosificación que incorpora fibras sintéticas registra los peores resultados, siendo estos incluso inferiores a los del hormigón sin fibras.

De igual forma, podemos observar como en el Gráfico 5.7 la recta representada para la dosificación **ML** es la que más pendiente tiene y, en consecuencia, el mayor valor del módulo elástico, seguida de la dosificación **EL** y, por último, la **SL**.

#### 5.4.8. Tenacidad e índice de tenacidad

La utilización de volúmenes de fibras inferior al 1% como es el caso de esta investigación puede representar unos incrementos resistentes relativamente marginales, pero sin embargo una de las principales ventajas

del uso de fibras como refuerzo, surge tras fisurarse la matriz, cuando las fibras que cosen las fisuras mantienen una cierta capacidad resistente y van agotándose por pull-out, lo cual permite que sigan aumentando las deformaciones y la energía absorbida.

Por tenacidad se entiende, la cantidad de energía necesaria para un deterioro preespecificado o la rotura completa del material; la variable que más influye en la tenacidad es la adherencia de las fibras (Trottier 1995).

Los métodos utilizados en evaluar la tenacidad difieren en cuanto a dos parámetros (Johnston 1985):

- La velocidad de aplicación de la carga (o de la deformación)
- La naturaleza del esfuerzo aplicado (Tracción directa, compresión simple, flexotracción, etc.)

El sistema más habitual para evaluar la tenacidad son los ensayos de flexotracción, con un único ciclo de cargas a baja velocidad de deformación (Balaguru, Narahari et al. 1992), dado que es un procedimiento más sencillo y que simula mejor, aunque no siempre, las condiciones de carga típicas de muchas aplicaciones prácticas de los hormigones con fibras.

Los métodos de ensayo más utilizados evalúan la tenacidad a través del cálculo del área delimitada por la curva carga-flecha y el eje de abscisas, y se pueden dividir en general dos grandes grupos:

- Los que obtienen la tenacidad para una flecha máxima prefijada
- Los que calculan índices de tenacidad en función de diferentes valores de la flecha obtenidos como múltiplos de la flecha a primera fisura

El valor de los índices de tenacidad depende, sobre todo, del contenido en fibras y del tipo y esbeltez de éstas, y poco, o nada, de que la matriz sea mortero u hormigón; es decir los índices de tenacidad reflejan, principalmente, el incremento de tenacidad debido a las fibras y no a cualquier otro mecanismo de refuerzo como, por ejemplo, el incremento de la resistencia a primera fisura (ACI-Committee-544 1988 ).

Para determinar los valores de tenacidad de las diferentes amasadas de hormigones con escoria negra con fibras que se pretenden caracterizar en esta tesis se van a realizar 4 ensayos que los equipos disponibles en los laboratorios y talleres de la Escuela Politécnica Superior de la UBU nos permiten, con el fin de contrastar los diferentes resultados. Estos ensayos se describen a continuación

#### 5.4.8.1. Índice de tenacidad a compresión

Con intención de comprobar si la adición de fibras sintéticas y metálicas produce un cambio en las propiedades a tenacidad del hormigón, se propone la realización del presente ensayo, entre otros.

Para llevar a cabo este ensayo se sigue el procedimiento descrito en la norma UNE 83508 “Hormigón con fibras. Determinación del índice de tenacidad a compresión” (Aenor 2004).

Se emplean probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura y se colocan en la prensa con dos traductores electrónicos colocados centrados verticalmente en la probeta y a una separación entre ellos de 150 mm como se aprecia en la Imagen 5.14, que miden la deformación de la probeta en la dirección de la carga.

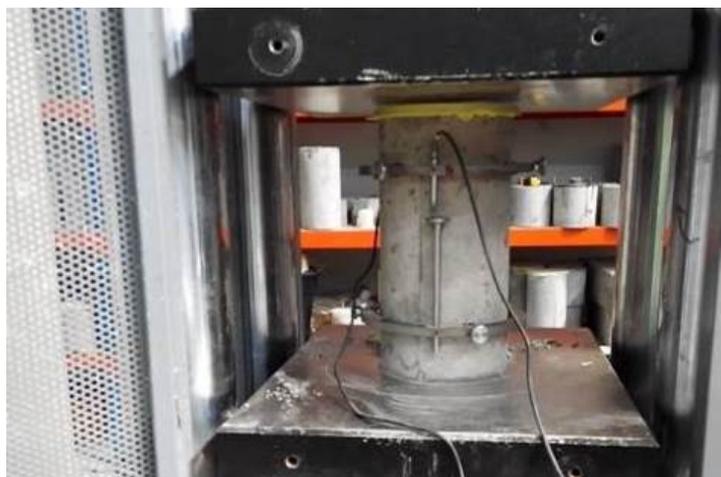


Imagen 5.14 Probeta en el ensayo de tenacidad a compresión

Se registran los datos de carga y deformación de forma que sea posible la representación gráfica de dicha curva y poder obtener así el parámetro de tenacidad a compresión definido en la norma UNE 83508 como el área limitada por la curva carga-deformación desde el origen 0, el eje de abscisas y la ordenada correspondiente a una deformación de 1,125 mm.

A continuación se muestra el Gráfico 5.8 en la que se representa la curva anteriormente descrita obtenida en los ensayos realizados sobre las probetas en el laboratorio. Se pueden ver las curvas para las dosificaciones **ML** y **SL** y el corte de la deformación correspondiente a 1,125 mm.

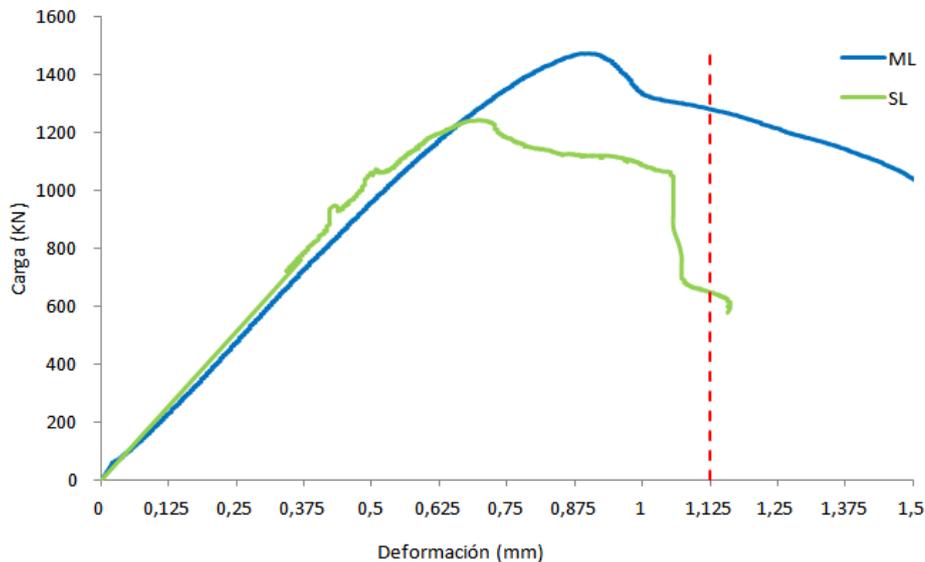


Gráfico 5.8 Curvas carga-deformación para la obtención de la tenacidad a compresión

La dosificación **EL**, una vez que alcanza la carga máxima rompe perdiendo toda su resistencia, de forma que el ensayo se detiene y, consecuentemente, imposibilita la opción de obtener la curva carga-deformación para esta dosificación hasta una deformación de 1,125 mm. De igual manera, tampoco es posible obtener el valor del índice de tenacidad para esta dosificación.

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados obtenidos del ensayo expresado a través de la media de todos los datos registrados

Índice de tenacidad a compresión	Dosificación		
	EL	SL	ML
Tenacidad a compresión (N·mm)	—	1887900	1949300

Tabla 5.9 Resultados del ensayo de Tenacidad a compresión

Observamos en la Tabla 5.9 que para la dosificación **ML** se obtienen mejores resultados que para la **SL**, esto se debe a que el área bajo la curva es mayor en el primer caso.

Observando el Gráfico 5.8 y los resultados de la Tabla 5.9, podemos concluir que las fibras metálicas proporcionan una resistencia postfisuración mayor que el proporcionado por las fibras sintéticas, lo que se traduce en un aumento de la ductilidad del hormigón e incremento en la absorción de

energía, una vez se ha alcanzado el valor de carga máxima soportado por este.

#### 5.4.8.2. Índice de tenacidad y resistencia a primera fisura

Otro de los ensayos propuestos para comprobar la influencia de la adición de fibras sobre el hormigón y relacionado con la tenacidad del material es el que se detalla en la norma UNE 83510 “Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura” (Aenor 2004). Esta norma tiene por objeto especificar el método de ensayo para determinar la resistencia a primera fisura, tenacidad e índice de tenacidad a flexotracción del hormigón reforzado con fibras.

El ensayo radica en el análisis de la curva carga-flecha obtenida en un ensayo de flexotracción con cargas a un tercio de la luz entre ejes de apoyos.

Según cita la norma UNE 83510 la tenacidad mide la capacidad de absorción de energía del hormigón con fibras. En consecuencia, se considera una propiedad del material compuesto y su valor depende tanto de la dosificación, del tipo de fibras y de las características de la matriz. También hace referencia al índice de tenacidad y su dependencia del tipo de fibras y de su dosificación, sin embargo, este valor apenas se ve influido por las características de la matriz.



Imagen 5.15 Probetas en la primera fisura, y al finalizar el ensayo

Las probetas empleadas en la realización de este ensayo son prismáticas de dimensiones 100x100x400 mm. Una vez colocadas en el equipo de ensayo, se aplica la carga a una velocidad tal que se incremente la flecha aproximadamente 0,20 mm/minuto (Imagen 5.15), registrando este valor y la flecha de las probetas mediante un transductor electrónico, obteniéndose así la curva carga-flecha (Gráfico 5.9).

En la Tabla 5.10 se recogen los resultados obtenidos para seis parámetros, los tres primeros se determinan según las recomendaciones de la norma UNE 83510 (Aenor 2004), mientras que para los tres últimos se siguen las indicaciones recogidas en la norma americana ASTM C 1018 “Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-point Loading)” (ASTM 1997).

Parámetros referenciados en la norma UNE 83510 y ASTM C 1018	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>Carga de primera fisura (KN)</b>	23,98	25,16	26,15
<b>Resistencia de primera fisura (MPa)</b>	7,19	7,55	7,85
<b>Tenacidad (N x m)</b>	8,74	35,00	39,23
<b>Índice de Tenacidad (I<sub>5</sub>)</b>	-	3,89	4,54
<b>Índice de Tenacidad (I<sub>10</sub>)</b>	-	6,91	7,76
<b>Factor Resistencia Residual (R<sub>5,10</sub>)</b>	-	60,47	64,40

Tabla 5.10 Resultados obtenidos en el ensayo de índice de tenacidad y resistencia a primera fisura

Los valores de resistencia a primera fisura muestran una leve diferencia entre las tres dosificaciones, sin embargo, los resultados obtenidos para el parámetro de tenacidad son significativamente dispares, especialmente de las dosificaciones **SL** y **ML** con respecto de la dosificación **EL**.

Este aumento considerable del valor de tenacidad se debe fundamentalmente a que la incorporación de fibras en el hormigón le proporciona a este un mayor control de la fisuración y, en definitiva, un aumento de las propiedades a tenacidad del material.

Mientras que las dosificaciones **SL** y **ML** mantienen la integridad de la sección hasta una deformación de 15,5 veces la flecha correspondiente a primera fisura, la dosificación **EL** sufre la fractura de la misma, obteniéndose así un bajo resultado de la tenacidad para dicha dosificación al disminuir considerablemente sus propiedades mecánicas una vez alcanzada la carga de primera fisura.

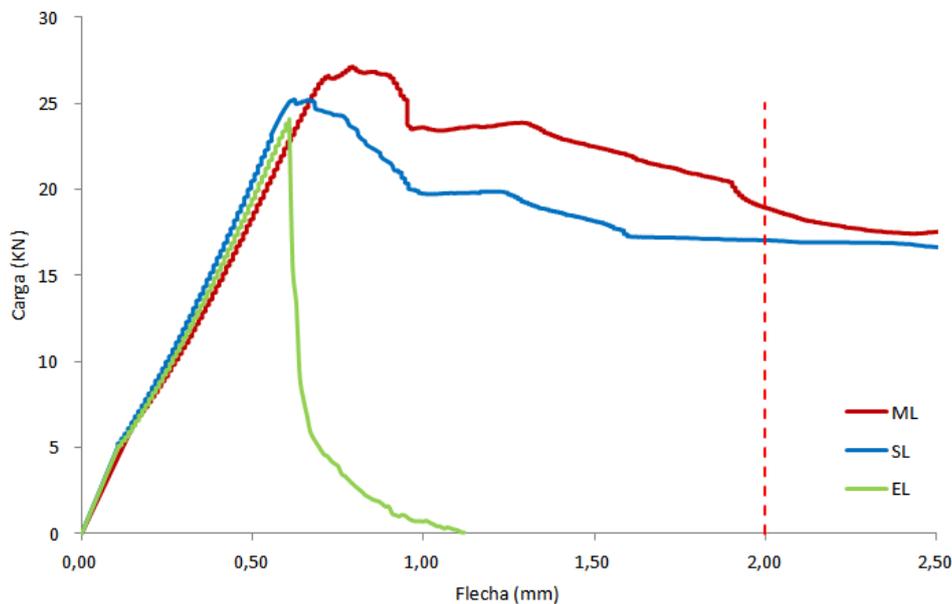


Gráfico 5.9 Curvas carga-flecha de las probetas ensayadas para determinar la tenacidad y la resistencia a primera fisura

Como podemos apreciar en el Gráfico 5.9 y según lo comentado en párrafos anteriores, para la dosificación **EL** no es posible obtener los resultados correspondientes al índice de tenacidad  $I_5$  e  $I_{10}$ , ya que su sección se fractura antes de alcanzar las deformaciones requeridas.

También se hace referencia a los índices de tenacidad, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango razonable para dichos parámetros.

Por último, se calcula el Factor de Resistencia Residual ( $R_{5,10}$ ), siendo este una medida de la resistencia media en los intervalos específicos de flechas, expresada como un porcentaje de la carga o tensión a primera fisura.

#### 5.4.8.3. Método Barcelona. Resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción

Para completar la caracterización del hormigón con fibras se realiza el ensayo descrito en la norma española UNE 83515 "Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a la fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona" (Aenor 2010).

Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción

del hormigón con fibras mediante un ensayo de doble punzonamiento sobre una probeta cilíndrica de dimensiones 150 mm de diámetro y 150 mm de altura.

En la realización del ensayo se emplean discos de carga de acero dispuestos en la cara inferior y superior de la probeta y el plato superior debe estar montado sobre una rotula esférica.

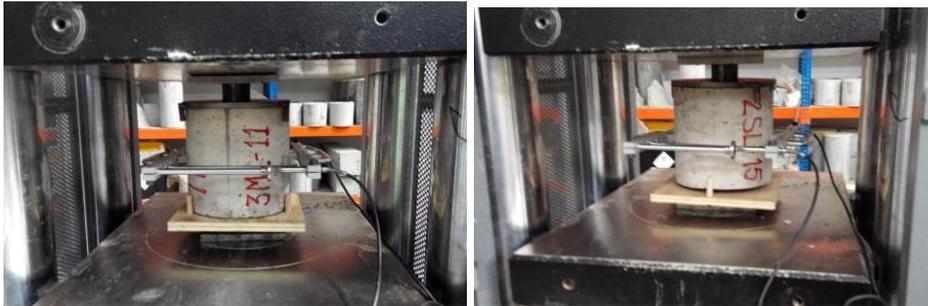


Imagen 5.16 Probetas en el ensayo método Barcelona

Es preciso registrar los valores de la carga aplicada y de la deformación circunferencial, este último con ayuda de una cadena extensométrica.

Los tres parámetros a determinar en la realización del ensayo son el primer lugar la carga de fisuración, que corresponde al valor de carga máxima obtenido. La carga unitaria de fisuración  $F_{ct}$  se calcula a través de la siguiente expresión,

$$F_{ct} = \frac{4 \cdot P_f}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H}$$

Donde:

$P_f$  es la carga que produce la fisuración en N

$a$  es el diámetro del disco de aplicación de la carga en mm

$H$  es la altura de la probeta en mm

El segundo parámetro a determinar es la resistencia residual a tracción del hormigón,  $f_{ctR_x}$ , que se define como la carga unitaria que corresponde a una deformación circunferencial determinada  $R_x$ . Se obtiene según la siguiente ecuación,

$$F_{ctR_x} = \frac{4 \cdot P_{R_x}}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H}$$

Donde:

$P_{R_x}$  es la carga correspondiente a una deformación circunferencial total  $R_x$  en N

$a$  es el diámetro del disco de aplicación de la carga en mm

$H$  es la altura de la probeta en mm

Y por último, la tenacidad para una deformación  $R_x$ , entendiéndose como tenacidad a la energía que es necesaria transmitir a una probeta para que esta alcance una deformación circunferencial total determinada  $R_x$ , la cual viene dada por el área  $TR_x$  de la curva energía-deformación circunferencial hasta una deformación de  $R_x$ .

La carga aplicada a través de los discos de acero de diámetro  $\frac{1}{4}$  del diámetro de la probeta, produce zona una cónica de compresiones bajo estos discos. Esta situación origina un incremento del diámetro de la probeta produciendo esfuerzos de tracción perpendiculares a las líneas radiales de la probeta. Cuando el estado tensional sobrepasa la resistencia del hormigón se produce la fractura de este.

Debido a la concentración de tensiones en planos concéntricos, en el momento de rotura se producen grietas radiales perpendiculares a este campo de tensiones que se propagan desde el centro hacia el exterior. Una vez ocurrida la formación de la primera grieta, generalmente suelen aparecer una o dos más como se puede apreciar en la Imagen 5.17.



Imagen 5.17 Grietas radiales en probetas después del ensayo método Barcelona

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados obtenidos de la realización del ensayo del Método Barcelona. La energía  $TR_x$ , la carga  $PR_x$  y la resistencia residual a tracción del hormigón  $f_{ctR_x}$ , se determinan para los valores de deformación circunferencial de 2 mm, 2,5 mm, 4 mm y 6 mm.

Método Barcelona (UNE 83515)		Dosificación		
		EL	SL	ML
Carga unitaria de fisuración, $f_{ct}$ (N/mm <sup>2</sup> )		4,27	4,32	4,92
Resistencia residual a tracción, $f_{ctR_x}$ (N/mm <sup>2</sup> )	2 mm	3,06	2,57	2,37
	2,5 mm	2,27	3,15	2,96
	4 mm	–	2,18	4,50
	6 mm	–	1,28	2,25
Tenacidad, $TR_x$ (Julios)	2 mm	132,40	112,46	101,48
	2,5 mm	197,99	173,29	158,84
	4 mm	–	358,67	401,90
	6 mm	–	502,65	686,04

Tabla 5.11 Resultados del ensayo Barcelona de las diferentes amasadas

Las fibras metálicas y sintéticas proporcionan una mayor ductilidad al hormigón, lo cual se puede apreciar en el parámetro de tenacidad. Para un hormigón sin fibras, que sería el caso de la dosificación **EL**, su sección se desintegraría para deformaciones circunferenciales inferiores a 4 mm, mientras que para un hormigón que incorpora fibras, siendo el caso de las dosificaciones **SL** y **ML**, se asegura la integridad de su sección hasta deformaciones circunferenciales de al menos 6 mm.

Igualmente se observa como para deformaciones circunferenciales de 2,5 mm para la dosificación **SL** la resistencia residual a tracción del hormigón comienza a disminuir aceleradamente, mientras que para la dosificación **ML** este descenso comienza a partir de los 4 mm de deformación circunferencial, garantizando también ciertas propiedades mecánicas una vez alcanza la carga de fisuración.

Finalmente, una vez realizados y analizados los ensayos relativos a las propiedades a fractura del hormigón, en concreto a la tenacidad, es importante citar el incremento en la capacidad de deformación de los hormigones que estos experimentan al ser reforzados tanto con fibras metálicas como con fibras sintéticas, aunque los datos reflejan un comportamiento algo mejor en los hormigones con fibras metálicas.

Son numerosos estudios confirman la idoneidad de la incorporación de fibras al hormigón a fin de mejorar sus propiedades de tenacidad.

#### 5.4.8.4. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (Límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)

Se completa este apartado de la Tesis relativo a tenacidad e índice de tenacidad, con la realización del ensayo descrito en la norma UNE-EN 14651+A1 "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)" (Aenor 2008).

Este método nos permite establecer el límite de proporcionalidad (LOP) del hormigón, además de un conjunto de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión; aunque es un método específico para hormigón con fibras metálicas también puede aplicarse en caso de fibras de otro material.

Conviene citar que este ensayo se realiza únicamente sobre las dosificaciones **ML** y **SL**, ya que de las tres posibles únicamente estas dos incorporan fibras en su matriz, en consecuencia la mezcla **EL** no es ensayada.

Las fibras metálicas integradas en el hormigón han de tener una longitud máxima de 60 mm, siendo esta en nuestro caso de 50 mm para las metálicas y de 48 mm para las sintéticas.

Las probetas sometidas a este ensayo tienen unas dimensiones de 150x150x600 mm, además se caracterizan por incorporar en su zona central una entalla transversal la cual debe ser inferior o igual a 5 mm realizada con una sierra por vía húmeda.

Una vez colocada la probeta en el equipo de ensayo junto con el transductor que mide el desplazamiento del borde la fisura, se da comienzo el ensayo con la aplicación de una carga transversal uniformemente repartida y coincidente con el plano de la entalla previa Imagen 5.18.

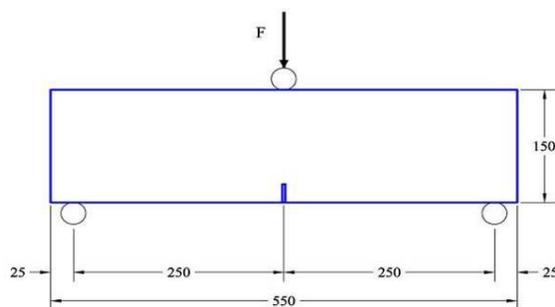


Imagen 5.18 Sistema de cargas y apoyos

El ensayo en esta ocasión para proteger el traductor de desplazamiento de la fisura se ha invertido, aplicando la fuerza en los apoyos y como apoyo en la parte inferior el punto de aplicación de la carga Imagen 5.19.



Imagen 5.19 Aspecto de la probeta en el ensayo LOP al inicio del ensayo y con la fisura producida

Para obtener el valor del Límite de Proporcionalidad es preciso conocer FL (Carga correspondiente al LOP), este valor se corresponde con la máxima carga registrada en el ensayo para un CMOD comprendido entre 0 y 0,05 mm inclusive.

En el Gráfico 5.10 se observa un ejemplo de la curva Carga-CMOD obtenida en este ensayo para la dosificación **ML**. La línea verde representada se corresponde con el límite de CMOD=0,05 mm.

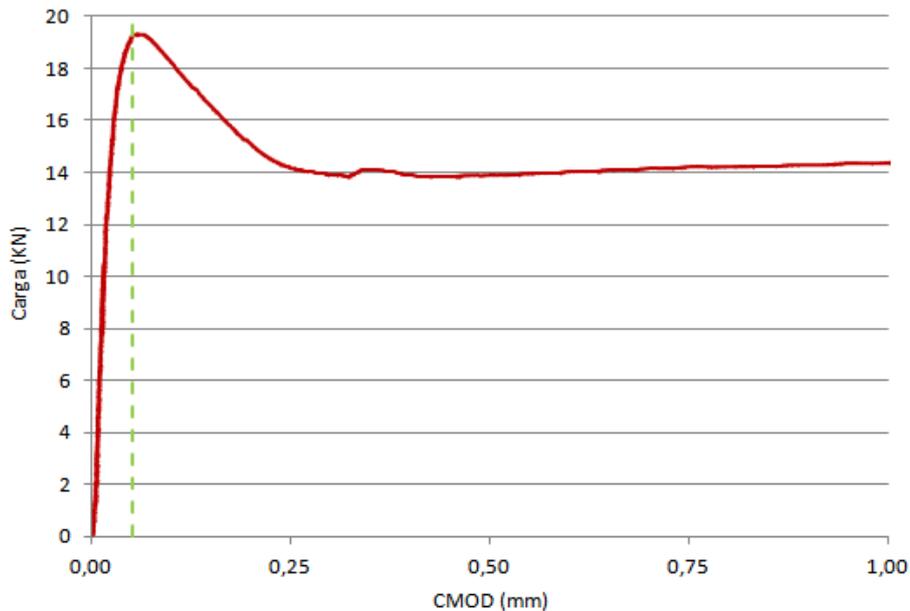


Gráfico 5.10 Curva carga-CMOD obtenida en la dosificación ML

Por otro lado, para conocer la resistencia residual, es necesario conocer las cargas obtenidas para los correspondientes  $\text{CMOD} = 0,5 \text{ mm}$ ,  $1,5 \text{ mm}$ ,  $2,5 \text{ mm}$  y  $3,5 \text{ mm}$ , respectivamente. Estos valores nos describen el comportamiento de post-agrietamiento del hormigón reforzado con fibras.

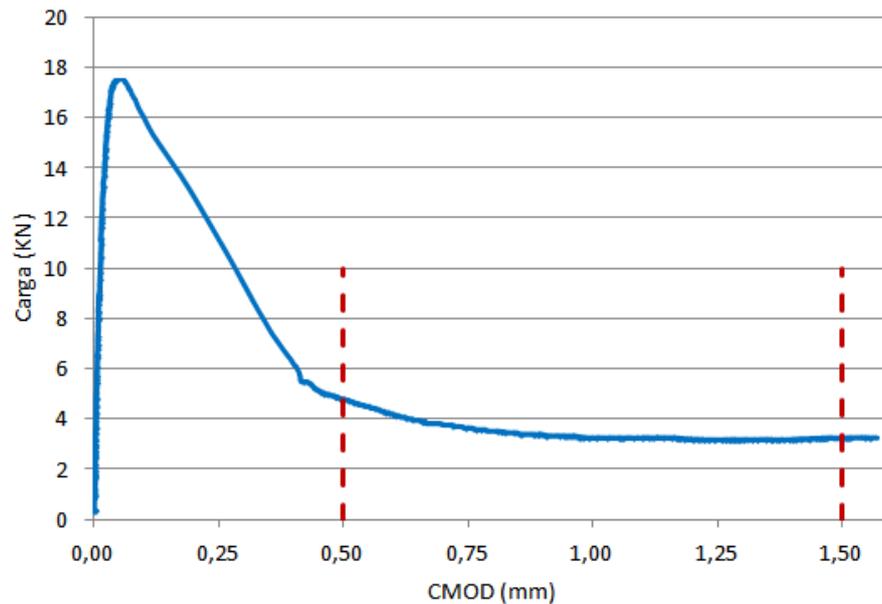


Gráfico 5.11 Curva carga-CMOD obtenida en la dosificación SL

El Gráfico 5.11 recoge la curva carga-CMOD para la dosificación **SL**. En ella se representan dos líneas de color rojo correspondientes a los puntos de  $\text{CMOD} = 0,5$  y  $1,5 \text{ mm}$ . Únicamente se representan dos de los cuatro puntos comentados, por la complejidad de representar tantos datos y la consecuente extensión y pérdida de detalle que sufre el gráfico.

Finalmente los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.12; LOP se refiere al Límite de Proporcionalidad y  $F_{Rj1}$ ,  $F_{Rj2}$ ,  $F_{Rj3}$ ,  $F_{Rj4}$  se corresponden con los datos obtenidos para  $\text{CMOD} = 0,5$ ,  $1,5$ ,  $2,5$  y  $3,5 \text{ mm}$  respectivamente.

	LOP (MPa)	$F_{Rj1}$ (MPa)	$F_{Rj2}$ (MPa)	$F_{Rj3}$ (MPa)	$F_{Rj4}$ (MPa)
<b>SL</b>	5,29	1,45	1,14	1,19	1,24
<b>ML</b>	6,35	5,50	5,38	5,10	4,69

Tabla 5.12 Valores del Límite de Proporcionalidad y resistencia residual obtenidos para las amasadas SL y ML

En el cálculo del Límite de Proporcionalidad, al ser iguales las dimensiones de las probetas ensayadas de las diferentes dosificaciones, la única variable de cálculo es la carga máxima obtenida en el intervalo  $CMOD = 0-0,05$  mm. Lo mismo ocurre para la resistencia residual.

Observando los resultados, vemos que las fibras metálicas permiten alcanzar un Límite de Proporcionalidad mayor que las sintéticas.

Los datos obtenidos para la resistencia residual muestran un mejor comportamiento post-fisuración para la dosificación **ML**.

En la Imagen 5.20 se puede apreciar que la distribución de las fibras es bastante uniforme, no obstante se pueden apreciar algunas calvas sin fibras y una zona con apelmollamiento de estas, lo que puede condicionar los resultados de unas probetas a otras en función del reparto de las fibras e incluso la orientación de estas como lo han destacado algunos investigadores (Grünwald, Laranjeira de Oliveira et al. 2012)

Conviene hacer referencia a Anastasiou, E. K., et Al (Anastasiou, Papayianni et al. 2014), quien realiza este ensayo sobre un hormigón autocompactante al que incorpora escoria blanca de horno de cuchara y fibras metálicas en diferentes porcentaje. Su conclusión en lo referente a las fibras metálicas, sirviendo como complemento a este ensayo, es que el valor del Límite de Proporcionalidad, así como las propiedades a fractura, mejoran con la incorporación de mayor cantidad de fibras, sin embargo este hecho afecta negativamente a la consistencia y segregación en estado fresco del hormigón.



Imagen 5.20 Aspecto de la distribución de las fibras metálicas (Izq) y sintéticas (Dcha) en probetas ensayadas de resistencia a tracción por flexión (LOP)

#### **5.4.9. Resistencia a impacto**

Una de las características principales del hormigón con fibras es el incremento de la resistencia del hormigón sometido a explosiones, caídas

de masas u otros esfuerzos dinámicos de flexión, tracción o compresión que suele ser de 3 a 10 veces mayor que la resistencia del hormigón en masa (ACI-Committee-544 1988 ).

Al ser objeto de la presente tesis un hormigón destinado a uso en pavimentos, se pretende caracterizar su resistencia a impacto mediante la realización del ensayo descrito en la norma UNE 83514 “Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia al impacto” (Aenor 2005).

Las dimensiones de las probetas cilíndricas empleadas en el presente ensayo son 150 mm de diámetro y  $63\pm 1,5$  mm de alto.

Las probetas se colocan sobre la placa base y centradas entre las cuatro pletinas de tope con una de las caras cortadas hacia arriba. Sobre la probeta y centrado en el cilindro posicionador se colocara la bola de acero.



Imagen 5.21 Dispositivo soporte, bola de acero, maza y disposición del ensayo al impacto

La maza metálica (4,534 Kg.) se deja caer verticalmente desde una altura de  $457\pm 2$  mm sobre la bola de acero (Imagen 5.21), tantas veces como sea necesario para producir la rotura de la probeta, anotando el nº de impactos cuando aparezca la primera fisura y el nº de impactos de la rotura de la probeta.

Se considera que se ha alcanzado la rotura cuando la probeta fisurada toque al menos tres de las pletinas de tope.



Imagen 5.22 Probeta con 1ª fisura (Izq), rotura completa (Dcha)

Los resultados a tener en cuenta son la resistencia a impacto a primera fisura y la resistencia a impacto a rotura. La primera de ellas se define como el número de golpes necesario para provocar la primera fisura visible sobre la superficie de la muestra y la segunda como el número de golpes necesarios para producir la rotura del hormigón (Imagen 5.22). En la Tabla 5.13 se muestran la media de los resultados para cada dosificación:

Resistencia a impacto	Dosificación		
	EL	SL	ML
Golpes a primera fisura	11	24	46
Golpes hasta rotura	13	88	155

Tabla 5.13 Resultados del ensayo a impacto de las distintas amasadas

Analizando los resultados obtenidos del ensayo, mostrados en la Tabla 5.13, vemos que la resistencia a impacto a primera fisura y a rotura mejora considerablemente con la incorporación de fibras en la matriz, siendo esta mejora aún más significativa para el caso de la dosificación realizada con escoria y fibras metálicas (**ML**).

La representación de los resultados en el Gráfico 5.12, permite apreciar una mejora apreciable en el valor de golpes hasta primera fisura con la adición de fibras (un 218% la dosificación **SL** y un 418% la **ML**), mientras que el número de los golpes hasta rotura mejora en gran medida (un 675% y un 1200% las dosificaciones **SL** y **ML** respectivamente) con respecto a la dosificación que no incorpora fibras en su matriz.

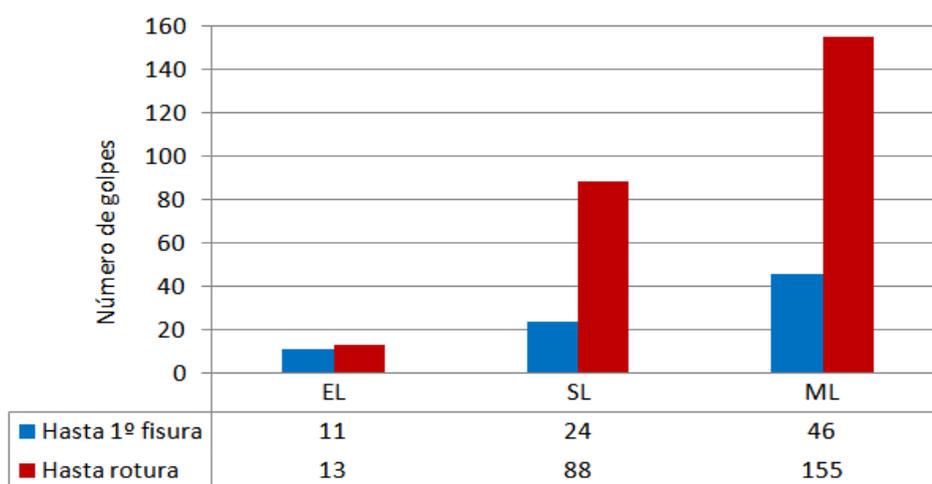


Gráfico 5.12 Resultados del ensayo a impacto de las distintas amasadas

#### 5.4.10. Resistencia a la abrasión

Con el fin de conocer la resistencia a la abrasión del hormigón objeto de esta tesis, se realiza el ensayo de medida de la resistencia al desgaste por abrasión del anexo G de la norma UNE-EN 1338 “Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo” (Aenor 2004).

La norma completa describe varios métodos de ensayo referidos a adoquines y, por tanto, no sería de obligado cumplimiento en nuestro caso. Sin embargo, se propone la realización de este ensayo al ser el hormigón objeto de este estudio específico para pavimentos y no encontrarse bibliografía al respecto para el caso de hormigones.

El ensayo al respecto descrito en el anexo G de la norma UNE-EN 1338 trata del desgaste de una cara del hormigón con material abrasivo, siendo este último corindón.

Las probetas a ensayar deben estar limpias y secas y deben medir, al menos, 100x70 mm.

Se introduce la probeta en el carro portaprobetas de forma que la huella que se produzca en la misma diste 15 mm de los bordes y se pone la probeta en contacto con el disco de abrasión (Imagen 5.23).

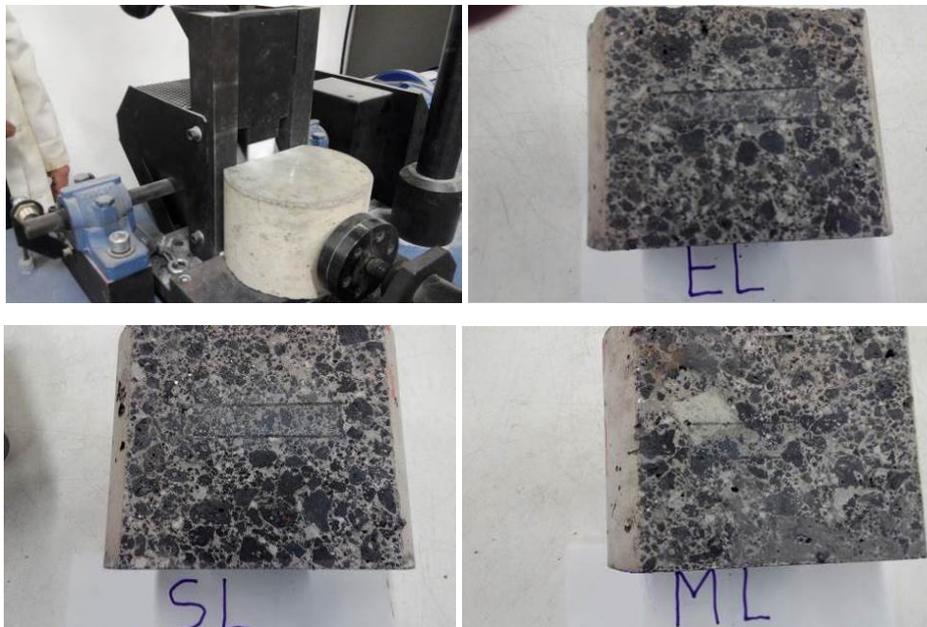


Imagen 5.23 Probeta ensayándose a abrasión y huella de desgaste en cada amasada.

Una vez finalizado el ensayo, se miden las dimensiones de la huella que deja el disco de abrasión sobre la probeta, los resultados obtenidos se muestran en Gráfico 5.13.

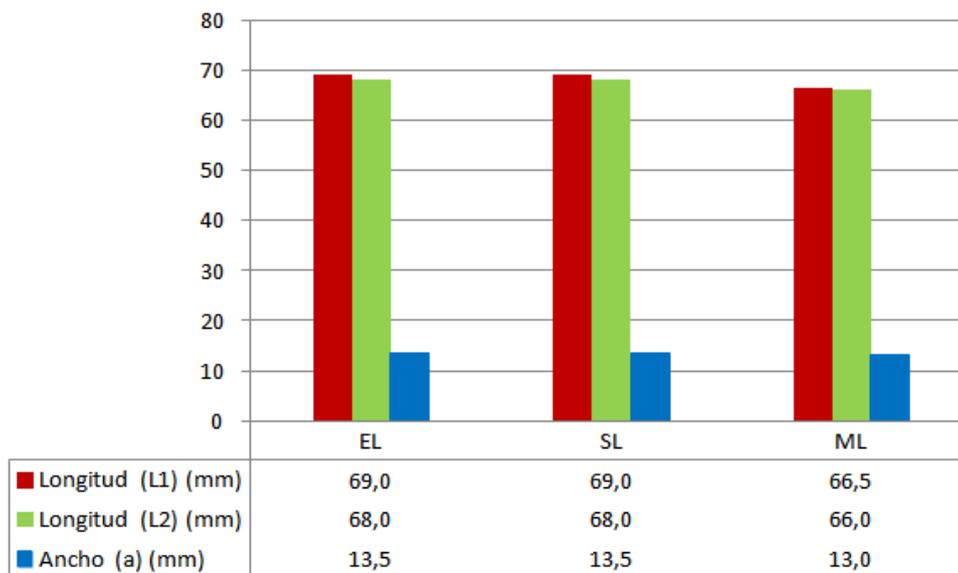


Gráfico 5.13 Ancho y longitudes L1 y L2 de la huella del ensayo de resistencia a la abrasión.

Los datos obtenidos de la realización del ensayo muestran un comportamiento similar para las dosificaciones **EL** y **SL** frente al desgaste por abrasión. Sin embargo, según se observa en el Gráfico 5.13, el hormigón tipo **ML** presenta unas dimensiones de huella inferiores al resto de dosificaciones, lo que se puede interpretar como una mejor resistencia al desgaste por abrasión por parte de este tipo de hormigón, aunque tal y como ponen en evidencia los datos, éste es un parámetro en el que influye más la tipología propia del hormigón que la incorporación de fibras e incluso la naturaleza de las mismas.

## 5.5. CONCLUSIONES

### 5.5.1. Conclusiones sobre el hormigón fresco

A la hora de estudiar la consistencia del hormigón con fibras en este apartado, se han utilizado cuatro métodos diferentes aunque el ensayo de asentamiento del cono de Abrams es el que menos se recomienda en este tipo de HRF, aconsejando más los métodos que utilicen algún sistema de vibrado normalizado en su metodología, por ejemplo el consistómetro Vebe, y el cono invertido.

Los resultados obtenidos son bastante dispares, así el cono de Abrams nos da consistencia fluida para las amasadas **EL** y **ML** mientras que la **SL** refleja una consistencia blanda en el límite con la plástica.

En cuanto a los valores de tiempo recomendados para utilizar como método apropiado el consistómetro Vebe oscilan entre 5 y 30 segundos para que el disco transparente se cubra totalmente de pasta, en nuestro ensayo obtenemos 4, 5 y 4 segundos que están en el límite inferior de la franja recomendada y que representa una consistencia semi-seca, según la norma UNE EN 206-1 en su apartado 4.2.1, Consistencia clase V4.

Por lo que respecta al cono invertido, los valores normales en segundos recomendados para vaciar el cono invertido y poder utilizar este sistema, oscilan entre 10 y 30 segundos, resultando los valores obtenidos en las diferentes amasadas 67, 92 y 75 segundos que se disparan muy por lo alto, no pudiendo asignarles una consistencia determinada.

Estas diferencias en los resultados de estos dos métodos viene propiciada por el tipo de árido utilizado en el hormigón estudio de esta tesis que representa un 75% de árido siderúrgico (escoria negra) y un 25% aproximadamente de arena silícica, mientras que los valores recomendados son para un hormigón con fibras convencional (con áridos naturales). El beneficio obtenido por el vibrado en un HRF convencional, anulando la rigidez estática que las fibras proporcionan al hormigón, se ve descompensado con la rugosidad de las escorias que impiden ese deslizamiento.

El cuarto método utilizado para contrastar la consistencia de las amasadas es el grado de compactibilidad con franja de valores recomendada entre 1,04 y 1,46 y los valores resultantes de nuestras amasadas son 1,25 la **EL**, 1,18 la **SL** y 1,16 la **ML** que según la norma UNE EN 206-1 apart. 4.2.1 corresponde a una consistencia clase C2. Este método también nos da una idea de la trabajabilidad del hormigón, si bien todos los valores están más cerca del valor 1,04 que indica la poca trabajabilidad de estos hormigones, la amasada **EL** es más trabajable y la **ML** la presenta menor trabajabilidad.

No obstante el hormigón que se estudia en esta tesis, con el fin utilizarlo en pavimento y soleras, aunque sea poco trabajable, su puesta en obra no es tan exigente como pudiera serlo para otros elementos constructivos y tampoco requiere obligatoriamente bombeo para su puesta en obra.

Por tanto finalmente se puede concluir que habiendo estudiado por cuatro métodos diferentes la caracterización de estos hormigones desde el punto de vista de su trabajabilidad, los tres primeros métodos (cono de Abrams, consistómetro de Vebe y cono invertido) no son en absoluto adecuados para el caso de los hormigones con áridos siderúrgicos con fibras. Los valores de los ensayos, además de dispersos, no sirven de forma adecuada para los fines deseados.

Existe auténtica dificultad material para llevar a cabo los propios ensayos y finalmente es imposible intentar una correlación entre los tres métodos al objeto de poder estudiar su correspondencia y caracterizar los hormigones frescos aquí diseñados, cosa que no ocurre con los hormigones tradicionales (sin escorias), en los que existe una amplia bibliografía sobre la correlación entre estos tres métodos.

Sin embargo, y en función de la realización del ensayo así como de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el método adecuado para estudiar la trabajabilidad de los hormigones con escorias y fibras es el del grado de compactibilidad. Los valores obtenidos coinciden plenamente con lo observado experimentalmente y con lo observado durante la puesta en obra de los propios hormigones en las Losas de Ensayo de las que con posterioridad se hablará en otro capítulo de esta Tesis.

Por tanto se puede concluir que los hormigones siderúrgicos (EAF) con fibras deben ser caracterizados en estado fresco mediante el ensayo de la norma UNE-EN 12350-4 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 4: Grado de Compactibilidad" (Aenor 2009).

### **5.5.2. Conclusiones sobre el hormigón endurecido**

En las micrografías realizadas de las tres amasadas se puede apreciar una buena calidad de matriz cementicia, muy compacta y con escasa porosidad, diferenciándose perfectamente los diferentes componentes de las mezclas.

En el ensayo de porosimetría los valores de microporosidad muestran que la dosificación **ML** obtiene el mejor resultado, siendo este de 10,27%, mientras que la dosificación **EL** obtiene un valor de 12,33%, constituyendo el dato más alto. Para la mezcla **SL** se obtiene una microporosidad de 11,48%.

Los mejores resultados en cuanto a microporosidad se obtienen para las dosificaciones que incorporan las fibras, ya sean sintéticas o metálicas,

aunque no existe mucha diferencia con la que no lleva fibras en su composición. En todo caso, son valores de porosidad capilar buenos, que corresponden a hormigones bien dosificados.

Los valores del coeficiente de absorción capilar y la porosidad efectiva del hormigón confirma el mejor resultado para el hormigón tipo **ML**, seguido del **SL**, siendo la dosificación **EL** la que muestra los resultados más desfavorables. Estos valores contribuyen a reafirmar los datos obtenidos en el apartado de porosimetría por intrusión de mercurio.

En cuanto al comportamiento del hormigón sometido a compresión y flexión, se constata que los buenos resultados no son atribuibles a la incorporación de las fibras sino más bien al árido siderúrgico utilizado en su amasado. Hay que tener en cuenta que la aportación de las fibras al hormigón se refleja a partir de la primera fisura, manifestándose como tenacidad hasta la rotura total. En este ensayo la tensión de rotura se mide hasta la fisuración de ahí el poco incremento en la tensión de las dos amasadas con fibras con respecto a la patrón **EL**

En el ensayo de tracción indirecta se puede afirmar que la incorporación de fibras tiene una influencia muy positiva en la resistencia a tracción indirecta frente a la del hormigón sin fibras **EL**, destacando la amasada **ML** con un incremento del 65% y del 29% la amasada **SL** sobre la amasada sin fibras.

En la determinación del módulo elástico, la amasada que mayor valor del módulo elástico ha obtenido ha sido la **ML**, seguida de la **EL** y por último la amasada **SL**.

En los ensayos diversos que se han utilizado para determinar la tenacidad de estos hormigones los resultados de la amasada **EL** no refleja ningún valor ya que la tenacidad o la ductilidad es una propiedad que proporcionan las fibras incorporadas al hormigón y que se manifiesta a partir de la primera fisura o postfisuración, sin embargo los valores de resistencia a primera fisura si están registrados, siempre por debajo de los valores de las amasadas con fibras, siendo superior de las dos la de fibras metálicas.

En cuanto a los valores de tenacidad en los cuatro ensayos, siempre es superior para las amasadas con fibras metálicas que las de fibras sintéticas por lo que podemos afirmar que las fibras metálicas aportan al HRF mejores propiedades de tenacidad que las sintéticas.

En el ensayo del límite de proporcionalidad (LOP) y resistencia residual, en el primero la diferencia entre las dos amasadas, no es muy amplia, teniendo mejores resultados la amasada **ML**, sin embargo en los valores resultantes de la resistencia residual existe mayor diferencia entre las dos amasadas, en la **SL** los valores se estabilizan alrededor de 1,20 MPa, mientras que en la **ML** estos valores oscilan entre 5,50 y 4,5 MPa mostrando bastante mejor comportamiento a la resistencia residual el hormigón con fibras metálicas.

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a impacto, vemos que la resistencia a impacto a primera fisura y a rotura mejora considerablemente con la incorporación de fibras en la matriz, siendo esta mejora aún más significativa para el caso de la dosificación **ML**. Estos resultados permiten apreciar una mejora controlada en el valor de golpes hasta primera fisura con la adición de fibras, mientras que el número de los golpes hasta rotura mejora en gran medida con respecto a la dosificación que no incorpora fibras en su matriz.

En lo que respecta a la resistencia a la abrasión los resultados muestran un comportamiento similar para las dosificaciones **EL** y **SL** frente al desgaste por abrasión, el hormigón tipo **ML** presenta unas dimensiones de huella algo inferiores al resto de dosificaciones, lo que podemos interpretar como una mejor resistencia al desgaste por abrasión del hormigón con fibras metálicas.

En conclusión a lo anteriormente expuesto podemos afirmar que los hormigones con escorias EAF y con fibras metálicas presentan una mejora de sus características mecánicas muy apreciables con respecto a los demás casos estudiados.

Desde el punto de vista del uso de estos hormigones como soleras y/o pavimentos debemos afirmar que el más adecuado es el denominado **ML** pues presenta amplias mejoras en sus características mecánicas con respecto al resto de soluciones (**EL** y **SL**), especialmente en las más trascendentes para este tipo de elemento constructivo.

Tan sólo cabe plantearse un problema que nos podemos encontrar a medio y largo plazo por el uso de fibras metálicas en los pavimentos, que tiene que ver con la puesta en obra de los mismos y que es la aparición de fibras metálicas en la superficie de estos hormigones. Dichas fibras se corroen con el paso del tiempo y hacen que la “estética” de la superficie del pavimento empeore y por otra parte puede ocurrir que la surgencia de estas fibras metálicas puedan provocar pinchazos en las ruedas de los vehículos

que circulen por estos pavimentos. Ambas situaciones hemos comprobado que desaparecen cuando se emplea un fratasado mecánico enérgico y aumentando los espesores de la capa final de “pulido” y acabado de estos pavimentos. Por ello los supuestos problemas desaparecerían quedando únicamente las ventajas de la solución adoptada.



**Durabilidad**

## **Capítulo VI**



## **6. DURABILIDAD**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

La durabilidad en el hormigón se puede definir como la capacidad de la mezcla ya endurecida de soportar, sin deteriorarse, las solicitaciones provocadas por agentes físicos y químicos que puedan agredir al hormigón, no solo en superficie, sino también en el interior de su masa, durante un periodo de tiempo específico o vida útil del hormigón. En definitiva, la condición a exigir a los materiales y componentes constructivos realizados con este hormigón pasa por cumplir el cometido para el cual son destinados durante un determinado periodo de tiempo.

La durabilidad del hormigón depende de la calidad del material, la calidad de la construcción, la calidad del diseño y las condiciones de exposición.

Los factores que más influyen en la durabilidad de un hormigón son la presencia de agua y el mecanismo de transporte de gases, agua y agentes disueltos a través de la red capilar, formada como consecuencia del fenómeno de exudación.

Para que en el hormigón se produzcan la mayoría de los procesos físicos y químicos, tanto los deseables como los perjudiciales, se necesita agua. El calor proporciona la energía que activa los procesos. Los efectos combinados del agua y del calor, junto con otros elementos ambientales, son importantes y deben ser considerados y estudiados adecuadamente.

Elegir los materiales apropiados, cuya composición sea adecuada y procesarlos correctamente de acuerdo con las condiciones ambientales existentes es fundamental para lograr un hormigón durable que sea resistente a los efectos perjudiciales del agua, los sulfatos presentes en el suelo, las soluciones y atmósferas agresivas y las temperaturas extremas.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos reforzados con fibras para utilizarlo en pavimentos y soleras expuestas a diferentes situaciones, agentes o atmósferas agresivas, se realizan varios ensayos relacionados con la durabilidad que se describen a continuación.

## **6.2. RESISTENCIA A CICLOS HIELO-DESHIELO**

Los posibles efectos que puede producir el hielo-deshielo en el hormigón son una de las principales causas de degradación que puede afectar con más intensidad a la durabilidad del hormigón en regiones frías como en la que nos encontramos en el norte de España y sobre todo en la meseta.

En la actualidad, es preciso que aquellas estructuras o materiales expuestos a la acción del hielo-deshielo resulten duraderas y dispongan de una adecuada resistencia frente a este fenómeno.

El hormigón objeto de esta Tesis Doctoral tiene como fin último su uso en soleras y pavimentación, hecho que hace que frecuentemente se encuentre expuesto a las inclemencias del medio ambiente y, consecuentemente, a los efectos del hielo-deshielo. Es por ello, que se considera conveniente la realización de dicho ensayo a fin de confirmar una buena durabilidad y resistencia.

Con el fin de conocer la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, se realiza el presente ensayo siguiendo lo prescrito en la norma UNE-CEN/TS 12390-9 EX "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial" (Aenor 2008).

Esta norma desarrolla diferentes métodos de ensayo, sin embargo, ninguno de ellos en particular es capaz de reproducir exactamente las condiciones reales. De entre todos ellos, se escoge el ensayo del cubo ya que en el laboratorio se disponen de todos los elementos necesarios para la realización del mismo.

El ensayo del cubo se basa en someter a la acción del hielo-deshielo a probetas cúbicas introducidas en disolución de cloruro sódico (NaCl) al 3% en agua desionizada. Una vez finalizados los 56 ciclos de hielo-deshielo que comprende el ensayo, se mide la pérdida de masa de las probetas y de esta manera se obtiene la resistencia al hielo-deshielo del hormigón ensayado.

Un día antes del comienzo del ensayo de hielo-deshielo, se calcula la cantidad de medio de congelación absorbido en 24 horas. Para ello se determinan las masas de las probetas, se introducen en los recipientes de ensayo junto con agua potable en disolución de cloruro sódico (NaCl) al 3% y una vez transcurridas 24 horas desde que se introdujeron se registran de nuevo las masas de las probetas. Las probetas utilizadas son cúbicas de 100 mm de lado y con una edad de 90 días.

La absorción de disolución (L) de cada probeta se calcula como un porcentaje en masa a partir de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$$

Donde:

$m_0$  es la masa inicial de cada probeta seca

$m_1$  es la masa de cada probeta trascurridas las 24 horas sumergidas en la disolución

En la Tabla 6.1 se recogen los resultados obtenidos de este procedimiento. Los datos muestran que la dosificación **EL** es la que más aumento de peso experimenta trascurridas las 24 horas y por tanto la que mayor disolución absorbe, seguida de la mezcla **SL** y, por último, de la **ML**. Los resultados mostrados se corresponden con el valor medio de la muestra total ensayada.

Absorción de disolución en 24 horas	Dosificación		
	EL	SL	ML
Absorción (%)	0,70	0,51	0,39

Tabla 6.1 Resultados de absorción del medio de congelación en 24 horas

Un ciclo de hielo-deshielo comprende 24 horas en total, 16 horas en el congelador y 8 horas de deshielo.

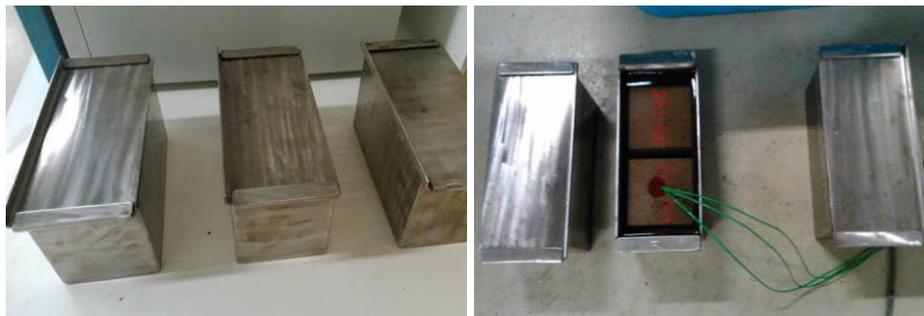


Imagen 6.1 Recipientes utilizados en el ensayo de hielo-deshielo y sonda para el control de la temperatura en el interior de las probetas.

Para la realización del ensayo de hielo-deshielo se introducen las probetas de dos en dos en un recipiente de acero inoxidable de 260 mm de largo x 120 mm de ancho y de 150 mm de altura con tapa de cierre deslizante con abertura para la sonda del control de temperatura en una de las probetas y se rellena con el medio de congelación. A continuación se

introducen en el congelador y se inicia el ciclo de hielo-deshielo. Una vez transcurridas las primeras 16 horas, se extraen las probetas y se colocan en un recipiente con circulación de agua a 20°C durante las siguientes 8 horas para su deshielo y así sucesivamente hasta completar los 56 ciclos de duración del ensayo.

En el centro de la superficie de una de las probetas sometidas al ensayo se coloca una sonda de temperatura que registra las variaciones de la temperatura en el centro de las probetas para ajustarlas a las temperaturas marcadas por la norma del ensayo (Imagen 6.1).



Imagen 6.2 Congelador y dispositivo de deshielo con circulación de agua

La Imagen 6.3 muestra el registro de temperaturas de esta sonda en función del tiempo. En total se representan 3 ciclos completos de hielo-deshielo de 24 horas cada uno.

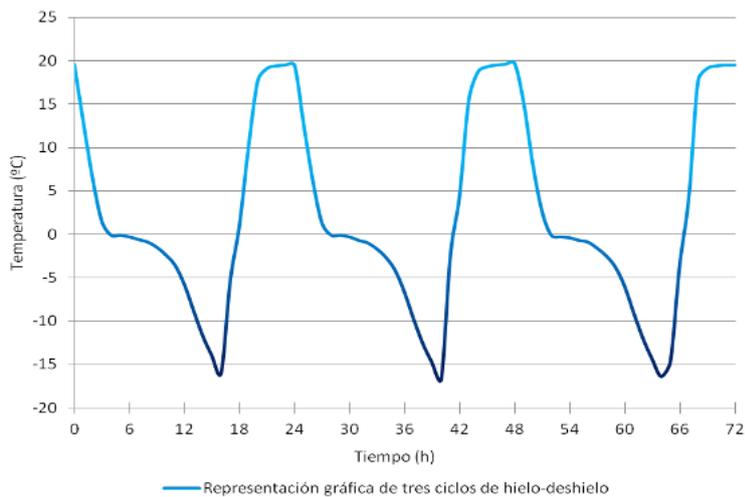


Imagen 6.3 Gráfica de las temperaturas registradas con la sonda de temperatura en el centro de la probeta en tres ciclos de hielo-deshielo

En la Imagen 6.4 siguiente, se representa únicamente un ciclo de hielo-deshielo junto con los límites de temperatura establecidos en la norma UNE CEN/TS 12390-9.

La temperatura en el interior de las probetas en el tiempo comprendido entre las 6-14 horas del ciclo no se ajusta exactamente a la temperatura delimitada debido a su complejidad, sin embargo, en el resto de horas del ciclo la temperatura si se ajusta correctamente.

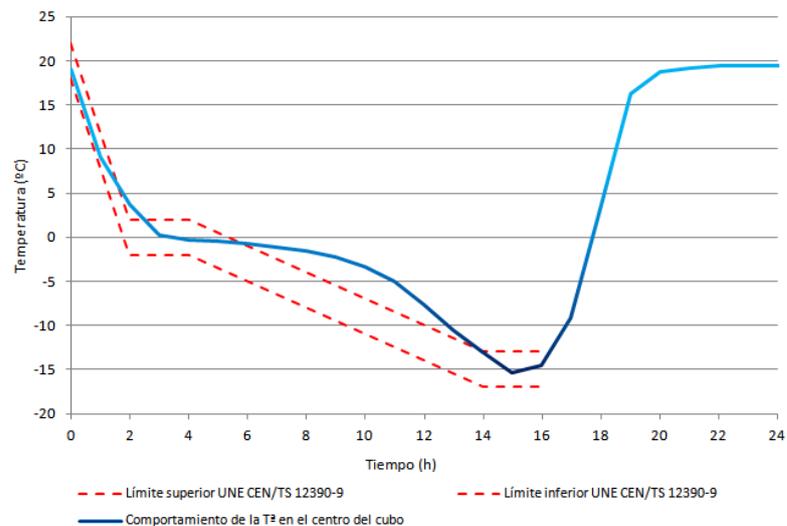


Imagen 6.4 Representación del registro de la temperatura en el centro de las probetas junto con los límites térmicos establecidos en la norma UNE CEN/TS12390-9

Paralelamente a este control de temperaturas en el centro de las probetas, se controla con otra sonda, que la temperatura del aire del congelador que no descienda de  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Después de 7, 14, 28 y 56 ciclos de hielo-deshielo se sigue el mismo procedimiento que consiste en realizar una inspección visual de los cubos registrando cualquier cambio sustancial (Tabla 6.2), se cepillan y se vuelven a colocar en el congelador. Las piezas desprendidas de cada probeta se secan y se determina su masa pudiendo determinar así la pérdida de masa porcentual de cada dosificación en cada ciclo de registro (Tabla 6.3).

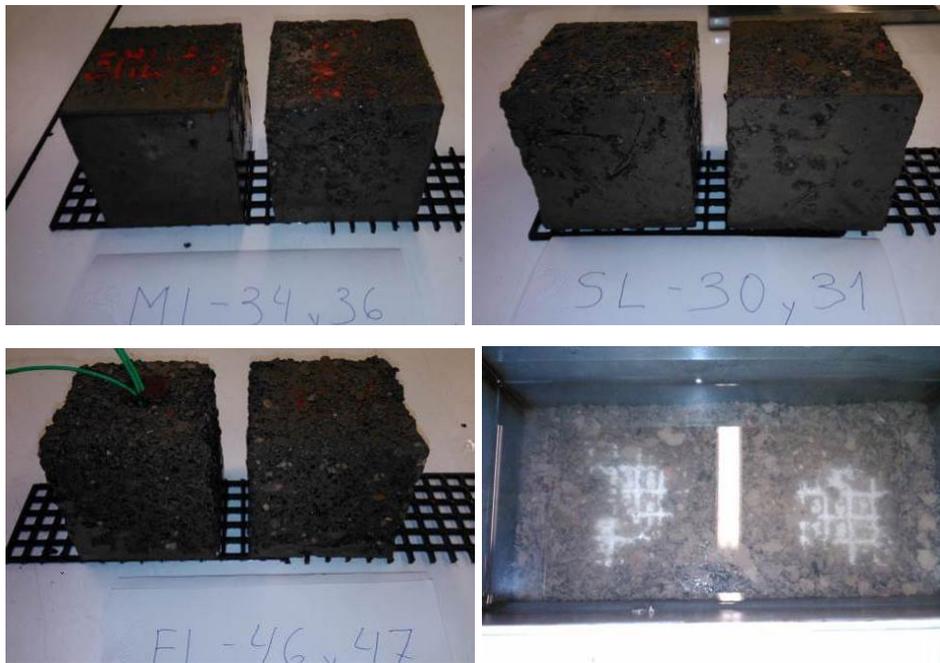


Imagen 6.5 Aspecto de las probetas después de 14 ciclos de hielo-deshielo y material desprendido en la dosificación EL



Imagen 6.6 Aspecto de las probetas después de 42 ciclos de hielo-deshielo



Imagen 6.7 Aspecto final de las probetas después de los 56 ciclos de hielo-deshielo

La Tabla 6.2 mostrada a continuación recoge las anotaciones realizadas sobre el estado de cada dosificación en los ciclos de registro (Imagen 6.5, Imagen 6.6 y Imagen 6.7). Se anotan los hechos más considerables como pérdidas de material, redondeo de aristas y desconchados, entre otros.

Inspección visual	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>7 ciclos</b>	Varios desconchados en superficies y bordes	Ligeros desconchados en superficies	Ligeros desconchados en superficies
<b>14 ciclos</b>	Pérdida de material en superficies y bordes	Desconchado cara superior, más densidad de defectos que ML	Desconchado abundante cara superior
<b>28 ciclos</b>	Pérdida de material y redondeo de aristas	Pérdida superficial de finos	Pérdida superficial de finos
<b>42 ciclos</b>	Pérdida de forma de cubo, aristas sin marcar	Pérdida de material superficial	Pérdida de material superficial
<b>56 ciclos</b>	Prácticamente desechas	Pequeña pérdida de material en aristas	Pequeña pérdida de material en aristas

Tabla 6.2 Estado de las probetas para cada inspección visual realizada tras los ciclos de hielo-deshielo de registro

El cálculo de pérdida de masa (P) experimentada por las probetas en cada registro se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{m_{sn}}{m_0} \cdot 100$$

Donde:

$m_0$  es la masa inicial del cubo seco,

$m_{sn}$  es la masa acumulada del material desprendido.

Los valores obtenidos de la realización del ensayo de ciclos de hielo-deshielo se muestran en la Tabla 6.3. La dosificación **EL** experimenta una pérdida de masa considerable, en concreto del 62,41%, lo que supone la pérdida de más de la mitad de su masa. Sin embargo, el resultado obtenido para la dosificación **SL** es bueno, siendo aún mejor para el hormigón tipo **ML** con una pérdida de masa de tan solo el 2,92%, manteniendo la forma de cubo con pequeños desprendimientos en caras y aristas, quedando algunas fibras metálicas al descubierto.

Resistencia a ciclos de hielo-deshielo	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>7 ciclos</b>	0,72	0,10	0,06
<b>14 ciclos</b>	5,31	0,72	0,30
<b>28 ciclos</b>	2,98	1,05	0,72
<b>42 ciclos</b>	32,18	1,36	0,77
<b>56 ciclos</b>	21,22	1,26	1,07
<b>Total tras 56 ciclos (%)</b>	<b>62,41</b>	<b>4,49</b>	<b>2,92</b>

Tabla 6.3 Pérdida de masa porcentual de las diferentes dosificaciones tras el ensayo de hielo-deshielo



Imagen 6.8 Cantidad de masa perdida por dosificaciones tras el ensayo de hielo-deshielo

Como medidas complementarias a la realización del ensayo de ciclos de hielo-deshielo, se decide realizar sobre dichas probetas el ensayo de ultrasonidos y el ensayo de compresión.

Con el ensayo de ultrasonidos se pretende comprobar el tiempo que tardan éstos en atravesar la probeta. Se realiza sobre los cubos antes de comenzar el ensayo de ciclos de hielo-deshielo y al finalizar el mismo. Para ello se sigue la norma que describe el preciso ensayo EN 12504-4 "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos" (Aenor 2004).

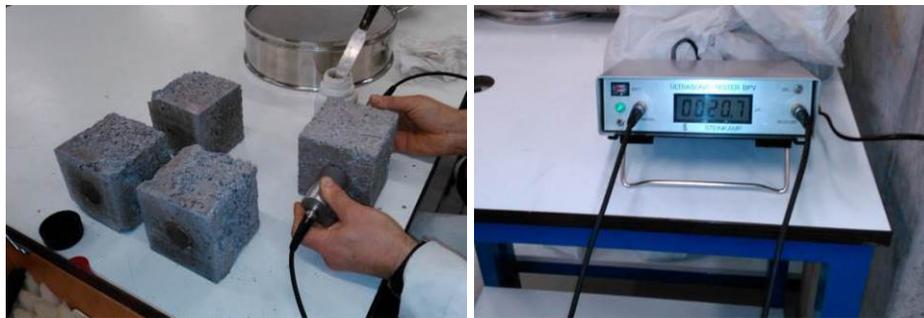


Imagen 6.9 Ensayo de ultrasonidos posterior a los ciclos de hielo-deshielo

En la Tabla 6.4 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonidos, midiendo el tiempo que tardan en pasar los ultrasonidos de una cara de la probeta a su opuesta y la velocidad de paso (Imagen 6.9).

Ultrasonidos sobre probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo		Dosificación		
		EL	SL	ML
Tiempo de paso ( $\mu\text{s}$ )	0 ciclos	21,70	21,40	20,90
	56 ciclos	–	22,30	21,50
Velocidad de paso (m/s)	0 ciclos	4,61	4,67	4,78
	56 ciclos	–	4,48	4,65

Tabla 6.4 Tiempo y velocidad de paso de ultrasonidos a través de probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo antes y después del ensayo

Como ya se ha visto anteriormente, la dosificación **EL** se desmorona durante la realización del ensayo de ciclos de hielo-deshielo lo que imposibilita la realización del ensayo de ultrasonidos cuando este finaliza.

En la Tabla 6.4 se observa cómo una vez finalizados los 56 ciclos, el tiempo de paso aumenta y la velocidad de paso disminuye, con respecto a los datos obtenidos para los 0 ciclos. Estos valores nos indican que en la matriz de hormigón se han producido una serie de cambios entre los 0 y 56

ciclos de hielo-deshielo que tienen como consecuencia la ralentización del paso de ultrasonidos a su través.

Los ciclos de hielo-deshielo provocan el desmoronamiento y ruptura del material y, como consecuencia última, un aumento del número de poros y cavidades en la matriz de hormigón. Estas discontinuidades están rellenas de aire o agua, sustancias por las que los ultrasonidos se distorsionan y ralentizan provocando que el tiempo de paso aumente y la velocidad de propagación disminuya proporcionalmente.

Con la realización del ensayo de compresión, se pretende conocer la forma en que el ensayo de ciclos de hielo-deshielo afecta sobre dicha propiedad mecánica del hormigón (Imagen 6.10).



Imagen 6.10 Probetas después de los ciclos de hielo-deshielo, antes del ensayo a compresión y después

La Tabla 6.5 muestra los resultados obtenidos en este ensayo realizado a 0 y 56 ciclos.

Resistencia a compresión sobre probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo (MPa)	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>0 ciclos (90 Días)</b>	72,11	62,52	80,55
<b>56 ciclos</b>	–	63,10	77,77
<b>Variación de la resistencia (%)</b>	–	0,93	-3,45

Tabla 6.5 Comparación de la resistencia a compresión entre las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo y las probetas de referencia

La dosificación **ML** experimenta una pérdida en su resistencia a compresión del 3,45%, como consecuencia de ser sometidas las probetas a 56 ciclos de hielo-deshielo. El hormigón tipo **SL** aumenta su resistencia a compresión en un 0,93%. Para la dosificación **EL** no es posible conocer su resistencia a compresión tras los 56 ciclos debido a su estado de desmoronamiento y falta de cohesión al finalizar los ciclos de hielo-

deshielo. El aumento en la resistencia de la amasada **SL** nos hace sospechar que no sea realizado por completo la hidratación de los componentes en el fraguado del hormigón y al estar en contacto con agua en el ensayo ha completado su fraguado ganando resistencia.

### **6.3. RESISTENCIA A LOS CICLOS ALTERNANTES DE HUMEDAD-SEQUEDAD**

El objetivo de este ensayo es conocer el efecto de los procesos relacionados con la saturación de agua y el secado de los materiales integrantes del hormigón procurando simular la alternancia de los días secos y lluviosos.

Los ensayos sobre hormigón endurecido basados en sucesivos ciclos alternantes de absorción de agua (humedad) y evaporación forzada de agua (sequedad) en estufa, proporcionan información sobre los efectos nocivos que las fluctuaciones del contenido de agua de un material tienen sobre su integridad y demás propiedades. En particular, en el caso del hormigón endurecido entran en juego dos problemas, cada uno de los cuales producen o pueden producir un cierto deterioro de propiedades.

- Contracciones y dilataciones lineales debidas a las variaciones térmicas y, fundamentalmente, a las variaciones de humedad, que como sabemos influyen directamente en la retracción del hormigón y que al añadirle un componente nuevo como son las fibras de refuerzo, puede ser interesante observar su comportamiento.
- Reacciones químicas fundamentalmente de carbonatación de la portlandita y otros de álcalis sódicos o potásicos, que se produce a velocidad muy superior a la espontánea y, cuya expansividad e inhibición de reacciones de hidratación, produce un deterioro en la resistencia del material.

La metodología de este ensayo consiste básicamente en alternar ciclos de inmersión en agua y secado a temperatura controlada. Cada ciclo de 24 horas consta de una fase en la que las probetas se sumergen totalmente en agua y otra fase posterior en la que se introducen en una estufa para su secado a 60°C. A continuación se dejan enfriar antes de la nueva inmersión en agua para completar el ciclo y evitar choques térmicos. ASTM D 559 "Standard Test Method for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures." (ASTM 2003).

El número de ciclos a realizar suele oscilar entre 20 y 30 ciclos y dado que se trata de un hormigón con escorias reforzado con fibras para su utilización en pavimentos en este caso interesa no incluir la etapa de enfriamiento, ya que de este modo se reproducen mejor las condiciones de lluvia (saturación de agua del material), secado (evaporación de esa agua) y calentamiento de la superficie del material cuando la temperatura exterior es elevada.

Considerando que la temperatura ambiente pueda ser de 30°C, en la superficie de un material oscuro como el hormigón se puede llegar a alcanzar una temperatura alrededor de 50°C, eliminando la fase de enfriamiento se consigue reproducir mejor las condiciones de lluvia, secado y calentamiento comentado en el párrafo anterior.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente en cuanto a dichas condiciones climáticas se puede diseñar un ensayo de envejecimiento consistente en fases de saturación en agua y fases de secado.

El ensayo realizado consta de las siguientes fases:

- Inmersión de las probetas en agua (15 – 20°C) durante 16 horas
- Secado en estufa (60°C) durante 8 horas
- Repetición durante 30 días (30 ciclos del ensayo)

El ensayo se ha realizado sobre dos probetas cúbicas de 150 mm de lado de cada una de las amasadas **EL**, **SL** y **ML**, las cuales antes del ensayo poseían un envejecimiento de 90 días y cuya resistencia fue evaluada antes del ensayo.

Tras el ensayo, se llevó a cabo una inspección visual del estado superficial de las probetas (Imagen 6.11 e Imagen 6.12 ), se evaluó la pérdida o ganancia de peso de las muestras y se realiza también en un ensayo de resistencia a compresión que evalúa el grado de deterioro no visible de la estructura interna del hormigón endurecido, en relación con la resistencia a compresión del mismo mostrada antes del ensayo.



Imagen 6.11 Probetas antes del ensayo de humedad-sequedad



Imagen 6.12 Probetas después de los ciclos de humedad-sequedad

El aspecto superficial que presentan las probetas al finalizar el ensayo no denota ninguna variación a simple vista, salvo alguna esquina de las

probetas, que como consecuencia de la manipulación al introducir las en la cámara de secado o al introducir las en la cuba de inmersión en agua han podido ser golpeadas ligeramente. En las probetas **ML**, que llevan fibras de refuerzo metálicas, es visible la oxidación de las fibras que han quedado en contacto con el exterior.

En la Tabla 6.6 se observa que el incremento de peso experimentado por las probetas no es muy significativo, teniendo en cuenta que han estado más tiempo en agua que secando. Los valores oscilan entre el 0,14% de la dosificación **ML** y el 0,34% de la mezcla **SL**.

Ensayo de humedad-sequedad	Dosificación		
	EL	SL	ML
Peso inicial (g)	9467,50	9514,50	9685,50
Peso final (g)	9489,00	9546,50	9699,50
Variación de peso (%)	<b>+0,23</b>	<b>+0,34</b>	<b>+0,14</b>

Tabla 6.6 Variación de peso en las probetas antes y después del ensayo de humedad-sequedad

Sin embargo, la resistencia a compresión muestra unos resultados muy dispares (Tabla 6.7 y Gráfico 6.1). La dosificación **EL** experimenta una caída del 15,20% de su capacidad resistente, mientras que la mezcla **ML** apenas se ve influenciada cayendo su resistencia en un 1,12%. Cabe una mención especial a la dosificación **SL** ya que experimenta una mejora de dicha propiedad cuantificada en un 12,16%. Esta mejora en la resistencia de la amasada **SL** se está repitiendo en todos los ensayos en los que tiene contacto el hormigón con abundante humedad, lo que nos indica una incipiente hidratación de los componentes de dicho hormigón, que tiene como consecuencia que cada vez que estas probetas se sometan a ensayos en presencia de agua o humedad, se completa la hidratación de sus componentes mejorando sus propiedades mecánicas.

Resistencia a compresión (MPa)	Dosificación		
	EL	SL	ML
0 ciclos (90 días)	72,11	62,52	80,55
30 ciclos	61,15	70,12	79,65
Variación (%)	<b>-15,20</b>	<b>+12,16</b>	<b>-1,12</b>

Tabla 6.7 Comparación de la resistencia a compresión entre las probetas sometidas a humedad-sequedad y las probetas de referencia

En este ensayo, a tenor de los resultados, sí que podemos decir que la influencia de las fibras es positiva, dado la caída de resistencia de la amasada **EL** que no tiene fibras de refuerzo.

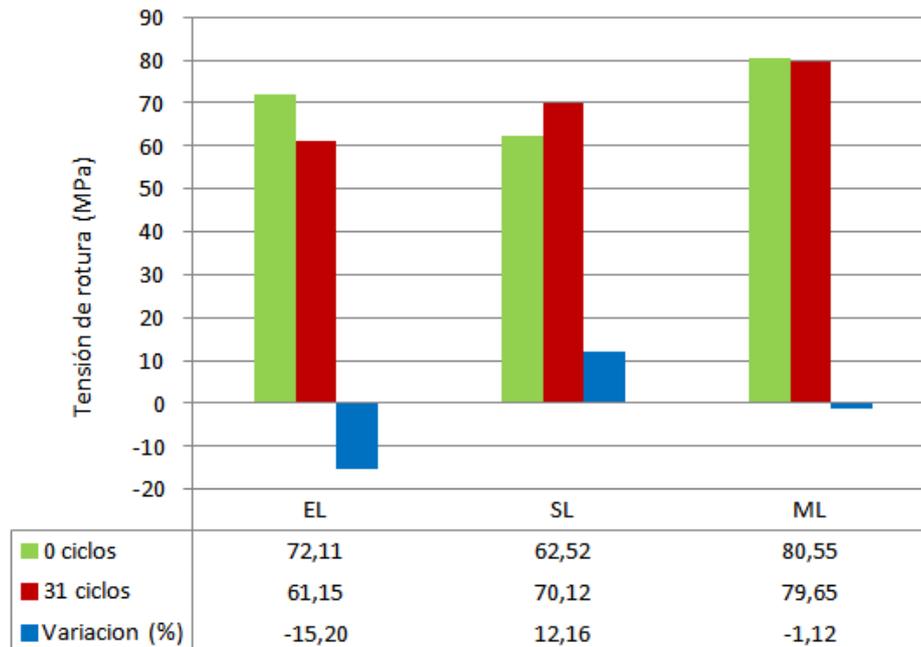


Gráfico 6.1 Comparación de la resistencia a compresión entre las probetas sometidas a humedad-sequedad y las probetas de referencia y la variación de las mismas.

## 6.4. ESTABILIDAD FRENTE A LOS SULFATOS

El ataque de los sulfatos constituye una de las formas más difundidas en el mundo de la agresión química al hormigón. Si tenemos en cuenta que el hormigón que estamos ensayando su utilización va destinada a pavimentos y soleras, constituye este ensayo uno de los más considerados dentro de los destinados al estudio de la durabilidad.

Los ámbitos más propicios donde nos encontramos estos sulfatos son:

- En los suelos, particularmente en los arcillosos
- Disueltos en el agua de las capas freáticas
- En el agua de mar
- En zonas de ambientes de descomposición orgánica, en procesos anaeróbicos donde se forma  $H_2S$  compuesto que

puede transformarse en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) por acción bacteriológica

- Ambientes urbanos o industrializados, con altos grados de contaminación ambiental (lluvia ácida)
- A partir de ciertos procesos biológicos que degradan lentamente el hormigón, incluso e aquellas estructuras que no se hallan en contacto con el suelo

Se pretende con este ensayo comprobar el comportamiento de estos hormigones ante ambientes acuosos agresivos por sulfatos habitualmente encontrados en las aguas de escorrentía natural o de nivel freático, conocidas como aguas yesíferas o selenitosas que poseen en solución sulfatos que producen un deterioro muy importante cuando este no está preparado para ello, es decir, cuando el cemento utilizado no es resistente a los sulfatos (de categoría SR).

Es sabido que la reacción del ión sulfato con el aluminato tricálcico y con la portlandita produce sal de Candlot o etringita, trisulfoaluminato cálcico hidratado, es esta reacción química cuando se produce sobre el hormigón endurecido es fuertemente deteriorante. También es sabido que esta sal se produce con el regulador de fraguado cuando el hormigón está en estado fresco (etringita primaria), lo cual no da lugar a ningún problema serio. Pero la aparición de etringita secundaria en el hormigón ya endurecido, en caso de que su proporción sea baja, produce una pérdida de resistencia a compresión o deterioro de características mecánicas que se aprecian con toda nitidez en los ensayos correspondientes.

A todo esto debemos añadir el peligro de oxidación en los hormigones con fibras metálicas que estas pueden sufrir.

Este ensayo se ha realizado según lo prescrito por la ASTM C 1012 (ASTM 1992) sometiendo a 2 probetas cúbicas de 150 mm. de arista, de cada una de las amasadas, **EL**, **SL** y **ML** a 10 ciclos de inmersión en una disolución de  $SO_4 Na_2$  -10  $H_2O$  al 14%. La edad de las probetas ensayadas es de 90 días.

El efecto destructivo del  $SO_4Na_2$  es debido a un incremento de volumen de un 400% durante su cristalización a una temperatura inferior a 32,4 °C con 10 moléculas de agua.

Los ciclos se realizan según las fases siguientes:

- Desecado hasta peso constante

- Inmersión en la solución durante 5 horas
- Desecado en estufa durante 17 horas
- Dejar enfriar en desecador durante 2 horas
- Se repite el proceso durante 10 ciclos

Finalizados los 10 ciclos, se comprueba el estado visual de las probetas, la variación de peso y se ensayan a compresión las probetas.

Según la norma ASTM C 1012, las probetas sumergidas en solución de sulfatos deben mostrar una expansión longitudinal inferior al 0,1% y no mostrar deterioro aparente.

Antes de iniciar el ensayo se pesan las probetas a peso constante y se mide una de las aristas de cada probeta para controlar su expansión longitudinal durante el ensayo y al finalizar el mismo.



Imagen 6.13 Probetas de las amasadas SL y ML antes de ser sumergidas



Imagen 6.14 Aspecto superficial de las probetas después de los 15 ciclos del ensayo

El aspecto superficial de las probetas una vez finaliza el ensayo es bueno, siendo este muy similar al que tenían antes de realizar el ensayo. Si bien merece hacer referencia a la menor presencia de huecos superficiales en las probetas una vez finalizados los 15 ciclos de duración, este hecho se

puede apreciar en las imágenes (Imagen 6.13 e Imagen 6.14). En las probetas de la amasada **ML** se aprecia la oxidación de las fibras metálicas superficiales en la cara superior de la probeta y algún punto aislado que denotan la proximidad de fibras metálicas en ese lugar.

La variación de peso y la expansión longitudinal son otros dos aspectos importantes a tener en consideración en la realización del presente ensayo. Los resultados se muestran en la Tabla 6.8 de forma porcentual y se realiza el promedio de todos los resultados obtenidos. Los parámetros se expresan respecto del peso y de la longitud de cada probeta, respectivamente.

Estabilidad frente a los sulfatos (15 ciclos)	Dosificación		
	EL	SL	ML
Variación de peso (%)	1,68	0,75	0,65
Expansión longitudinal (%)	0,09	0,11	0,09
Aspecto superficial	BUENO	BUENO	MANCHAS, OXIDO

Tabla 6.8 Variación de peso, expansión, longitudinal y aspecto superficial de las diferentes amasadas después del ensayo de estabilidad frente a los sulfatos

La dosificación **EL** es la que mayor variación de peso experimenta, seguida de la **SL** y, por último, la mezcla **ML**. Sin embargo, en la expansión longitudinal no se mantiene este comportamiento siendo la dosificación **SL** la que mayor valor registra de 0,11 %, superando el límite de 0,10 % que se establece en la norma ASTM C 1012 (ASTM 1992). Las mezclas **EL** y **ML** si se mantienen por debajo de este límite, considerándolos en consecuencia como buenos resultados.

En la Tabla 6.9 que se presenta a continuación, se comparan los resultados de resistencia a compresión de probetas que no han sido sometidas al ensayo de estabilidad a los sulfatos, frente a probetas que han sido sometidas a 15 ciclos de este ensayo.

Resistencia a compresión (MPa)	Dosificación		
	EL	SL	ML
0 ciclos (90 días)	72,11	62,52	80,55
15 ciclos	60,54	68,51	73,47
Variación (%)	<b>-16,04</b>	<b>+9,59</b>	<b>-8,80</b>

Tabla 6.9 Resultados a compresión de las probetas antes y después del ensayo de estabilidad frente a los sulfatos

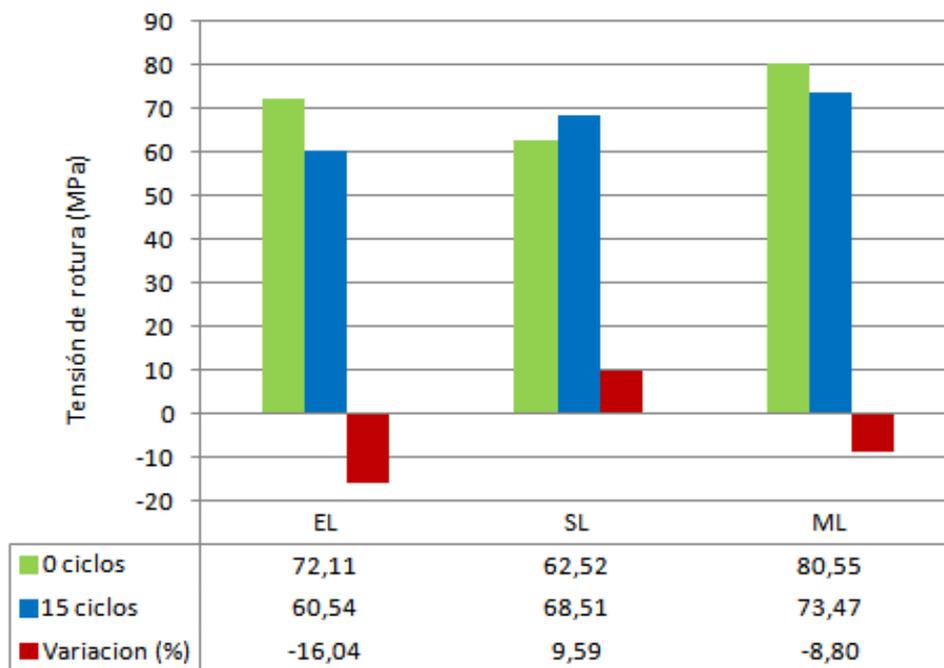


Gráfico 6.2 Variación en la resistencia a compresión de las probetas sin ensayo y después del ensayo

En los resultados mostrados en la Tabla 6.9 y a su vez representados en el Gráfico 6.2, vemos que las dosificaciones **EL** y **ML** experimentan una pérdida de propiedades mecánicas como consecuencia de su inmersión en una solución de sulfatos. Analizando estos dos resultados vemos que la mezcla **EL** se ve influenciada en mayor medida por el ensayo, sus propiedades disminuyen en un 16 % aproximadamente, mientras que las de la dosificación **ML** únicamente en un 8,80 %.

Conviene citar el comportamiento experimentado por la dosificación **SL** una vez transcurridos los 15 ciclos de inmersión en la solución de sulfatos. Su resistencia a compresión se ve significativamente favorecida, aumentando en un 9,59 % los resultados obtenidos para probetas no sometidas a este ensayo.

## 6.5. RESISTENCIA AL CO<sub>2</sub> EN CÁMARA ESTANCA

Para que se lleve a cabo una efectiva incorporación al mercado de estos nuevos materiales es preciso conocer su comportamiento a largo plazo, es decir, su durabilidad en el tiempo. Es por ello, que se desarrollan, cada vez con más frecuencia, códigos y normas que nos permitan conocer sus propiedades frente a la durabilidad.

El elevado grado de alcalinidad que generalmente posee el hormigón, favorece la creación de una capa pasiva en el acero lo cual se debe fundamentalmente a la formación de portlandita durante la fase de hidratación de los diferentes compuestos del cemento. El  $\text{CO}_2$ , componente ácido de la atmósfera y presente en el ambiente, se combina fácilmente con estas fases básicas hidratadas del hormigón, dando lugar al fenómeno que se conoce como carbonatación del hormigón. Esta reacción produce un descenso del pH del hormigón, que en caso de llegar hasta la profundidad a la que se encuentran las armaduras, podría dar lugar a la destrucción de la capa pasiva que estas poseen y la consecuente corrosión de las mismas.

La porosidad del hormigón influye considerablemente en el grado de carbonatación de hormigón ya que las moléculas de  $\text{CO}_2$  se introducen en el hormigón a través de las redes de poros no saturados de agua existentes en el mismo para después combinarse con las fases hidratadas.

Con el fin de conocer la resistencia a la penetración de dióxido de carbono del hormigón objeto de este estudio, se realiza un ensayo acelerado de carbonatación que simula las condiciones atmosféricas reales. Para ello se siguen los pasos establecidos en la norma UNE-EN 13295 "Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Determinación de la resistencia a la carbonatación" (Aenor 2005).

El ensayo radica fundamentalmente en la medición de la profundidad de carbonatación de una probeta situada en una atmósfera de dióxido de carbono durante un intervalo de tiempo determinado. Se entiende como profundidad de carbonatación ( $d_k$ ) a la distancia media, medida en mm, a partir de la superficie del hormigón, en la que el dióxido de carbono ha reducido la alcalinidad del cemento hidratado, hasta tal punto que una disolución indicadora de fenoftaleína permanece incolora.

Este ensayo se complementa con el descrito en la norma UNE 112011 "Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio" (Aenor 2011). En esta norma se recoge el método para revelar la superficie no carbonatada del hormigón.

Aunque la norma UNE-EN 13295 contempla un contenido del 1% de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de exposición, en esta prueba se pretende realizar un ensayo acelerado por lo que se elevará el contenido de  $\text{CO}_2$  a un máximo de 20% y un mínimo de 5%, para someter a las probetas a una atmósfera

más agresiva, manteniendo una humedad constante de 50–60% y a una temperatura de  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

El ensayo se realiza sobre probetas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 200 mm, con una edad de 90 días, introducidas en una cámara específica para la realización de este ensayo (Imagen 6.15). Con posterioridad se procede a la incorporación de  $\text{CO}_2$  en la cámara controlando el caudal y volumen del mismo mediante un sistema reloj en la salida de la bombona. El caudal incorporado es de 30 L en dos minutos, lo que supone un 20% del volumen de la cámara. La concentración de  $\text{CO}_2$  se controla mediante una sonda con el fin de que esta no decaiga por debajo del 5%.

El proceso se repite semanalmente, habiendo abierto la cámara y saneado el aire previamente.



Imagen 6.15 Cámara estanca y botella de  $\text{CO}_2$  con el instrumental de llenado

Una vez transcurridos los 56 días de duración del ensayo, se parten las probetas por la mitad (Imagen 6.16) y se aplica sobre las secciones que quedan descubiertas, una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%.

La fenolftaleína toma color rojo-púrpura para valores de pH superiores a 9,5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora para valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9,5 toma tonos entre rosa y rojo-púrpura.



Imagen 6.16 Aspecto de las probetas partidas antes de aplicarlas la disolución de fenolftaleína

Previo a la realización del ensayo de carbonatación se pesan las probetas en seco, procediendo de la misma manera una vez transcurridos los 56 días de ensayo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.10.

Ensayo de carbonatación	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>Peso inicial (g)</b>	5405,00	5370,00	5370,00
<b>Peso final (g)</b>	5263,50	5235,50	5220,50
<b>Variación de peso (%)</b>	<b>-2,62</b>	<b>-2,50</b>	<b>-2,78</b>

Tabla 6.10 Peso de las probetas antes y después del ensayo de carbonatación

En la Tabla 6.10 se observa como las tres dosificaciones experimentan una pérdida de peso similar como consecuencia de un proceso de carbonatación.

Esta pérdida de peso se debe fundamentalmente a que durante el proceso de carbonatación se produce la combinación de CO<sub>2</sub> y se pierde agua. Cuanto mayor es la relación a/c del hormigón mayor es la pérdida de agua experimentada. A este fenómeno también le afecta la humedad relativa del medio, que cuanto mayor sea ésta menor es la pérdida de agua experimentada por el hormigón (Galán García 2012).

En nuestro caso, las tres dosificaciones presentan la misma relación A/C=0,55 y se encuentran sometidas a la misma humedad relativa al ensayarse a la vez, lo que justifica un porcentaje de variación de peso similar entre ellas.

Los resultados, producto del ensayo descrito en la norma UNE13295 (Aenor 2005), se muestran a continuación en la Tabla 6.11. El frente de carbonatación en las probetas presenta una forma ondulada, por esta razón

se toman medidas de la máxima, media y mínima penetración de la carbonatación.

Penetración de la carbonatación	Dosificación		
	EL	SL	ML
Máxima (mm)	9,00	13,10	7,40
Media (mm)	6,20	5,10	4,40
Mínima (mm)	5,30	2,90	1,10

Tabla 6.11 Medidas relativas a la penetración de la carbonatación

Los resultados muestran un mejor comportamiento del hormigón que incorpora fibras, ya sean sintéticas o metálicas, respecto del hormigón sin fibras. Finalmente, la incorporación de fibras tiene como consecuencia una disminución en la profundidad del frente de carbonatación.

En el Gráfico 6.3 se representan los valores obtenidos al finalizar los 56 días que dura el ensayo. Observando los datos vemos que los mejores resultados de penetración media se dan para la dosificación **ML**, correspondiente al hormigón que incorpora fibras metálicas en su composición.

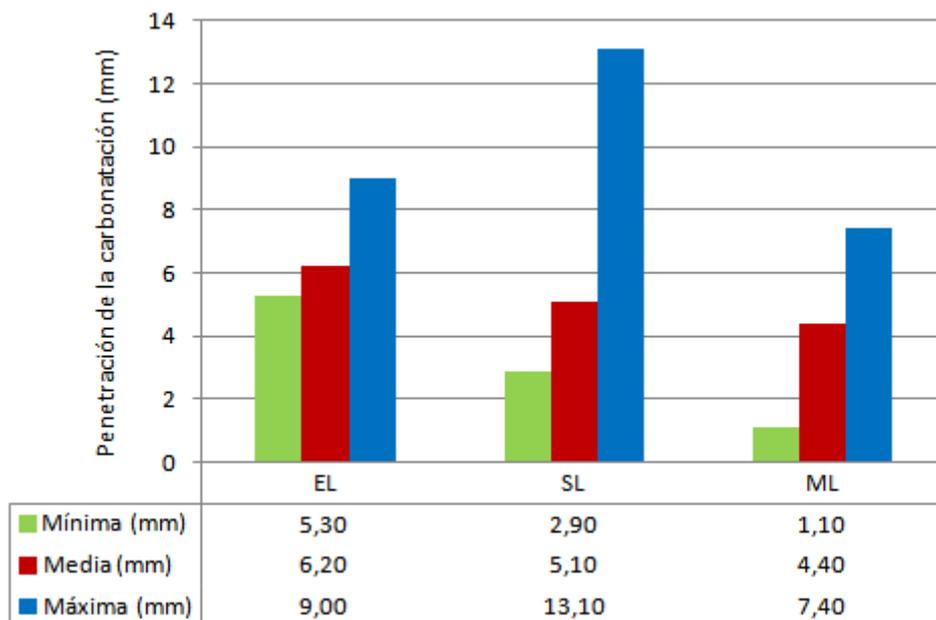


Gráfico 6.3 Representación de los valores de penetración del frente de carbonatación

De forma complementaria, se realiza un estudio completo de la superficie carbonatada y sin carbonatar, es decir, se miden ambas

superficies de forma que nos permita calcular el porcentaje de carbonatación total de dicha sección (Imagen 6.17).

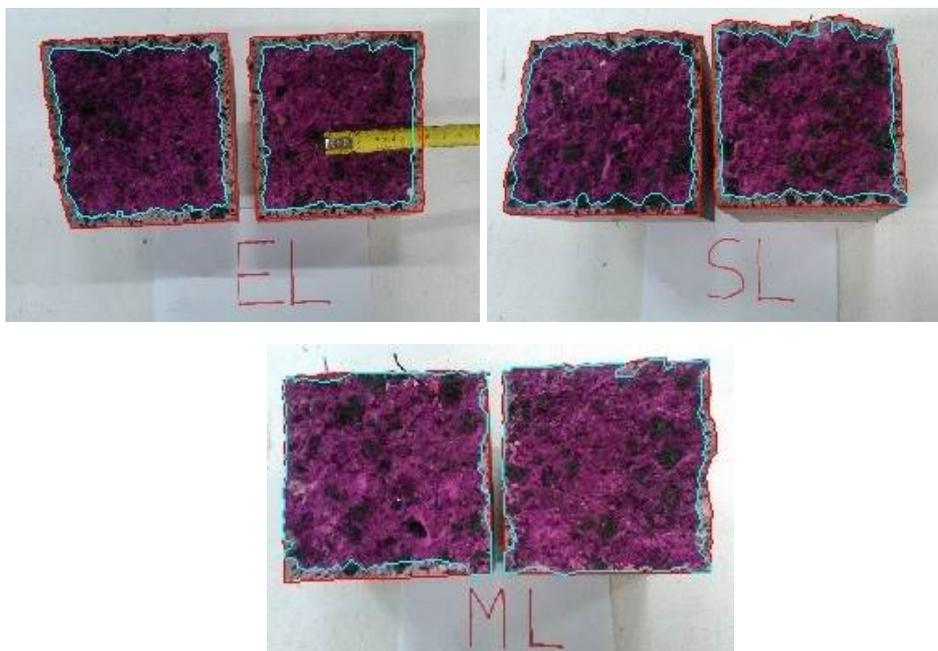


Imagen 6.17 Delimitación de la superficie carbonatada y sin carbonatar

En la Tabla 6.12 que figura a continuación, se muestran los resultados obtenidos de este estudio.

Superficie	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>Total (cm<sup>2</sup>)</b>	94,11	102,94	98,20
<b>Sin carbonatar (cm<sup>2</sup>)</b>	72,62	82,20	90,11
<b>Carbonatada (cm<sup>2</sup>)</b>	21,49	20,74	8,09
<b>% Carbonatación</b>	<b>22,84</b>	<b>20,17</b>	<b>8,25</b>

Tabla 6.12 Cálculo del porcentaje de superficie carbonatada para cada amasada.

Los datos obtenidos muestran claramente una mejora de las prestaciones de durabilidad frente a la carbonatación para el caso de la dosificación de hormigón que incorpora fibras metálicas (**ML**).

Anteriormente se ha comentado que la carbonatación está directamente relacionada con la porosidad del material, esto se debe a que a medida que esta es mayor, también aumenta la penetración de CO<sub>2</sub> en el hormigón ya que ese es el medio por el que se introduce.

Si observamos en el capítulo 5 apartado 4.2 los resultados obtenidos relativos a la porosidad del hormigón objeto de este estudio, vemos que la dosificación **ML** presenta el valor más bajo en cuanto a microporosidad, lo cual lleva aparejado consigo el porcentaje de carbonatación más bajo respecto del resto de dosificaciones y, por tanto, una menor susceptibilidad frente a este fenómeno.

## **6.6. RESISTENCIA A ATMÓSFERAS INDUSTRIALES (KESTERNICH)**

El hormigón en la construcción y más especialmente en los utilizados como pavimentos, están muy expuestos a los agentes agresivos latentes en la atmósfera producidos por los combustibles fósiles como el petróleo o el carbón en la utilización en calefacciones, industrias, vehículos a motor, etc., por lo que debemos considerar la durabilidad de estos hormigones cuando se utilizan habitualmente en ambientes industriales o en núcleos urbanos donde se encuentran afectados por la contaminación atmosférica.

Para comprobar su comportamiento se ha utilizado el método de ensayo de la Norma UNE-EN ISO 6988 “Ensayo de dióxido de azufre con condensación general de la humedad” (Aenor 1996). También la Norma Alemana DIN 50.018 “Ensayos de corrosión en atmósferas húmedas saturadas con adición de dióxido de azufre” (DIN 1997), que es equivalente a esta norma UNE y simula un clima de aire húmedo con dióxido de azufre capaz de producir rápidamente una corrosión.

Aunque estas normas especifican un método de estimación de la resistencia de los recubrimientos de los materiales metálicos, en nuestro ensayo contemplaremos las siguientes observaciones:

- Constatar que las pequeñas partículas de acero contenidas en los áridos siderúrgicos empleados en la elaboración de los hormigones ensayados no se vean afectadas por la oxidación de las mismas.
- El comportamiento de la matriz cementicia frente a la acción del  $\text{SO}_2$ , comprobando la posible reacción con la cal libre  $(\text{CaO})_{\text{libre}}$  y sus posibles consecuencias.
- Comprobar si las fibras metálicas de las probetas con esta adición, son afectadas y de qué manera.

Para la realización del ensayo se han utilizado probetas cúbicas normalizadas de dimensiones 100x100x100 mm con una edad de curado de 90 días.

Las probetas se exponen en el interior de la cámara (Imagen 6.18) durante 8 h y a una temperatura de  $40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , donde se ha introducido previamente 0,2 dm<sup>3</sup> de dióxido de azufre. Posteriormente, la puerta de la cámara se abre automáticamente y se dejan las probetas a temperatura y atmósfera ambiente durante 16 h. El ciclo completo dura 24 h.



Imagen 6.18 Cámara para el ensayo de atmosferas industriales (Kesternich)

El ensayo concluye cuando se observa un deterioro evidente de las piezas o bien se alcanzan los ciclos estimados para el mismo, en este caso 15 ciclos.

Las probetas permanecieron en cámara húmeda antes de iniciar el ensayo pesándolas al sacarlas de la misma para posteriormente introducir las en estufa para su secado y pesado (Imagen 6.19).



Imagen 6.19 Probetas en el ensayo de atmosferas industriales (Kesternich)

La resistencia al dióxido de azufre con humedad condensada se evalúa mediante tres procedimientos:

- Inspección visual de las probetas, anotando la existencia de signos de degradación.
- La pérdida o incremento de masa de las probetas, después de realizar los 15 ciclos del ensayo.
- La pérdida de resistencia mecánica a compresión respecto a las probetas testigos.



Imagen 6.20 Probetas de la dosificación ML después de los 15 ciclos de atmosfera industrial



Imagen 6.21 Probetas de la dosificación SL después de los 15 ciclos de atmosfera industrial



Imagen 6.22 Probetas de la dosificación EL después de los 15 ciclos de atmosfera industrial

Con una simple inspección visual no se ha podido apreciar ningún signo relevante de degradación después del ensayo salvo unas suaves manchas en la cara horizontal superior provocadas por una ligera deposición de

sales motivadas por la condensación de la atmosfera húmeda saturada. También se aprecian algunos puntos de óxido de las partículas de acero que se han quedado al descubierto en los laterales así como las fibras metálicas sin recubrir en las probetas con este tipo de fibras **ML** (Imagen 6.20, Imagen 6.21 e Imagen 6.22).

Ensayo Kesternich	Dosificación		
	EL	SL	ML
<b>Peso inicial (g)</b>	2686,65	2675,75	2757,10
<b>Peso final (g)</b>	2723,10	2712,80	2797,10
<b>Variación de peso (%)</b>	<b>+1,36</b>	<b>+1,38</b>	<b>+1,45</b>

Tabla 6.13 Variación de peso experimentada por las probetas sometidas a una atmosfera industrial

En cuanto a la variación de masa se aprecia un incremento en todas las probetas producida ligeramente por esa deposición de sales en sus caras, si bien este aumento no es significativo en ningún caso y puede justificarse por las condiciones ambientales en las que se produce el ensayo.

La Tabla 6.13 muestra la variación de peso que experimentan las probetas al ser sometidas a la atmosfera industrial citada. La dosificaciones **ML** es la que mayor variación experimenta, seguida de la **SL** y de la **EL**, como ya se ha comentado con anterioridad, este aumento de peso es bajo, en torno al 1,45 %, y la diferencia entre las dosificaciones igualmente es mínima

Como se viene haciendo en todos los ensayos de durabilidad, una vez finalizado estos, se someten las probetas a un ensayo de compresión con el fin de conocer la variación de sus propiedades mecánicas. La Tabla 6.14 muestra los resultados obtenidos para este ensayo en concreto.

Resistencia a compresión (MPa)	Dosificación		
	2EL	2SL	3ML
<b>0 ciclos (90 días)</b>	72,11	62,52	80,55
<b>15 ciclos</b>	66,53	66,54	73,73
<b>Variación (%)</b>	<b>-7,73</b>	<b>+6,43</b>	<b>-8,47</b>

Tabla 6.14 Resistencia a compresión de las probetas antes y después de los 15 ciclos de atmosfera industrial

Las dosificaciones **EL** y **ML** experimentan una perdida similar de propiedades mecánicas, siendo algo más acusada para la **ML**.

Como se viene observando a lo largo de todo el “Capítulo VI. Durabilidad de los hormigones con escorias y fibras”, la dosificación **SL** experimenta un comportamiento particular, en lo referente a las propiedades mecánicas, que difiere considerablemente del de las otras dosificaciones.

Finalmente y como ya se ha comentado con anterioridad a lo largo de este capítulo, parece que la dosificación **SL** no ha experimentado un completo proceso de hidratación de sus componentes en el momento de ser ensayada a 0 ciclos. Los resultados mostrados para 15 ciclos, corresponden a probetas cuya edad de curado ha sido superior e incluso estas han podido ser sometidas a procesos durante los ensayos que hayan contribuido a la hidratación y curado de las mismas.

El Gráfico 6.4 muestra los resultados de resistencia a compresión relativos al ensayo de resistencia a atmosferas industriales.

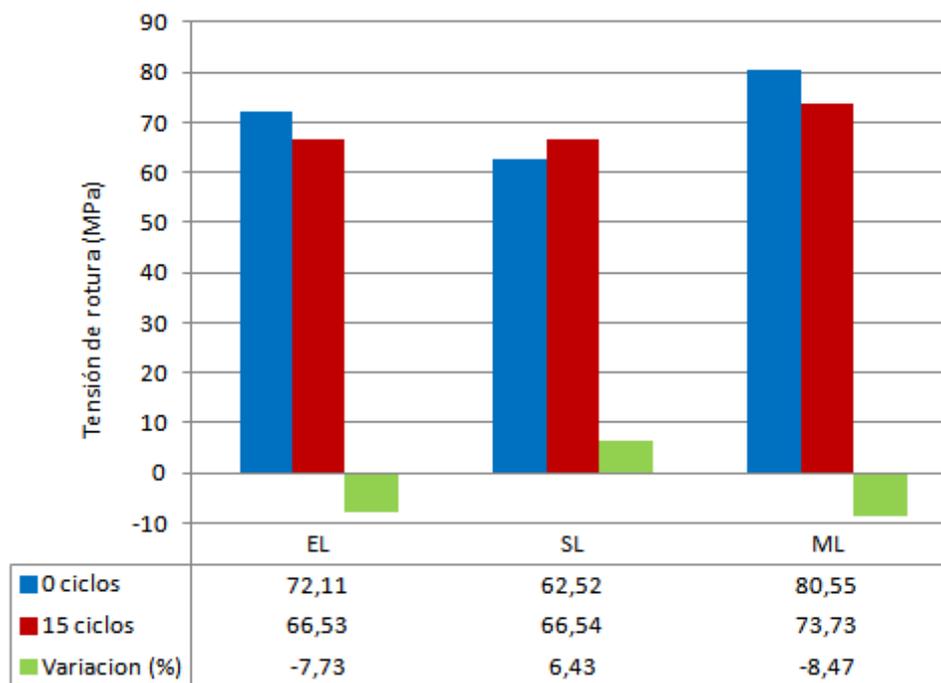


Gráfico 6.4 Influencia de una atmosfera industrial en la resistencia a compresión de las distintas dosificaciones

## 6.7. CONCLUSIONES

En el ensayo de hielo- deshielo se puede concluir que los hormigones dosificados con fibras, tanto metálicas como sintéticas, apenas presentan

pérdida de masa una vez finalizado el mismo (3-4%), sin embargo la mezcla sin fibras presenta una pérdida del 62%.

Por otro lado, las fibras no aportan un comportamiento significativo al hormigón, en la pérdida o ganancia de masa, para el caso de los ciclos alternantes de humedad-sequedad, siendo esta muy similar para las tres dosificaciones.

Los hormigones con fibras presentan una pérdida de peso menor, en la estabilidad frente a los sulfatos. Por otro lado, la adición de fibras no mejora ni empeora la estabilidad dimensional del hormigón.

En lo relativo al ensayo de carbonatación, la dosificación **ML** presenta una considerable disminución de la superficie afectada, debido a que la adición de fibras metálicas provoca una mejor compactación del hormigón y un descenso de la porosidad, disminuyendo la superficie de penetración del CO<sub>2</sub>.

En el último ensayo de durabilidad, resistencia a atmosferas industriales, la incorporación de fibras al hormigón no produce ningún cambio significativo en la variación de peso.

Los ensayos a compresión realizados tras cada ensayo de durabilidad, nos permiten concluir que:

- La dosificación **SL** muestra un comportamiento desconcertante mejorando sus propiedades mecánicas.

Este comportamiento se debe a una incompleta hidratación del hormigón durante su etapa de curado, completándose esta fase durante la realización de ensayos en presencia de agua y/o humedad, de modo que las propiedades del mismo se ven favorecidas.

- La adición de fibras metálicas al hormigón tiene como consecuencia que la resistencia a compresión, tras los ensayos de durabilidad, no disminuye tanto como la del hormigón sin fibras.

La excepción a esa tendencia la constituye el ensayo Kesternich, en el que la capacidad resistente del hormigón con fibras metálicas ha podido verse perjudicada por la acción de la atmosfera corrosiva empleada en el mismo, siendo la pérdida de resistencia a compresión similar para la dosificación con fibras metálicas y sin fibras.

**Puesta en obra**

## **Capítulo VII**



## 7. PUESTA EN OBRA

### 7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza el comportamiento del HRF en su aplicación y puesta en obra, concretamente en la ejecución de losas para pavimentos, pues éste representa uno de los usos más habituales de los hormigones con fibras.

Se ejecutan tres losas, de dimensiones 2,5x2,5x0,15 m, en el exterior de los talleres de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos. Éstas se realizan con las distintas dosificaciones estudiadas en la presente investigación. La primera se elabora con hormigón siderúrgico (EAF) con la dosificación de las mezclas **EL**, incluyendo además un mallazo en la parte superior (losa E). La segunda se fabrica con la dosificación **ML** con fibras metálicas (losa M) y la tercera con fibras sintéticas **SL** (losa S).

El objetivo es contrastar el comportamiento de cada uno de los hormigones caracterizados, en un elemento constructivo realizado 'in situ' y ubicado a la intemperie durante cuatro años.

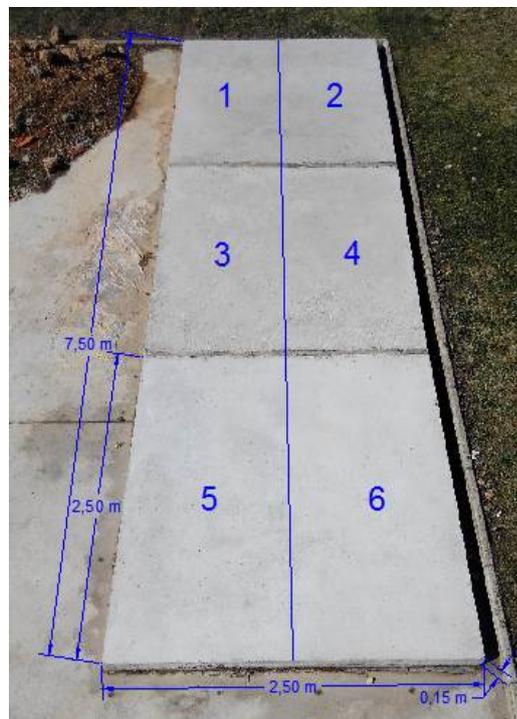


Imagen 7.1 Aspecto general con dimensiones y numeración de las losas.

El acabado superficial de cada losa de hormigón se frata de dos maneras distintas, una mitad se realiza con cuarzo/cemento y la otra con escoria negra EAF/cemento, ambas con idéntica proporción 2/1 (árido/cemento), de tal manera que la granulometría del cuarzo sea la misma que la escoria negra que lo sustituye. La dosificación empleada es de 3 Kg/m<sup>2</sup> en cada uno de los diferentes acabados.

De este modo se puede cotejar tanto la viabilidad de los diversos hormigones estudiados como el de los distintos fratasados o acabados superficiales.

El esquema de hormigonado y acabado superficial se indica en la Imagen 7.1 y Tabla 7.1.

Hormigón <b>EL</b> (sin fibras) + mallazo Acabado superficial: cuarzo/cemento (EC)	<b>1</b>	<b>E</b>	<b>2</b>	Hormigón <b>EL</b> (sin fibras) + mallazo Acabado superficial: escoria EAF/cemento (EE)
Hormigón <b>ML</b> (fibras metálicas) Acabado superficial: cuarzo/cemento (MC)	<b>3</b>	<b>M</b>	<b>4</b>	Hormigón <b>ML</b> (fibras metálicas) Acabado superficial: escoria EAF/cemento (ME)
Hormigón <b>SL</b> (fibras sintéticas) acabado superficial: cuarzo/cemento (SC)	<b>5</b>	<b>S</b>	<b>6</b>	Hormigón <b>SL</b> (fibras sintéticas) Acabado superficial: escoria EAF/cemento (SE)

Tabla 7.1 Tipo de hormigón y acabado de soleras

Se ha elegido el acabado con escoria negra (EAF)/cemento debido a las características de dureza y resistencia a la abrasión que tiene este residuo.

## 7.2. LOSAS EXTERIORES

Como se ha comentado con anterioridad, la ubicación de las losas es en el exterior de los talleres de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, en su campus de la Milanera.

Las fechas de ejecución se reflejan en la Tabla 7.2. Como se puede comprobar, han permanecido durante un periodo de cuatro años a la intemperie, por lo que han estado sometidas a las acciones climatológicas propias de invierno y verano, con cambios de humedad-sequedad, lluvia, nieve, hielo, etc.

17/octubre/2011	<b>1</b>	<b>E</b>	<b>2</b>	17/octubre/2011
21/octubre/2011	<b>3</b>	<b>M</b>	<b>4</b>	21/octubre/2011
26/octubre/2011	<b>5</b>	<b>S</b>	<b>6</b>	26/octubre/2011

Tabla 7.2 Fechas de hormigonado

### 7.2.1. Proceso de ejecución

Para la ejecución de las losas se colocó, entre la superficie de apoyo y el hormigón, una lámina de polietileno para evitar la adherencia con el pavimento existente. El encofrado se realizó con tablonces de madera de pino de escuadría 15 x 7 cm tal y como se aprecia en la Imagen 7.2.



Imagen 7.2 Encofrado de losas exteriores

Para el amasado del hormigón se utilizó una hormigonera autopropulsada de 1,5 m<sup>3</sup> de capacidad, se aportaron primeramente la mitad de los áridos y del cemento, completando después la otra mitad de los áridos y del cemento, amasándolos en seco para que se distribuyeran homogéneamente.

Una vez mezclados en seco los áridos y el cemento, y estando en marcha la hormigonera, se añade despacio el agua y el plastificante disuelto en los últimos 20 litros de agua para una mejor distribución.

Posteriormente, cuando el hormigón de la cuba presenta un buen aspecto de amasado, se agregan las fibras (losas 3-4 y 5-6), despacio y de manera uniforme, dejando girar la cuba a máxima velocidad aproximadamente otros 5 minutos, hasta que presentan una buena dispersión las mismas en la mezcla.



Imagen 7.3 Hormigonera autopropulsada empleada y vertido por gravedad del hormigón

Una vez amasado y bien distribuidas y mezcladas las fibras en el hormigón, se vierte el hormigón fresco por gravedad. El método de compactación empleado es el vibrado con “vibrador de aguja” y la “regla vibrante” en la superficie de acabado. (Imagen 7.3 e Imagen 7.4).



Imagen 7.4 Sistemas de compactación utilizados en las losas

#### 7.2.1.1. Fratasado superficial

Tal y como se ha comentado, el acabado superficial de las losas es de cuarzo/cemento en las soleras 1-3-5, situadas a la izquierda, y de escoria negra EAF/cemento en las 2-4-6 ubicadas en la zona derecha, según se aprecia en la Imagen 7.1.

La proporción es 2/1, es decir dos partes de árido, una parte de cemento. La granulometría del cuarzo y escoria negra EAF coinciden y está recogida en la Tabla 7.3. La cuantía empleada es de 3 kg/m<sup>2</sup> de losa.

<b>Análisis granulométrico</b>				
<b>Luz Tamiz (mm)</b>	<b>Retenido (g)</b>		<b>% Retenido</b>	
	<b>Parcial</b>	<b>Acumul.</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumul.</b>
<b>4</b>	1,44	1,44	0,16%	0%
<b>2</b>	49,70	51,14	5,52%	6%
<b>1</b>	293,70	344,84	32,61%	38%
<b>0,5</b>	488,30	833,14	54,21%	93%
<b>0,25</b>	59,15	892,29	6,57%	99%
<b>0,125</b>	7,26	899,55	0,81%	100%
<b>0,063</b>	1,14	900,69	0,13%	100%
<b>TOTAL</b>	900,69		100%	

Tabla 7.3 Análisis granulométrico del cuarzo y escoria.

El fratasado se realiza con helicóptero (Imagen 7.6), de tal manera que se obtiene un acabado semi-fino o antideslizante apto para solados industriales exteriores.

Una vez el hormigón compactado, vibrado y alisado con la regla vibradora empieza a perder agua de exudación superficial, se espolvorea uniformemente la mezcla correspondiente a cada una de las mitades de las losas y se espera a que el hormigón endurezca lo suficiente para poder pasar el helicóptero y realizar el fratasado correspondiente.



Imagen 7.5 Materiales de aporte repartido antes del fratasado



Imagen 7.6 Fratasado con helicóptero en las losas

### 7.2.2. Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas en las losas, una vez transcurridos 4 años, son las siguientes:

- Inspección visual, localizando posibles defectos como fisuras, grietas, desconchados, manchas, etc. Se analiza si existe diferencia entre las tres losas y también entre los dos acabados de cada losa.
- Extracción de testigos para comprobar la resistencia a compresión del hormigón después de 4 años.

- Extracción de testigos para ensayar a impacto, diferenciando entre el acabado de fratasado con escoria y con cuarzo.
- Extracción de testigos para ensayar a desgaste por abrasión, diferenciando también entre los dos acabados y las diferentes losas.



Imagen 7.7 Aspecto general de las tres losas a los 4 años de ser ejecutadas

#### 7.2.2.1. Inspección visual

Es reseñable destacar que en ninguna de las tres losas se aprecian grietas ni fisuras de retracción, tampoco se aprecia diferencia de tono o color entre los dos acabados.

**Inspección visual de la 1ª losa (losa E):** ejecutada con hormigón siderúrgico **EL** (sin fibras), con acabado de cuarzo **EC** (Izq) y acabado de escoria **EE** (Dcha) (Imagen 7.8).

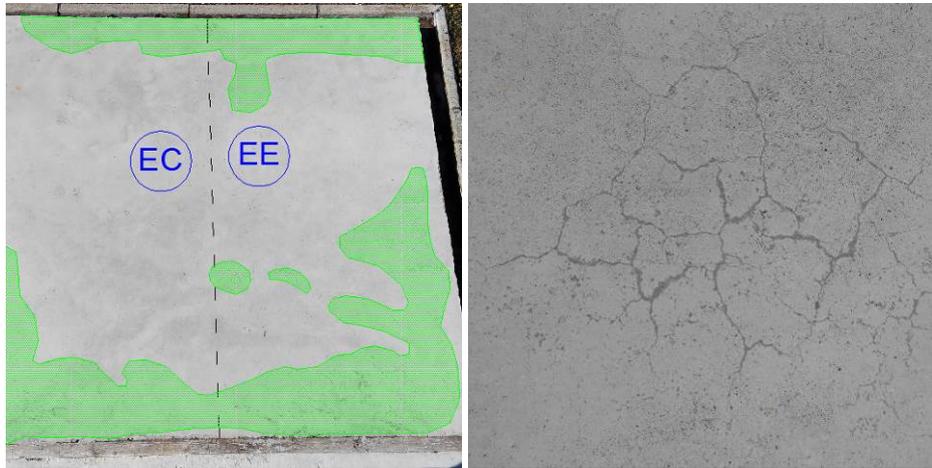


Imagen 7.8 Izq. Distribución en losa E de las fisuras de afogado. Dcha. detalle de estas fisuras en losa E

Esta losa presenta un acabado uniforme y liso, carente de grietas y desconchados, no se distingue a simple vista diferencia entre los dos acabados superficiales.

Se puede apreciar en el contorno de la losa, tanto en un acabado como en otro, unas ligeras fisuras superficiales, asemejadas a las denominadas fisuras de afogado, sin que la profundidad afecte más que a la parte superficial del acabado, posiblemente producidas por una excesiva velocidad de evaporación superficial que no se compensaba suficientemente con la humedad de exudación.

La posible causa puede estar provocada por una humedad relativa del ambiente bajo, ayudado por una velocidad del viento apreciable.

En la Imagen 7.8 Izq, sombreado en color verde, se marcan las zonas donde aparecen las fisuras de afogado, y en Imagen 7.8 Dcha., se muestra un detalle de este tipo de fisuras en la losa de hormigón E.

Desde el punto de vista de la durabilidad del hormigón, no tienen prácticamente ninguna importancia, más allá de la estética del acabado, debido a que la profundidad de estas fisuras no alcanza en ningún punto los 2 mm.

En el resto de la losa no aparece ningún otro elemento destacable.

**Inspección visual de la 2ª losa (losa M):** realizada con hormigón siderúrgico con fibras metálicas **ML**, acabado de cuarzo **MC** y acabado de escoria **ME**.

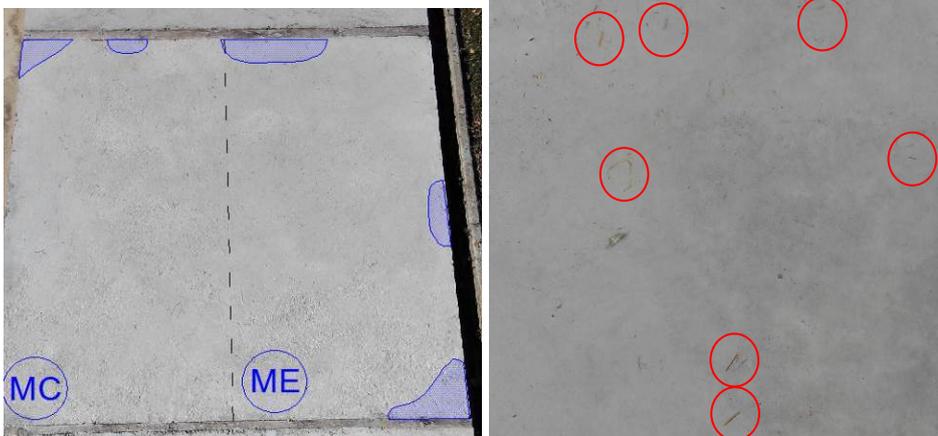


Imagen 7.9 Izq Distribución en 2ª losa M de las fisuras de afogado. Dcha Detalle oxidación fibras superficiales

Esta segunda losa presenta un aspecto uniforme, algo más rugoso que la anterior, no apreciándose diferencias destacables entre las dos mitades con distintos acabados.

La única diferencia reseñable estriba en la rugosidad y viene condicionada por la puesta en obra de la losa, al ser este hormigón con fibras metálicas de peor trabajabilidad que el anterior.

Las zonas sombreadas en azul de la Imagen 7.9 indican la ubicación de las fisuras superficiales de afogado. Tal y como puede apreciarse, existe una menor cantidad de ellas respecto de la anterior losa y ubican en el perímetro de la solera.

Se evidencia la presencia de oxidación de las fibras metálicas situadas en la superficie exterior debido al contacto de estas con la humedad ambiental. (Imagen 7.9 Dcha). Las fibras que se ven superficialmente presentan una distribución aleatoria.

**Inspección visual de la 3ª losa (losa S):** realizada con hormigón siderúrgico y con fibras sintéticas **SL**, acabado de cuarzo SC y escoria SE.

El acabado es uniforme y liso y no se aprecian superficialmente tantas fibras como en la losa con fibras metálicas.

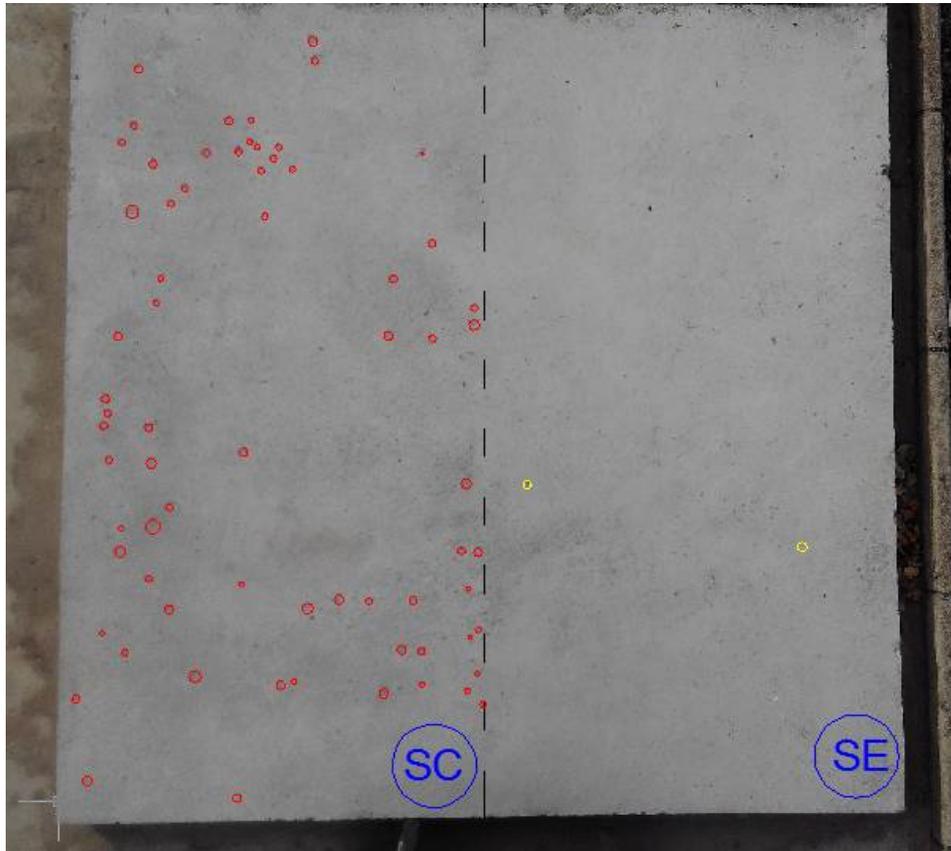


Imagen 7.10 Aspecto general de la 3ª losa marcados en rojo y amarillo los desconchados

En esta losa no aparecen fisuras superficiales de afogado, sin embargo, en la parte izquierda (acabado de cuarzo SC) se aprecia una alta concentración de desconchados en la superficie de dimensiones entre 15 y 30 mm de diámetro.

En la Imagen 7.10 se observan, marcados en rojo, la cantidad y ubicación de los desconchados en la zona fratasada con cuarzo, frente a los detectados en la zona pulida con escoria EAF, donde apenas aparecen varias unidades, señalados en color amarillo. En esta tercera losa se aprecia mayor diferencia entre las dos divisiones de acabados.

En algunos casos el desconchado coincide con una fibra sintética superficial (Imagen 7.11). A tenor de los defectos encontrados, se puede afirmar que el tratamiento superficial con escoria/cemento tiene un mejor comportamiento en las soleras ejecutadas con hormigón siderúrgico y fibras sintéticas.

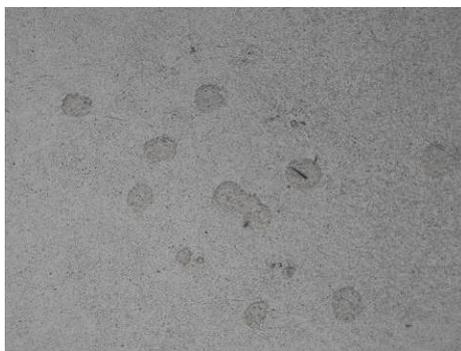


Imagen 7.11 Tipología de los desconchados observados

### 7.2.2.2. Resistencia a compresión

Se extraen testigos de las losas y se someten a los correspondientes ensayos de compresión (Imagen 7.12 e Imagen 7.13).



Imagen 7.12 Testigos para la resistencia a compresión antes y después del refrentado.

Las dimensiones y peso de cada uno de los testigos, así como el valor de su resistencia a compresión queda reflejado en la Tabla 7.4.

Clase	Características de los testigos			Resistencia a compresión (MPa)
	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	
<b>EE</b>	153,50	74,00	1802,10	<b>72,54</b>
<b>EC</b>	153,20	74,10	1803,85	<b>70,10</b>
<b>SE</b>	153,20	74,00	1744,40	<b>69,13</b>
<b>SC</b>	147,35	73,90	1738,75	<b>69,49</b>
<b>ME</b>	155,00	74,10	1793,10	<b>77,52</b>
<b>MC</b>	154,20	74,05	1824,75	<b>76,33</b>

Tabla 7.4 Características medias de los testigos y resultados medios de la resistencia a compresión



Imagen 7.13 Testigo antes y después del ensayo a compresión

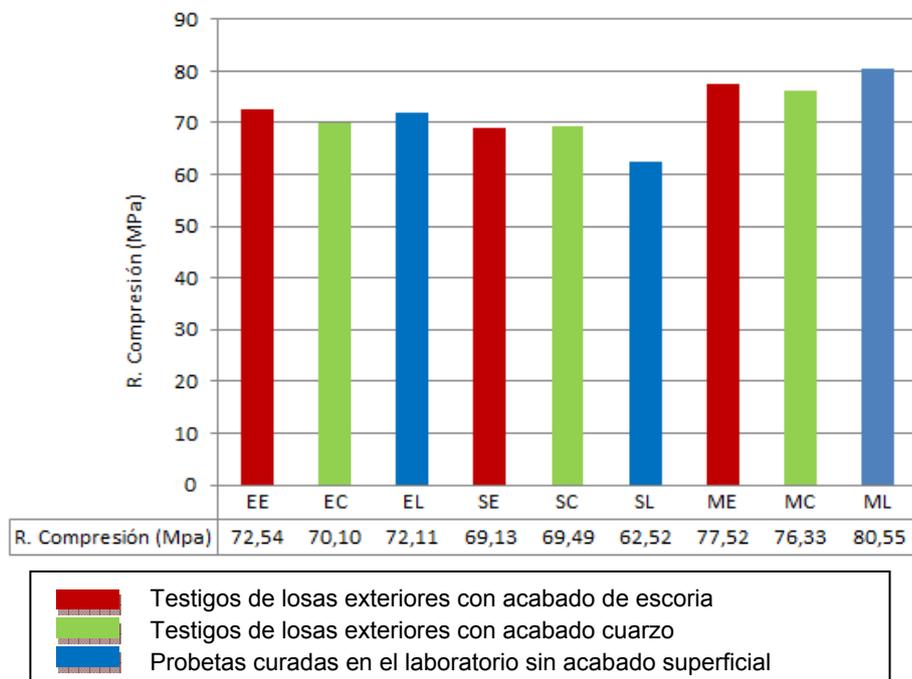


Gráfico 7.1 Comparativa de los resultados a compresión de los testigos con las probetas a 90 días

En el Gráfico 7.1 se comparan las resistencias a compresión de los hormigones estudiados a 90 días de curado (color azul) y los valores obtenidos en las losas a los 4 años de su fabricación.

Como puede observarse, los valores de las resistencias a compresión de los hormigones ‘puestos en obra’ de la losa 1ª(E) y la 3ª (M) son similares respecto de sus homólogos a 90 días de curado, pudiendo afirmarse que todas las mezclas caracterizadas alcanzan valores óptimos a compresión cuando se emplean en elementos constructivos ubicados a la intemperie.

Se aprecia que las resistencias obtenidas en la losa con fibras sintéticas (S) son aproximadamente un 10% superior respecto de sus homólogas a 90 días (**SL**).

Esto puede justificarse con los resultados obtenidos a compresión en los ensayos de durabilidad. En ellos las probetas de tipo **SL** han estado sometidas a humedad elevada o en contacto con agua. En todos los casos, la resistencia de estas probetas ha experimentado un incremento de alrededor de un 10% al completarse la hidratación de sus componentes.

### 7.2.2.3. Resistencia al impacto de los testigos con diferentes acabados

Los testigos extraídos se realizan con broca hueca refrigerada con agua, de diámetro 150 mm y 63 mm de altura, tal y como se indica en la norma UNE 83514.

El dispositivo empleado es el mismo que se utilizó en el apartado 5.4.9 de este documento. Consiste en una maza metálica de base circular y de 4,54 kg, adaptada a una guía tubular, ésta se deja caer desde una altura de 427 mm sobre una esfera de acero situada sobre la probeta de hormigón (Imagen 7.14).

Para determinar la profundidad del cráter del impacto se utiliza un micrómetro analógico adaptado a un trípode que mide la diferencia entre la superficie del acabado y la profundidad del cráter del impacto cada dos caídas de la maza (Imagen 7.14 derecha).



Imagen 7.14 Dispositivo para el ensayo de resistencia al impacto y para la medición del cráter de impacto

El ensayo se realiza sobre tres testigos de cada losa y tipo de acabado (cuarzo/cemento o escoria/cemento), calculando la media de los resultados y reflejando los datos de profundidad de los cráteres causados en los acabados. La medición se obtiene cada dos golpes, midiendo la profundidad del cráter ocasionado hasta los dieciséis golpes, aunque en

alguno de los testigos se ha producido la rotura antes de ese número de golpes.

En la Tabla 7.5 se muestran los resultados medios de los testigos del mismo acabado y de la misma losa por un lado y la media de los valores del mismo acabado de las diferentes losas por otro (en negrita).

Testigos	Profundidad del cráter (mm) para cada número de golpes							
	2	4	6	8	10	12	14	16
EE	0,27	0,35	0,44	0,48	0,53	0,57	0,66	0,79
ME	0,20	0,27	0,34	0,38	0,60	0,73	0,83	0,89
SE	0,29	0,42	0,54	0,59	0,74	0,94	0,99	1,10
<b>Acabado Escoria</b>	<b>0,25</b>	<b>0,35</b>	<b>0,44</b>	<b>0,48</b>	<b>0,62</b>	<b>0,75</b>	<b>0,83</b>	<b>0,93</b>
EC	0,36	0,44	0,64	0,86	1,21	1,25	-	-
MC	0,18	0,30	0,35	0,39	0,50	0,70	1,10	1,52
SC	0,16	0,37	0,48	0,66	0,78	0,91	1,13	1,36
<b>Acabado Cuarzo</b>	<b>0,23</b>	<b>0,37</b>	<b>0,49</b>	<b>0,64</b>	<b>0,83</b>	<b>0,95</b>	<b>1,12</b>	<b>1,44</b>

Tabla 7.5 Valores medios de profundidad del cráter por número de golpes

Como puede observarse, los valores de la profundidad en los acabados de cuarzo son ligeramente superiores que cuando se emplea escoria, pudiéndose afirmar que el fratasado realizado con escoria EAF/cemento tiene una mejor resistencia al impacto que los acabados tradicionales ejecutados con cuarzo.

Asimismo, se comprueba que los hormigones con fibras metálicas (ME y MC) presentan un mejor comportamiento al impacto que el resto de hormigones estudiados.

En el Gráfico 7.2 se representa la relación entre el número de golpes y la profundidad alcanzada con cada tipo de acabado.

Se analiza la profundidad del cráter desde los 0 hasta los 16 golpes ya que para este valor se producen la mayoría de las roturas del acabado superficial de los testigos.

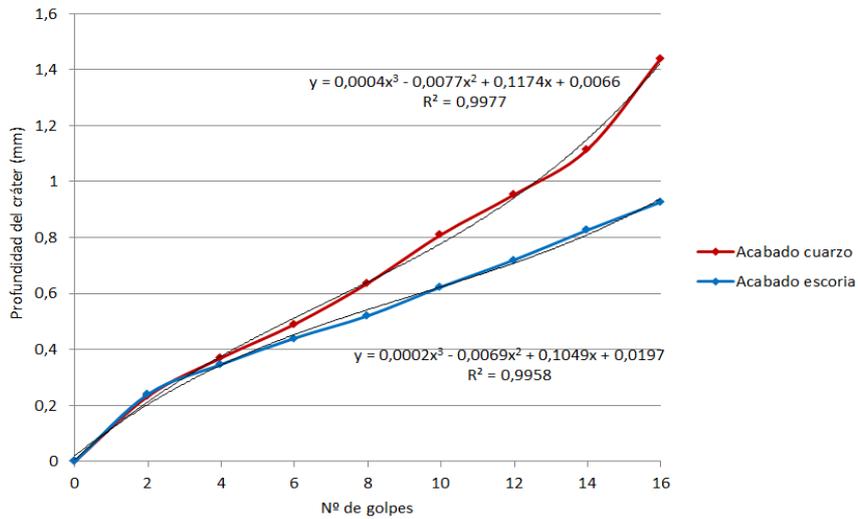


Gráfico 7.2 Evolución del comportamiento a impacto de los acabados superficiales de cuarzo y escoria

A partir del cuarto golpe, se produce un cambio de tendencia en cuanto al comportamiento del acabado, mostrando una mejor resistencia al impacto el acabado de escoria frente al de cuarzo.

En la Imagen 7.15 se pueden apreciar las diferentes fases del ensayo de resistencia al impacto en un testigo, desde el inicio a la primera fisura y posteriormente a la rotura del testigo.

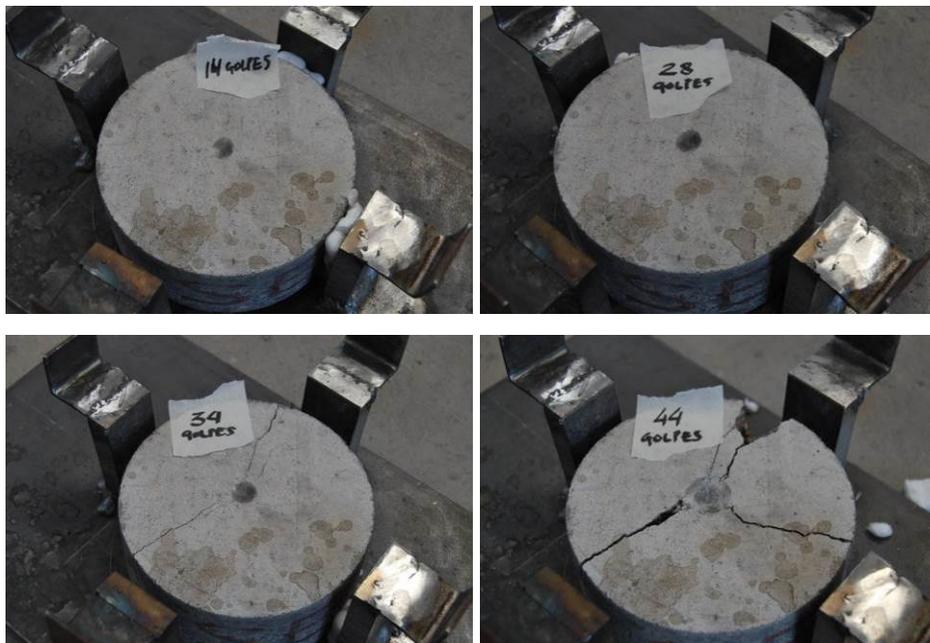


Imagen 7.15 Distintas fases del ensayo de un testigo a resistencia al impacto

Se pretende analizar la resistencia al impacto no solo en función del tipo de acabado, sino también en función del tipo de hormigón con el que está ejecutada la losa.

En la Tabla 7.6 se reflejan el número de golpes necesarios, en cada tipo de hormigón, hasta que aparece la primera fisura y hasta la rotura de la probeta.

Tipo de Losa	Número de golpes hasta	
	1º fisuras	rotura
<b>Sin fibras E</b>	9	12
<b>Con fibras metálicas M</b>	18	73
<b>Con fibras Sintéticas S</b>	15	62

Tabla 7.6 Valores medios de los golpes a primera fisura y rotura en función del tipo de hormigón

Se puede comprobar que el número de golpes tanto a primera fisura como hasta rotura son menos que los obtenidos con las probetas curadas en laboratorio y reflejados en el apartado 5.4.9.(Tabla 7.7). Sin embargo la diferencia entre el número de golpes necesarios para primera fisura y los de rotura para los testigos con fibras es considerable, siendo un poco superior en los de fibras metálicas, por lo que se justifica la ventaja de la incorporación de fibras en el hormigón frente a la resistencia al impacto.

Número de Golpes	Resistencia al impacto					
	90 D EL	4 A E	90D SL	4A S	90 D ML	4A M
<b>1ª fisura</b>	11	9	24	15	46	18
<b>Rotura</b>	13	12	88	62	155	73

Tabla 7.7 Comparativa resistencia al impacto

Las causas de esta diferencia se pueden achacar a la ligera reducción del tamaño del testigo al extraerlo con broca hueca por la pérdida de casi 10 mm en el diámetro por el espesor de dicha broca y por la puesta en obra de las losas.

#### 7.2.2.4. Desgaste por abrasión

Para realizar el ensayo de resistencia a la abrasión, se sigue el procedimiento descrito en la norma UNE-EN-1338. Se extraen testigos con broca hueca refrigerada con agua del diámetro 150 mm. Las muestras se ensayan en la superficie de acabado de las losas (Imagen 7.16).



Imagen 7.16 Testigo en ensayo y huellas marcadas en los acabados de los testigos ensayados

En el gráfico siguiente se reflejan los datos medios de las diferentes huellas marcadas en los testigos, tanto longitudinal como transversal.

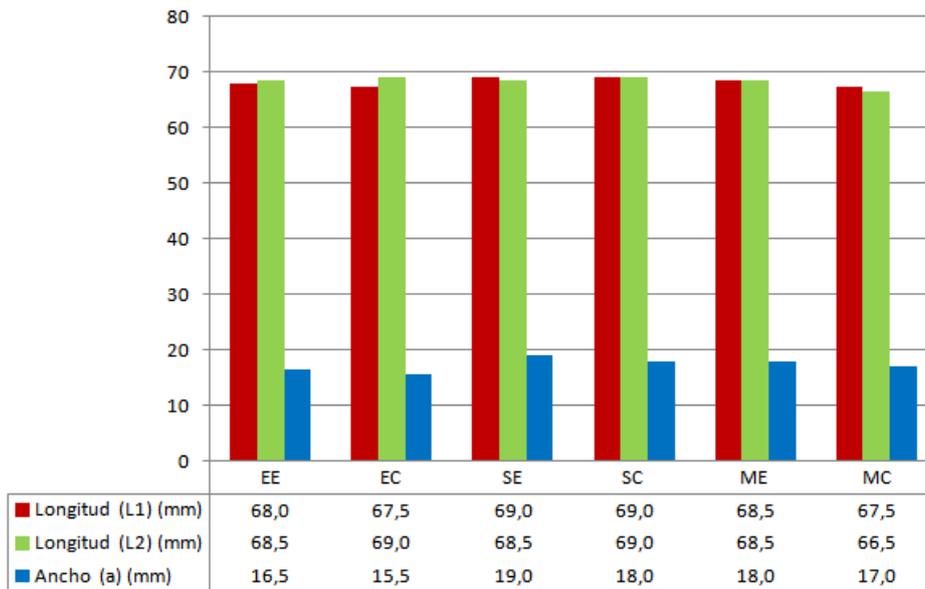


Gráfico 7.3 Medidas de los resultados de los diferentes acabados

Las diferentes huellas de desgaste marcadas son muy semejantes, no pudiendo establecer diferencias reseñables entre los distintos tipos de acabados.

El acabado con menor ancho de huella se observa en el hormigón siderúrgico con acabado cuarzo/cemento EC, de 15,5 mm, siendo la diferencia con el resto inferior a 3,5 mm (20%).

En la Tabla 7.8 se muestran las medias realizadas por acabados donde apenas existe diferencia entre dichos valores, concluyendo que los dos acabados tienen un comportamiento al desgaste por abrasión semejante.

Resistencia al desgaste por abrasión	Tipología	
	Acabado cuarzo	Acabado escoria
Ancho (a) (mm)	16,83	17,83
Longitud (L1) (mm)	68,00	68,50
Longitud (L2) (mm)	68,17	68,50

Tabla 7.8 Valores medios de la huella de desgaste en función del tipo de acabado

### 7.2.3. Conclusiones

#### Respecto a la Inspección Visual

Las losas ejecutadas con hormigón siderúrgico, tanto las realizadas con mallazo como las dosificadas con fibras, no presentan grietas ni fisuras de retracción significativas, a excepción de las de afogado sin apenas profundidad.

Las fisuras de afogado sin profundidad se aprecian en el contorno exterior de las dos primeras losas (E, M) en los dos acabados, producidas por una rápida evaporación de la humedad superficial.

Los hormigones dosificados con fibras sintéticas y acabado con cuarzo SC presentan mayor número de desconchados que su homólogo acabado con escoria SE, aunque estos desconchados son casi testimoniales.

El acabado de la losa con fibras metálicas (M) presenta un acabado más rugoso que las otras dos, debido a la peor trabajabilidad del hormigón con fibras en su puesta en obra.

#### Respecto a la resistencia a compresión

Los valores de resistencia a compresión que han aportado los testigos de las diferentes losas reflejan un mantenimiento de sus características de resistencia a compresión.

#### Respecto a la resistencia al impacto

La resistencia al impacto de los dos acabados se puede apreciar una ligera ventaja en cuanto a más resistencia del acabado con escoria que el de cuarzo pudiendo concluir que el acabado de escoria resulta tan bueno o ligeramente mejor que el de cuarzo.

#### Respecto a la resistencia a la abrasión

La resistencia al desgaste por abrasión de los dos acabados se puede considerar semejante no destacando ninguno de los dos.



**Conclusiones finales y  
Futuras líneas de investigación**

## **Capítulo VIII**



## **8. CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **8.1. CONCLUSIONES FINALES**

Si se recuerda la parte inicial del presente documento, allí donde hablábamos de los objetivos de los trabajos a realizar, se decía que el objetivo principal de la presente Tesis Doctoral era la fabricación de hormigón siderúrgico, elaborado con escoria negra de horno de arco eléctrico (EAF) como sustitución de los áridos naturales, con aporte de fibras metálicas o sintéticas que sirvan de refuerzo y mejoren sus propiedades mecánicas. En función de los trabajos y análisis aquí realizados se puede concluir que el objetivo propuesto ha sido ampliamente conseguido. Es factible la elaboración de dichos hormigones, presentan características adecuadas a los fines previstos y son suficientemente duraderos los hormigones así diseñados.

A lo largo de todo este documento y especialmente al final de cada capítulo experimental se ha ido exponiendo una serie de conclusiones parciales relativas al propio capítulo, por ello no se va a cometer ahora la reiteración de volver a relatar aquí las mismas conclusiones sino que se procederá a exponer de forma resumida tan sólo las conclusiones fundamentales que suponen aspectos totalmente innovadores en el desarrollo de la investigación realizada en función de los resultados obtenidos.

De los trabajos realizados se ha obtenido las siguientes conclusiones:

1.- Los hormigones realizados con escorias siderúrgicas (EAF) presentan mayores resistencias tanto a corto como a medio y a largo plazo que los hormigones convencionales. Eso permitiría, si se considerara adecuado, reducir los Kg de cemento por metro cúbico cumpliendo sobradamente los requerimientos exigidos para el uso de los mismos como soleras y/o pavimentos.

2.- La incorporación de fibras a los hormigones siderúrgicos, como ya se intuía, supone una mejora importante en las características mecánicas demandadas para el uso propuesto de pavimentos y/o soleras.

Las cuantías más adecuadas de dosificación de fibras son las que han quedado expuestas en el Capítulo IV (45 Kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero y 3,5

Kg/m<sup>3</sup> de fibras de polipropileno) y posteriormente avaladas en el Capítulo V.

3.- Los hormigones aquí estudiados son, con las dosificaciones propuestas, poco trabajables, sin embargo no presentan dificultades para su puesta obra, dado el uso previsto como soleras y/o pavimentos.

4.- De los cuatro métodos estudiados para establecer la trabajabilidad de las masas de hormigón en laboratorio tan sólo parece adecuado, para los hormigones elaborados con áridos siderúrgicos (EAF) y fibras, el método del grado de compactibilidad, que produce valores coherentes y adecuados con la posterior puesta en obra.

5.- Se considera más adecuado, en función de los resultados de los ensayos realizados y de las exigencias previstas, la utilización de fibras metálicas.

Sin embargo el uso de las fibras de polipropileno también produce resultados aceptables. Por tanto y a pesar de lo anterior, se puede proponer también la incorporación de fibras de polipropileno en aquellos casos en los que las condiciones de uso sean menos exigentes, dejando para otros usos que demanden mayores prestaciones el empleo de las fibras metálicas.

6.- En todos los casos los hormigones siderúrgicos con escorias EAF y fibras presentan mejores características de durabilidad que los que no tienen fibras. No parece relevante el tipo de fibra empleada con respecto a la durabilidad, aun teniendo en cuenta que las fibras de acero pueden presentar deterioros por oxidación, que no parecen nada importantes, dada la calidad de los hormigones ensayados y su escasa permeabilidad y porosidad.

8.- Los modelos de soleras construidos a escala real y colocadas a la intemperie durante cuatro años certifican los resultados obtenidos de forma experimental previa en laboratorio y por tanto avalan las conclusiones expresadas anteriormente.

9.- Parece adecuada la sustitución de las aportaciones extraordinarias de cuarzo en el fratasado y pulido final por árido fino de escorias EAF. Los resultados experimentales obtenidos sobre las losas reales y su comportamiento a medio plazo ante las inclemencias ambientales así lo avalan y demuestran que el acabado pulido de escoria es al menos, sino mejor, tan bueno como el de cuarzo y por tanto se propone como adecuado este acabado para soleras.

Si, como se decía anteriormente, el fin último era obtener un material viable y duradero desde el punto de vista constructivo, que contribuya a mejorar la gestión de los residuos siderúrgicos y cuyas características se vean incrementadas por la acción de las fibras de refuerzo en cuanto al control de la fisuración, tenacidad, resistencia al impacto, al desgaste etc., para asegurar una mayor durabilidad, en función de lo aquí expuesto se considera que esto ha quedado establecido y que se propone un nuevo material compuesto adecuado al uso previsto.

## **8.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

La presente Tesis Doctoral se ha focalizado en realizar una gran cantidad de ensayos sobre un número reducido de dosificaciones obtenidas de una fase experimental previa. Igualmente, durante el desarrollo de la misma surgen varios aspectos sobre los que profundizar y a los que no se les ha podido dedicar el tiempo preciso.

En consecuencia con lo citado en el párrafo anterior, se proponen las siguientes Líneas de Investigación Futuras:

1. Ampliar el número de dosificaciones variando la cantidad de cemento (disminuyéndola) y el contenido de fibras del hormigón, de modo que nos permita afinar la dosificación idónea que proporcione un punto de equilibrio entre unas buenas propiedades mecánicas, de tenacidad, y durabilidad y la consistencia y trabajabilidad del mismo.
2. Incluir escoria blanca como aportación de finos para mejorar la trabajabilidad y reducir la aportación total de Kg por m<sup>3</sup> de cemento.
3. Incorporación de nuevos aditivos a las mezclas, con el objetivo de mejorar alguna de las características estudiadas y llegar a hormigones de fácil puesta en obra y compactación, aunque esto es secundario en el empleo que se propone.
4. Desarrollo de investigaciones de un hormigón con escoria y fibras diferentes a las metálicas y sintéticas, o incluso probando con la mezcla de varios tipos de éstas.
5. Estudio de la influencia de la orientación real de las fibras en el comportamiento del hormigón apoyándose en el ensayo de piezas

mediante Tomografía Axial Computerizada (TAC) de que se dispone en la Universidad de Burgos.

6. Comportamiento real frente al tránsito de vehículos, con la construcción de un pavimento a escala real y a la intemperie que pueda ser observado durante un periodo de al menos tres años.
7. Análisis de uso del hormigón siderúrgico reforzado con fibras como escudo frente a las radiaciones (Rayos X y Rayos gamma) en el sector nuclear, tanto industrial como en el sector de la salud.

**Bibliografía**

## **Capítulo IX**



## 9. BIBLIOGRAFÍA

(2003). Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

(2006). Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

(2006). Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco, Departamento de Transportes y Obras Públicas. servicio central de publicaciones del País Vasco. Vitoria-Gasteiz.

(2009). Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas en la comunidad de Cataluña.

AASHTO (1980). AASHTO M-147-70 "Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base and Surface Courses". , American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

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

ACI-Committee-544 (1988). "544.4R 88 Measurement of properties of fiber reinforced concrete." *ACI Materials Journal*.

ACI-Committee-544 (1988 ). "544 Desing considerations for steel fiber reinforced concrete." *ACI Structural journal* **85**(5): 563-579.

ACI-Committee-544 (1993). 544.3R. Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*. **90**.

ACI-Committee-544 (1996). 544.1R-96 Report on Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute.

ACI-Committee-544 (2008). 544.3R-08: Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete, American Concrete Institute.

ACI-Committee (2008). ACI 544.3R-08 Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete, ACI American Concrete Institute.

ACHE (2000). "Manual de Tecnología del Hormigón reforzado con fibras de acero." Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural.

Aenor (1996). UNE-EN 933-2 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2 Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas, Madrid, AENOR.

Aenor (1996). UNE-EN ISO 6988 Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad, Madrid, AENOR.

Aenor (1996). UNE 83316 Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión., Madrid, AENOR.

Aenor (1997). UNE - EN 932-1 Ensayos para determinar las propiedades de los áridos. Parte 1: Metodos de muestreo, Madrid, AENOR.

Aenor (2000). UNE EN 206-1 Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad., Madrid, AENOR.

Aenor (2004). EN 12504-4 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos., Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE-EN 1338 Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo., Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83503 Hormigones con fibras. Medida de la docilidad por medio del cono invertido, Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83504 Hormigones con fibras. Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio, Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83506 Hormigones con fibras. Refrendado de probetas con mortero de azufre, Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83507 Hormigones con fibras. Rotura por compresión., Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83508 Hormigón con fibras. Determinación del índice de tenacidad a compresión., Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83509 Hormigones con fibras. Rotura por flexotracción, Madrid, AENOR.

Aenor (2004). UNE 83510 Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura, Madrid, AENOR.

Aenor (2005). UNE-EN 13295 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Determinación de la resistencia a la carbonatación., Madrid, AENOR.

- Aenor (2005). UNE 83514 Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia al impacto.
- Aenor (2005). UNE - EN 196-1 Metodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas., Madrid, AENOR.
- Aenor (2006). UNE - EN 12350-2 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2. Ensayo de asentamiento, Madrid, AENOR.
- Aenor (2006). UNE - EN 12350-3 Ensayos de hormigón fresco. Parte 3. Ensayo Vebe, Madrid, AENOR.
- Aenor (2008). UNE-EN 14651:2007+A1 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual), Madrid, AENOR.
- Aenor (2008). UNE 83966 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad, Madrid, AENOR.
- Aenor (2008). UNE 83982 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund, Madrid, AENOR.
- Aenor (2008). UNE - CEN/TS 12390-9 EX Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial., Madrid, AENOR.
- Aenor (2008). UNE - EN 14889-1 Fibras para Hormigon. Parte:1 Fibras de acero. Definiciones,especificaciones y conformidad, Madrid, AENOR.
- Aenor (2008). UNE - EN 14889-2 Fibras para Hormigon. Parte:2 Fibras poliméricas. Definiciones,especificaciones y conformidad, Madrid, AENOR.
- Aenor (2009). UNE - EN 12350-4 Ensayos de hormigón fresco. Parte 4: Grado de compactibilidad, Madrid, AENOR.
- Aenor (2009). UNE - EN 12350-6 Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad, Madrid, AENOR.
- Aenor (2009). UNE - EN 12390-2 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia., Madrid, AENOR.
- Aenor (2009). UNE - EN 12390-8 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Profundidad de penetración de agua a presión., Madrid, AENOR.
- Aenor (2009). UNE - EN 12620:2003+A1 Áridos para hormigón, Madrid, AENOR.

Aenor (2010). UNE 83515 Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a la fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona., Madrid, AENOR.

Aenor (2010). UNE - EN 1367-2 Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio., Madrid, AENOR.

Aenor (2010). UNE - EN 1744-1 Ensayo para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1. Análisis químico, Madrid, AENOR.

Aenor (2010). UNE - EN 12390-6 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas., Madrid, AENOR.

Aenor (2011). UNE 112011 Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio, Madrid, AENOR.

Aenor (2011). UNE - EN 12390-3 : 2009/AC Ensayos de hormigón endurecido Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, Madrid, AENOR.

Aenor (2012). UNE-EN 934-2 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definición, requisitos conformidad, marcado y etiquetado, Madrid, AENOR.

Aenor (2012). UNE – EN 933 –1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método tamizado, Madrid, AENOR.

Aenor (2014). UNE-EN 12390-13 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión., Madrid, AENOR.

Akinmusuru, J. O. (1991). "Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes." Resources, Conservation and Recycling **5**(1): 73-80.

Amaral de Lima, L. (1999). Homigones con escorias de horno eléctrico de arco como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental., Universidad Politécnica de Cataluña.

Anastasiou, E. K., I. Papayianni and M. Papachristoforou (2014). "Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement." Materials and Design **59**: p.454-460.

Arcelormittal. from <http://spain.arcelormittal.com/>.

Arribas García, I. (2011). "Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad técnica", Universidad del País Vasco.

- Arribas García, I. (2011). Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: Viabilidad tecnológica, Universidad del País Vasco.
- Arribas, I., A. Santamaria, E. Ruiz, V. Ortega-Lopez and J. M. Manso (2015). "Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete." *Construction and Building Materials* **90**: 68-79.
- Arribas, I., I. Vegas, J. T. San-Jose and J. M. Manso (2014). "Durability studies on steelmaking slag concretes." *Materials & Design* **63**: 168-176.
- ASTM (1992). ASTM C 1012. Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution., American Society for Testing and material (ASTM), West Conshohocken, PA. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM (1997). ASTM C 1018 "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-point Loading)", American Society for Testing and materials (ASTM), West Conshohocken, PA. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM (1998). ASTM C 125 "Standard Terminology Relating to Concrete and Aggregates". American Society for Testing and materials (ASTM), West Conshohocken, PA. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM (2003). ASTM D 559 "Standard Test Method for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM (2006). ASTM D 4792 "Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions". American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, P.A.
- Balaguru, P., R. Narahari and M. Patel (1992). "Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete." *ACI Materials Journal* **89**(6).
- Barra, M., E. V. Ramonich and M. A. Muñoz (2001). Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads. *Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications*. RMCR University of Durham, Arlington, Va: p.423-432.
- Bäverman, C. and F. A. Aran (1997). A study of the potential of utilising electric arc furnace slag as filling materials in concrete. *Studies in Environmental Science*. G. J. S. J.J.J.M. Goumans and H. A. v. d. Sloop, Elsevier. **71**: 373-376.
- Bentur, A. and R. Cree (1987). "Cement reinforced with steel wool." *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* **9**(4): 217-223.

Bernal, S., R. Mejía de Gutierrez, E. Rodríguez, S. Delvasto and F. Puertas (2009). "Comportamiento mecánico de Hormigones de escoria activada alcalinamente reforzados con fibras de acero." *Materiales de Construcción* **59**, nº **293**: 53 - 62.

Cachim, P. B., J. A. Figueiras and P. A. A. Pereira (2002). "Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression." *Cement and Concrete Composites* **24**(2): 211-217.

CEDEX (2013). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería de horno eléctrico de arco" [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf>], Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

Das, B., S. Prakash, P. S. R. Reddy and V. N. Misra (2007). "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries." *Resources Conservation and Recycling*. **50**(1): p.40-57.

Diamond, S. (1976). Cement paste microstructure—an overview at several levels. Proc. Conf. hydraulic cement pastes: their structure and properties, Sleafield.

DIN (1997). DIN 50018 " Ensayos de corrosión en atmosferas húmedas saturadas con adicción de dióxido de azufre". Berlin, Deutsches Institut für Normung.

Ding, Y. and W. Kusterle (2000). "Compressive stress–strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age." *Cement and Concrete Research* **30**(10): 1573-1579.

Dussart, J. (1986). Utilisation de la scorie LD en technique routiere: rapport final, Office des publications officielles des Communautés européennes, Eds. EUR 10244 FR.

Ettxeberria, M., C. Pacheco, J. M. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." *Construction and Building Materials* **24**(9): p.1594-1600.

Farran, J. (1956). Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liantes Hydrauliques.

Figueroa Andrade, M. (2013). Comparativa de la tenacidad entre hormigón convencional, hormigón reforzado con fibras de acero y hormigón reforzado con fibras de polipropileno, Universidad Politecnica de Madrid.

- Frias, M. and M. I. Sanchez (2004). "Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds." *Cement & Concrete Research* **34**: 1881 - 1888.
- Galán García, I. (2012). Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH.
- Geiseler, J. (1996). "Use of steelworks slag in Europe." *Waste Management* **16**(1-3): p.59-63.
- George, C. and F. Sorrentino (1982). "New concrete based on oxygen steel slag containing alumina." *Silicates Industriels* **47**(3): 77-83.
- González Martínez, J. J. (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. Bilbao 1999.
- González Ortega, M. A. (2015). Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Goñi, S., A. Guerrero, F. Puertas, M. Hernández, M. Palacios, J. Dolado, W. Zhu and T. Howind (2011). "Textural and mechanical characterization of CSH gels from hydration of synthetic T1-C3S, β-C2S and their blends." *Materiales de Construcción* **61**(302): pp.169-183.
- Gopalaratnam, V. S. and R. Gettu (1995). "On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes." *Cement and Concrete Composites* **17**(3): 239-254.
- Grünwald, S., F. Laranjeira de Oliveira, J. Walraven, A. Aguado de Cea and C. Molins i Borrell (2012). "Influence of fibre orientation on the performance of steel fibre-reinforced concrete."
- Hannant, D. (1975). The effect of post cracking ductility on the flexural strength of fibre cement and fibre concrete. RILEM Symposium 1975 on fibre reinforced cement and concrete.
- Hannant, D. (1978). *Fiber Cements and Fiber Concrete*, John Wiley and Sons, Chichester.
- Hernando Gaitan Rodriguez, V. (2013). Estudio del comportamiento del hormigón de alta resistencia reforzado con fibras de acero frente al impacto de proyectiles. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España.
- IHOBE, S. A. (1999). Libro blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

Jigar, P. P. (2008). Broader use of steel slag aggregates in concrete., Maharaja Saryajirao, University of Baroda. India.

Johnston, C. D. (1985). "Toughness of steel fiber reinforced concrete." *Steel Fiber Concrete*: 333-360.

Jones, N. (2001). The successful use of EAF slag in asphalt. Proc., 2nd European Slag Conf: p.123-135.

Lopez, F. A., N. Balcazar, A. Formoso, M. Pinto and M. Rodriguez (1995). "The recycling of Linz-Donawitz (LD) converter slag by use as a liming agent on pasture land." *Waste Management & Research* **13**(6): p.555-568.

Losáñez González, M. (2005). Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil Tesis doctoral, Universidad del País Vasco.

Luxán, M. P. (1995). Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico como material utilizable en la construcción. II. Evaluación de posibles limitaciones de uso y compatibilidad con los conglomerantes hidráulicos. Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

Luxán, M. P., R. Sotolongo, F. Dorrego and E. Herrero (2000). "Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace." *Cement and Concrete Research*. **30**(4): p.517-519.

Mahieux, P. Y., J. E. Aubert and G. Escadeillas (2009). "Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders." *Construction and Building Materials*. **23**(2): p.742-747.

Manso, J. M., J. J. Gonzalez and J. A. Polanco (2004). "Electric arc furnace slag in concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* **16**(6): 639-645.

Manso, J. M., D. Hernandez, M. M. Losanez and J. J. Gonzalez (2011). "Design and Elaboration of Concrete Mixtures Using Steelmaking Slags." *Aci Materials Journal* **108**(6): 673-681.

Manso, J. M., J. A. Polanco, M. Losanez and J. J. Gonzalez (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." *Cement & Concrete Composites* **28**(6): 528-534.

Manso Villalaín, J. M. (2001). Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de horno eléctrico de arco. Tesis doctoral, Universidad de Burgos. España.

Marar, K., Ö. Eren and T. Çelik (2001). "Relationship between flexural toughness energy and impact energy of high strength fiber reinforced concrete (HSFRC)." *Materiales de Construcción* **51**(262): 5-13.

- Mármol Salazar, P. C. (2010). Hormigones con fibras de acero. Características mecánicas, Universidad Politécnica de Madrid
- Maslehuddin, M., A. M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim and M. S. Barry (2003). "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes." *Construction and Building Materials* **17**(2): 105-112.
- Matsunaga, H., K. Tanishiki and K. Tsuzimoto (2008). "Environment-Friendly Block, "Ferroform," Made from Steel Slag†." *JFE GIHO* **19**: 13-17.
- Medio Ambiente Medio Rural y Marino, M. (2009). Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.
- Mehta, P. (1986). Hardened cement paste—microstructure and its relationship to properties. International Congress on the Chemistry of Cement, (Río de Janeiro) Vol 8.
- Mehta, P. K. and P. J. Monteiro (1993). "Concrete." Structure, Properties, and Materials. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice.
- Melián, G., G. Barluenga and F. HERNANDEZ-OLIVARES (2010). "Aumento de la tenacidad de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas de polipropileno." *Materiales de construcción* **60**(300): 83-97.
- Ministerio-Fomento (2008). EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.
- Ministerio-Fomento (2009). "RC-08 Instrucción para la recepción de cementos". Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento.
- Mohammadi, Y., R. Carkon-Azad, S. P. Singh and S. K. Kaushik (2009). "Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio." *Construction and Building Materials* **23**(1): 183-189.
- Monteiro, P. J. M. (1985). Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties, University of California, Berkeley.
- Motz, H. and J. Geiseler (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources." *Waste Management* **21**(3): p.285-293.
- Naaman, A. E. and K. Chandrangu (2004). "Innovative bridge deck system using high-performance fiber-reinforced cement composites." *Acı Structural Journal* **101**(1): 57-64.

Naaman, A. E. and H. W. Reinhardt (2004). "High performance fiber reinforced cement composites HPFRCC-4: International workshop Ann Arbor, Michigan, June 16–18, 2003." *Cement and Concrete Composites* **26**(6): 757-759.

Netinger, I., D. Bjegovic and G. Vrhovac (2011). "Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete." *Materials and Structures* **44**(9): 1565-1575.

Nicolae, M., I. Vilciu and F. Zaman (2007). "X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction." *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science* **69**(2): p.99-108.

Oh, B. H., J. C. Kim and Y. C. Choi (2007). "Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers." *Engineering Fracture Mechanics* **74**(1–2): 243-257.

Papayianni, I. and E. Anastasiou (2010). "Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products." *Construction and Building Materials* **24**(8): 1412-1417.

Pellegrino, C. and V. Gaddo (2009). "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate." *Cement & Concrete Composites* **31**(9): 663-671.

Polanco, J. A., J. M. Manso, J. Setien and J. J. Gonzalez (2011). "Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag." *Aci Materials Journal* **108**(2): 196-203.

Puertas, M., F. Blanco and S. Palomo (1989). "Microestructura del hormigón-Influencia sobre sus propiedades." Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid **n°398**.

Qasrawi, H., F. Shalabi and I. Asi (2009). "Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate." *Construction and Building Materials* **23**(2): 1118-1125.

Qian, G. R., D. D. Sun, J. H. Tay and Z. Y. Lai (2002). "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag." *British Ceramic Transactions* **101**(4): p.159-164.

Rubio, A. R. and J. G. Carretero (1991). "La aplicación de las escorias de acería en Carreteras." *Ingeniería Civil* **80**: 5-9.

Rubio, M. D., F. Contreras, M. A. Parrón and F. Rubio (2011). Resistencia mecánica de hormigones con sustitución de un porcentaje de cemento por polvos de humo y escoria de horno de arco eléctrico. V Congreso ACHE. Octubre 2011. Barcelona.

- Ruiz-Cuevas López-Para, F. and J. Ibarzabal (1988). Presentación del producto escoria-escoria. Materiales básicos, fabricación, características y propiedades. Jornadas sobre escorias Tratadas. Oviedo.
- San-José, J. T., I. Vegas, I. Arribas and I. Marcos (2014). "The performance of steel-making slag concretes in the hardened state." *Materials & Design* **60**(0): 612-619.
- Santamaría-Vicario, I. (2015). Fabricación de morteros de albañilería con escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria blanca de horno cuchara LF Tesis doctoral, Universidad de Burgos, Spain.
- Santamaría-Vicario, I., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2015). "Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates." *Construction and Building Materials* **95**: 197-206.
- Santos, R. M., D. Ling, A. Sarvaramini, M. X. Guo, J. Elsen, F. Larachi, G. Beaudoin, B. Blanpain and T. Van Gerven (2012). "Stabilization of basic oxygen furnace slag by hot-stage carbonation treatment." *Chemical Engineering Journal* **203**: p.239-250.
- Scrivener, K. L. (1989). "Microstructure of concrete." *Materials Science of Concrete III*, I, 1 pp. **127**.
- Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." *Journal of Materials in Civil Engineering* **16**(3): p.230-236.
- Sidorova, A. (2013). Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Smolczyk, H. (1980). Slag structure and identification of slags. Proceedings, 71<sup>st</sup> International Congress on the Chemistry of Cement.
- Song, P. S. and S. Hwang (2004). "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete." *Construction and Building Materials* **18**(9): 669-673.
- Thomas, G. H. (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.
- Tomasiello, S. and M. Felitti (2010). "EAF Slag in self-compacting concretes." *Architecture and Civil Engineering* **8** (1): p.13-21.
- Topcu, I. B. and A. R. Boga (2010). "Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete." *Materials & Design* **31**(7): p.3358-3365.

Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." *Waste Management*. **27**(10): p.1335-1344.

Trottier, N. B. d. J.-F. (1995). "Concrete reinforced with deformed steel fibers part II: toughness characterization." *ACI Materials Journal* **92**(2).

Tsakiridis, P. E., G. D. Papadimitriou, S. Tsvilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." *Journal of Hazardous Materials*. **152**(2): p.805-811.

Turmo, J., N. Banthia, R. Gettu and B. Barragan (2008). "Study of the shear behaviour of fibre reinforced concrete beams." *Materiales De Construccion* **58**(292): 5-13.

UNESID. (2013). "IRIS 2013 Informe 2013 sobre el Reciclaje del acero en la Industria Siderúrgica Española." from <http://www.unesid.org/iris2013/IRISINFORMERECICLAJEACERO2013.pdf> Fecha de consulta: septiembre 2014.

Vázquez, E. and M. Barra (2001). "Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción." *Materiales de Construcción* **51**, nº **263 - 264**: 137 - 148.

Wang, Z.-L., Y.-S. Liu and R. F. Shen (2008). "Stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression." *Construction and Building Materials* **22**(5): 811-819.

Wei, S., J. A. Mandel and S. Said (1986). "Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites." *Journal of the American Concrete Institute* **83**(4): 597-605.

World-Steel-Association (2015) "World Steel in Figures 2015. ISBN-978-2-930069-82-1."

Xie, J., S. P. Wu, J. T. Lin, J. Cai, Z. W. Chen and W. Wei (2012). "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation." *Construction and Building Materials* **36**: p.467-474.

Yazici, S., G. Inan and V. Tabak (2007). "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC." *Construction and Building Materials* **21**(6): 1250-1253.

Yildirim, I. Z. and M. Prezzi (2011). "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag." *Advances in Civil Engineering* (Article ID 463638).



