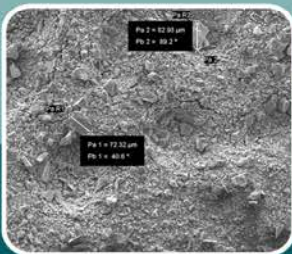




La tasa de generación de subproductos industriales del sector metalúrgico siempre ha sido superior a la de uso, originando un gran volumen de acopios en las industrias y en los vertederos. La alternativa más sostenible para estos materiales es la valorización mediante su transformación en áridos de elevado potencial mecánico. Esta solución permite minimizar el vertido así como, también, el impacto ambiental resultante de la extracción de recursos naturales, empleados tradicionalmente en el sector de la construcción.

Con la finalidad de demostrar la excelencia de algunos áridos siderúrgicos, en la investigación que recoge la presente Tesis, se fabrican hormigones fluidos de elevada resistencia y durabilidad. Para ello se han incorporado escorias valorizadas generadas en la etapa de fusión en un horno eléctrico de arco así como, también, en un horno de cubilote de viento caliente.



Tesis Doctoral
**INCORPORACIÓN DE ESCORIAS
SIDERÚRGICAS EN HORMIGONES
AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS
PRESTACIONES**

Autor:
Israel Sosa Yépez

Directores:
Juan Antonio Polanco Madrazo
Carlos Thomas García

Abril 2017

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

***DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA
DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES***



TESIS DOCTORAL

***INCORPORACIÓN DE ESCORIAS SIDERÚRGICAS EN
HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS
PRESTACIONES***

ISRAEL SOSA YÉPEZ

Santander, abril de 2017



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE
LOS MATERIALES*

TESIS DOCTORAL

**INCORPORACIÓN DE ESCORIAS SIDERÚRGICAS EN
HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS
PRESTACIONES**

AUTOR:

ISRAEL SOSA YÉPEZ

DIRECTORES:

JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

CARLOS THOMAS GARCÍA

Tesis Doctoral presentada para la obtención del Título de Doctor por la
Universidad de Cantabria

Santander, abril de 2017

“El progreso científico y tecnológico que no responde fundamentalmente a los intereses humanos, a las necesidades de nuestra existencia, pierde, para mí, su significación”

Paulo Freire.

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral se ha realizado con el respaldo y la contribución de muchas personas que indiscutiblemente forman parte de los objetivos alcanzados y a las que quiero dedicar las siguientes líneas.

En primer lugar quiero agradecer a mis directores Juan Antonio Polanco Madrazo y Carlos Thomas García por haberme introducido en la investigación, por la constante transferencia de conocimiento, la asesoría y la confianza depositada en mí para llevar a cabo este trabajo experimental. Gracias por vuestra dedicación y apoyo.

En segundo lugar quiero agradecer a los miembros del Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria, especialmente a sus directores, Federico Gutiérrez-Solana, José Antonio Casado e Isidro Carrascal Vaquero, así como también a Jesús Setién. Gracias por vuestra motivación, interés y poner a mi disposición todos los medios materiales y humanos que ha demandado este trabajo.

Mi agradecimiento se extiende a las empresas que generosamente han proporcionado los materiales utilizados en la investigación, ROCACERO, SAINT GOBAIN, GLOBAL STEEL WIRE, SOLVAY, así como también, a los departamentos de Transportes y Tecnología de Proyectos Y Procesos, CITIMAC y SERCAMAT de la UC.

En lo que respecta al trabajo experimental, no puedo olvidarme de Francisco Fiol del departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería del Terreno de la Universidad de Burgos, ni de Javier González de la Universidad del País Vasco por su colaboración en los ensayos de carbonatación y exposición en ambiente marino, respectivamente.

Por la ayuda en el arduo trabajo de laboratorio, quiero agradecer a José Adolfo Sáinz-Aja, Estela Ruiz, Cecilia Girotti, Gerson Guerrero, Ana Luiza Viola, Juan Alonso y Kenny Yzaguirre. Asimismo, al personal técnico del laboratorio, Manuel Solana y Alfredo García.

Por el cariño, la ayuda y la amistad, quiero incluir a mis compañeros del LADICIM, en especial a Irene Aizpurúa. A pesar de la distancia, por su apoyo incondicional a mis padres y hermanos. Por su motivación y comprensión a mi esposa Desirée e hija Claudia.

Resumen

La tasa de generación de subproductos industriales en el sector metalúrgico siempre ha sido superior a su uso, resultando en gran volumen de acopios en vertederos por ser la forma más sencilla para deshacerse de ellos. Desde comienzos del siglo XXI, en Europa se han establecido metas para minimizar el problema de la contaminación y del cambio climático mediante un modelo sostenible, a través de la reutilización, el reciclaje y la valorización de residuos a través de su transformación en energía o recursos aprovechables. Estas medidas se han ido reforzando sucesivamente con el objetivo de eliminar el vertido.

La elevada demanda de materiales de origen natural del sector de la construcción y el impacto ambiental que supone su extracción, permite acoplarse a las medidas propuestas en Europa mediante la valorización de subproductos industriales. Muchas experiencias revelan que las escorias siderúrgicas son materiales perfectamente útiles en la construcción. Incluso, el elevado potencial que aportan las escorias ha superado el comportamiento mecánico de algunos componentes de origen natural.

Existen diversos subproductos generados en el sector metalúrgico que dependen del método de fabricación y del material obtenido. El acero en España, se realiza mayoritariamente en hornos eléctricos de arco generando el 80% de la totalidad de las escorias de todo el proceso siderúrgico. Los esfuerzos realizados durante los últimos años se han plasmado en legislaciones autonómicas que admiten el uso de este residuo en capas granulares de carreteras y mezclas bituminosas, así como, también, en la fabricación de hormigones convencionales. Sin embargo, existe un vacío de información y normalización que estimule y garantice su uso en cualquier proyecto.

Debido a la morfología de las partículas de escorias de horno eléctrico, se ha observado en experiencias previas, que su incorporación en la misma proporción que los áridos naturales reduce la trabajabilidad del hormigón. Esto ha supuesto una motivación mayor a la hora de estudiar su incorporación en hormigones autocompactantes. Dado que es un material muy resistente, se ha planteado llevar al límite el comportamiento mecánico de las escorias diseñando hormigones de alta resistencia.

Los hormigones autocompactantes demandan un elevado contenido de finos que se suman al cemento para completar el volumen necesario de pasta para fluir y aportar estabilidad, estos componentes son conocidos como adiciones.

Además de la presencia de una acería en las cercanías de Santander, se encuentra una planta de fundición de hierro dúctil con un horno de cubilote de viento caliente. A pesar de que presenta una tasa de generación de subproductos menor que la acería, los residuos retirados del cubilote son transportados en su totalidad al vertedero. Siguiendo la filosofía de valorización de subproductos industriales y la demanda de finos del hormigón autocompactante, nace la idea de aprovechar este residuo mediante su valorización e incorporación como adición.

En resumen, el objetivo final de esta Tesis es la fabricación de hormigones autocompactantes de elevada resistencia y baja permeabilidad mediante la incorporación de escorias de horno eléctrico como árido grueso y fino, así como también, de la escoria de cubilote, tras ser valorizada, como adición.

El desarrollo del objetivo propuesto se ha realizado en distintas fases:

En la primera fase se han determinado las características de todos los componentes empleados. En el caso de los residuos, se presta importante atención a la estabilidad volumétrica, así como, también, a los requisitos medioambientales. Los materiales estudiados corresponden a escorias siderúrgicas, áridos naturales finos y gruesos, adiciones de origen natural e industrial, cemento y aditivos superplastificantes.

La segunda fase consiste en un estudio experimental previo llevado a cabo sobre morteros para evaluar el efecto de la incorporación de la escoria de cubilote como sustituto del cemento. Adicionalmente, se realiza una comparación con mezclas, fabricadas por separado, con escoria de cubilote y dos de las adiciones más empleadas en la actualidad como son, el filler calizo y las cenizas volantes.

En la tercera fase se diseña el hormigón con escorias siderúrgicas, partiendo de una dosificación patrón fabricada por triplicado con las tres adiciones disponibles. El árido grueso de origen natural empleado corresponde a ofita, por su magnífico comportamiento mecánico, siendo un requisito necesario para obtener hormigones de alta resistencia. La fabricación de estos hormigones ha permitido contrastar el efecto de la escoria de cubilote en las mezclas. Como punto intermedio entre la dosificación y la fabricación de hormigón, se han realizado pruebas con morteros fluidos manteniendo las proporciones de cada dosificación y excluyendo el árido grueso.

En la cuarta y última fase se lleva a cabo la caracterización de los hormigones confeccionados con árido natural, así como, también, la dosificación con árido siderúrgico. La campaña de ensayos en estado fresco incluye la determinación de la capacidad de flujo, paso y relleno de los hormigones autocompactantes, mientras que en estado endurecido, se determinan las propiedades físicas, mecánicas, microestructurales y de durabilidad en condiciones agresivas.

El resultado del estudio permite comprobar que se pueden elaborar hormigones fluidos, estables y de altas prestaciones, con escorias siderúrgicas. La incorporación de un importante volumen de residuos ha elevado notablemente la resistencia a compresión, así como, también, la densidad del material pétreo.

Se concluye que los morteros y hormigones con escoria de cubilote presentan mejores prestaciones mecánicas que los hormigones fabricados con otras adiciones. A pesar de que los indicadores de durabilidad se ven ligeramente reducidos tras la incorporación de las escorias, los resultados se mantienen del lado de la seguridad, incluyendo su exposición en ambiente marino y el comportamiento frente a heladas.

Palabras clave:

Hormigón autocompactante, alta resistencia, escorias siderúrgicas, escoria de horno eléctrico, EAF, escoria de cubilote, durabilidad.

Índice

Capítulo 1	Introducción y objetivos	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Estructura de la Tesis.....	5
Capítulo 2	Estado del arte	9
2.1	Introducción.....	9
2.2	Las escorias siderúrgicas.....	11
2.2.1	Normativa que afecta a la reutilización de las escorias	13
2.2.2	Producción de escorias en España	19
2.2.3	La escoria de horno eléctrico de arco	20
2.2.3.1	Proceso de la formación de la escoria de arco eléctrico	23
2.2.3.2	Enfriamiento y transformación	25
2.2.3.3	Envejecimiento de la escoria	29
2.2.3.4	Características de las escorias de horno eléctrico	30
2.2.3.4.1	Caracterización química	30
2.2.3.4.2	Características físicas y propiedades mecánicas	32
2.2.3.4.3	Granulometría de la escoria tras ser procesada	33
2.2.3.4.4	Estabilidad volumétrica	33
2.2.3.5	Experiencias en la utilización de las escorias negras.....	36
2.2.4	La escoria de cubilote	38

2.2.4.1	<i>Producción de escorias de horno de cubilote.....</i>	40
2.2.4.2	<i>Proceso de formación de la escoria de cubilote.....</i>	40
2.2.4.3	<i>Enfriamiento</i>	42
2.2.4.4	<i>Caracterización química</i>	43
2.2.4.5	<i>Experiencias en la utilización de las escorias de cubilote.....</i>	44
2.3	<i>Hormigón autocompactante</i>	45
2.3.1	<i>Antecedentes.....</i>	46
2.3.2	<i>Materiales empleados en la fabricación de HAC.....</i>	50
2.3.2.1	<i>Cemento.....</i>	51
2.3.2.2	<i>Adiciones</i>	52
2.3.2.2.1	<i>Filler mineral</i>	52
2.3.2.2.2	<i>Cenizas volantes</i>	54
2.3.2.2.3	<i>Humo de sílice.....</i>	56
2.3.2.2.4	<i>Escoria de alto horno</i>	58
2.3.2.3	<i>Áridos</i>	59
2.3.2.3.1	<i>Fracción fina.....</i>	59
2.3.2.3.2	<i>Fracción gruesa.....</i>	60
2.3.2.4	<i>Aditivos.....</i>	61
2.3.2.4.1	<i>Aditivos fluidificantes</i>	61
2.3.2.4.2	<i>Moduladores de la viscosidad.....</i>	66
2.3.2.5	<i>Agua</i>	66
2.3.3	<i>Composición.....</i>	67

2.3.4	<i>Métodos de dosificación</i>	69
2.3.5	<i>Comportamiento en estado fresco</i>	73
2.3.5.1	<i>Comportamiento reológico del HAC</i>	75
2.3.6	<i>Comportamiento en estado endurecido</i>	80
2.3.6.1	<i>Resistencia a compresión</i>	80
2.3.6.2	<i>Relación tensión-deformación</i>	82
2.3.6.3	<i>Resistencia a tracción</i>	84
2.3.6.4	<i>Retracción</i>	85
2.3.6.5	<i>Durabilidad</i>	86
2.3.6.6	<i>Carbonatación</i>	87
2.3.6.7	<i>Ataque por cloruros</i>	87
2.3.6.8	<i>Ataque por sulfatos</i>	88
2.3.6.9	<i>Ciclos de hielo-deshielo</i>	89
2.3.6.10	<i>Reacción álcali-árido</i>	90
2.3.7	<i>Experiencias de HAC fabricados con subproductos industriales</i>	90
2.4	<i>Hormigón de alta resistencia</i>	93
2.5	<i>Hormigón de altas prestaciones</i>	94
Capítulo 3 Materiales y metodología experimental		97
3.1	<i>Introducción</i>	97
3.2	<i>Materiales</i>	98
3.2.1	<i>Escoria de horno eléctrico de arco</i>	99
3.2.1.1	<i>Caracterización química y mineralógica</i>	102

3.2.1.1.1	<i>Fluorescencia de rayos X</i>	102
3.2.1.1.2	<i>Difracción de rayos X</i>	104
3.2.1.1.3	<i>Espectroscopía por infrarrojos</i>	107
3.2.1.1.4	<i>Expansividad</i>	109
3.2.1.1.5	<i>Microscopía electrónica de barrido</i>	110
3.2.1.1.6	<i>Test de lixiviados</i>	115
3.2.1.2	<i>Caracterización física</i>	116
3.2.1.2.1	<i>Determinación de densidades reales, relativas y aparentes</i>	116
3.2.1.2.2	<i>Determinación del coeficiente de absorción de agua</i>	121
3.2.1.2.3	<i>Determinación de la porosidad accesible</i>	122
3.2.1.3	<i>Caracterización morfológica</i>	123
3.2.1.3.1	<i>Determinación del índice de lajas</i>	123
3.2.1.3.2	<i>Granulometría</i>	125
3.2.1.4	<i>Propiedades mecánicas y tribológicas</i>	127
3.2.1.4.1	<i>Determinación del coeficiente de desgaste Los Ángeles</i>	127
3.2.1.4.2	<i>Determinación del índice de machacabilidad</i>	129
3.2.2	<i>Escoria de cubilote</i>	133
3.2.2.1	<i>Valorización de la escoria</i>	134
3.2.2.2	<i>Caracterización física</i>	138
3.2.2.2.1	<i>Densidad real de la escoria de fundición</i>	138
3.2.2.2.2	<i>Superficie específica Blaine</i>	138
3.2.2.3	<i>Caracterización química y mineralógica</i>	140

3.2.2.3.1	<i>Fluorescencia de rayos X</i>	140
3.2.2.3.2	<i>Difracción de rayos X</i>	141
3.2.2.3.3	<i>Espectroscopía por infrarrojos</i>	142
3.2.2.3.4	<i>Microscopía electrónica de barrido</i>	143
3.2.2.3.5	<i>Test de lixiviados</i>	145
3.2.3	<i>Áridos naturales</i>	147
3.2.3.1	<i>Caracterización química</i>	149
3.2.3.2	<i>Caracterización física</i>	152
3.2.3.3	<i>Caracterización mecánica</i>	154
3.2.4	<i>Adiciones</i>	156
3.2.4.1	<i>Caracterización de las adiciones</i>	158
3.2.5	<i>Cemento</i>	161
3.2.5.1	<i>Determinación de la densidad real</i>	162
3.2.5.2	<i>Determinación de la finura Blaine</i>	162
3.2.5.3	<i>Fluorescencia de rayos X</i>	162
3.2.5.4	<i>Microscopía electrónica de barrido</i>	163
3.2.5.5	<i>Caracterización mecánica del cemento</i>	164
3.2.6	<i>Aditivos</i>	164
3.2.6.1	<i>Punto de saturación del aditivo</i>	168
3.2.7	<i>Agua</i>	170
3.3	<i>Morteros</i>	170
3.4	<i>Hormigones</i>	178

3.4.1	<i>Método de dosificación</i>	179
3.4.1.1	<i>Fabricación del hormigón HAC</i>	181
3.4.2	<i>Caracterización del hormigón en estado fresco</i>	184
3.4.2.1	<i>Ensayo de escurrimiento</i>	184
3.4.2.2	<i>Método de la caja en L</i>	187
3.4.2.3	<i>Ensayo del embudo en V</i>	188
3.4.3	<i>Hormigón en estado endurecido</i>	190
3.4.3.1	<i>Probetas</i>	190
3.4.3.2	<i>Propiedades físicas</i>	193
3.4.3.3	<i>Propiedades mecánicas</i>	196
3.4.3.3.1	<i>Determinación de la resistencia a compresión uniaxial</i>	196
3.4.3.3.2	<i>Determinación del módulo secante de elasticidad</i>	198
3.4.3.3.3	<i>Determinación de la resistencia atracción indirecta</i>	201
3.4.3.3.4	<i>Resistencia a la abrasión por desgaste</i>	203
3.4.3.4	<i>Durabilidad</i>	205
3.4.3.4.1	<i>Retracción del hormigón</i>	206
3.4.3.4.2	<i>Ensayo de carbonatación acelerada</i>	207
3.4.3.4.3	<i>Permeabilidad al oxígeno</i>	210
3.4.3.4.4	<i>Ensayo de penetración de agua bajo presión</i>	213
3.4.3.4.5	<i>Envejecimiento por choque térmico</i>	215
3.4.3.4.6	<i>Resistencia al hielo-deshielo</i>	218
3.4.3.4.7	<i>Penetración de ion cloruro y protección frente a la corrosión de armadura</i>	221

3.4.3.5	<i>Caracterización microestructural</i>	228
Capítulo 4 Presentación y análisis de resultados experimentales		229
4.1	<i>Composición de los hormigones HAC</i>	229
4.1.1	<i>Pruebas preliminares con morteros</i>	235
4.1.2	<i>Caracterización de los morteros en estado endurecido</i>	238
4.2	<i>Caracterización de los hormigones</i>	240
4.2.1	<i>Hormigón en estado fresco</i>	240
4.2.1.1	<i>Ensayo de escurrimiento</i>	241
4.2.1.2	<i>Método de la caja en L</i>	245
4.2.1.3	<i>Ensayo del embudo en V</i>	248
4.2.2	<i>Hormigón en estado endurecido</i>	249
4.2.2.1	<i>Aspecto del hormigón endurecido</i>	249
4.2.2.2	<i>Propiedades físicas</i>	253
4.2.2.3	<i>Propiedades mecánicas</i>	256
4.2.2.3.1	<i>Resistencia a compresión uniaxial</i>	256
4.2.2.3.2	<i>Determinación del módulo secante de elasticidad</i>	260
4.2.2.3.3	<i>Tracción indirecta</i>	263
4.2.2.3.4	<i>Resistencia al desgaste por abrasión</i>	264
4.2.2.4	<i>Durabilidad</i>	266
4.2.2.4.1	<i>Retracción del hormigón</i>	266
4.2.2.4.2	<i>Ensayo de carbonatación acelerada</i>	267

4.2.2.4.3	<i>Permeabilidad al oxígeno</i>	268
4.2.2.4.4	<i>Penetración de agua bajo presión.....</i>	270
4.2.2.4.5	<i>Envejecimiento por choque térmico</i>	270
4.2.2.4.6	<i>Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo.....</i>	275
4.2.2.4.7	<i>Protección frente a la corrosión en ambiente marino.....</i>	281
4.2.2.5	<i>Caracterización microestructural.....</i>	285
Capítulo 5	<i>Conclusiones y futuras líneas de investigación</i>	293
5.1	<i>Conclusiones.....</i>	293
5.2	<i>Futuras líneas de investigación.....</i>	299
Capítulo 6	<i>Bibliografía.....</i>	301
Acrónimos	<i>.....</i>	313

Capítulo 1 Introducción y objetivos

1.1 Introducción

En España, la obtención de acero a partir de chatarra y prerreducidos en el horno eléctrico de arco sustituyó, prácticamente en su totalidad, a los hornos Martin-Siemens hace aproximadamente 35 años debido a la gran capacidad de los nuevos hornos y a la potencia del arco eléctrico empleado. Las principales ventajas del horno eléctrico de arco se basan en el ahorro energético en cada colada frente a los métodos empleados anteriormente y en la capacidad de producir aceros de calidad, sin requerir de altas inversiones para el proceso integral.

La utilización del horno eléctrico de arco facilita la fabricación masiva de aceros al carbono y de baja aleación, lo que implica, a su vez, la generación de un volumen considerable de escorias siderúrgicas. Los principales subproductos asociados al proceso son, en primer lugar, las escorias originadas en la etapa de fusión de la materia prima, conocidas como escorias negras (EAFS, que suponen un 80% en peso de la producción de escorias), seguido de las escorias blancas surgidas en el proceso de afinado del acero, conocidas como escorias blancas (LFS, con un 20% en peso respecto del total de escorias generadas).

A pesar de los esfuerzos para potenciar el aprovechamiento de las escorias en distintas aplicaciones, su empleo siempre ha sido inferior a la producción, recurriéndose al vertido como la manera más fácil para remediar las grandes extensiones de acopios en las propias acerías. La presencia de metales pesados en la composición de las escorias negras, añade un sobrecoste importante de las tasas de vertido y, al mismo tiempo, ocasiona un impacto medioambiental considerable.

La Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE) [1] establece un ámbito jurídico en la Unión Europea para la gestión de residuos cuyo objetivo principal es reducir al mínimo su generación y aumentar su transformación en recursos aprovechables. Estas medidas de desarrollo sostenible, se han implementado a nivel Estatal mediante la Ley 22/2011 de 2 de julio "Residuos y suelos contaminados" [2] y programas de gestión como el "Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015" [3]. Como resultado de estas acciones, se han desarrollado en las comunidades autónomas con mayor tasa de generación de residuos, legislaciones específicas para la valorización de escorias. Son ejemplos de ello, el Decreto 34/2003 de 18 de febrero en la Comunidad Autónoma del País Vasco [4], el Decreto 104/2006 de 19 de octubre en la Comunidad Autónoma de Cantabria [5] y el Decreto 32/2009 en la Comunidad Autónoma de Cataluña [6]. En los documentos citados, se admite el aprovechamiento de las escorias de horno eléctrico en rellenos y terraplenes como sustituto del esqueleto granular en hormigones y mezclas bituminosas. En el caso de los hormigones, el uso de los áridos siderúrgicos también está respaldado por la actual Instrucción Española del Hormigón estructural (EHE-08) [7] y por el catálogo de residuos utilizables en construcción del Centro de Estudios Experimentales del Ministerio de Fomento (CEDEX) [8].

El uso de las escorias tras su valorización supone un beneficio económico y ecológico para la industria y el medio ambiente, por la disminución en la explotación de recursos naturales y el impacto que ocasiona su vertido. A esto se deben añadir las ventajas técnicas de su aprovechamiento en el hormigón, puesto que, la escoria siderúrgica posee una elevada resistencia a la compresión, a la fragmentación y al desgaste y, además, aporta una densidad superior a las $3,3 \text{ g/cm}^3$, alcanzando, en algunos casos, los $3,8 \text{ g/cm}^3$. Cabe destacar la presencia en la escoria de ciertos componentes químicos con inestabilidad volumétrica, que deben someterse a un proceso de envejecimiento y estricto control posterior que garanticen la inertización de material.

Existen numerosos estudios referentes a la utilización de las escorias negras en morteros y hormigones convencionales que contrastan las ventajas mencionadas en el párrafo anterior [9-12]. Sin embargo, su utilización en hormigones autocompactantes es muy escasa, lo cual supone una oportunidad de estudio, al mismo tiempo que un reto, debido a la alta densidad de las partículas que deben recolocarse a medida que fluye el hormigón para, finalmente, mantenerse en suspensión, hasta que tiene lugar el fraguado del aglomerante hidráulico. El hormigón autocompactante representa el avance más importante en lo referente a la tecnología del hormigón de las últimas décadas. Eligiendo esta opción, se obtienen ventajas como: reducción en los tiempos de ejecución, ahorro energético al no requerir métodos externos de compactación, mejores acabados y mayor durabilidad. Si a estas ventajas se puede sumar la capacidad de reciclar residuos industriales sin penalizar las prestaciones, su valor se incrementaría desde el punto de vista de la sostenibilidad.

La existencia de una planta de fundición de hierro dúctil en el entorno de la ciudad de Santander, despertó el interés de estudiar la posibilidad del aprovechamiento de las escorias originadas en la etapa de fusión, tomando en consideración que la totalidad de las escorias producidas son transportadas al vertedero. El proceso se lleva a cabo en un cubilote de viento caliente, empleando coque como combustible para fundir la chatarra utilizada como materia prima y el resto de la carga. La etapa de oxidación en la fundición de hierro se realiza de manera continua, sucediendo lo mismo con el desescoriado del horno. Las escorias generadas en esta fase, se enfrían al aire rápidamente en capas finas, definiendo su estado final vítreo.

Debido a la carencia de estudios previos relacionados con el uso de la escoria de fundición dúctil (etapa de fusión) en la fabricación de morteros y hormigones y, al estar destinada en su totalidad a los vertederos de la región, se propone analizar la posibilidad de su aplicación en el sector de los materiales de construcción, además de confirmar que las características mecánicas de la escoria negra parecen adecuadas para incorporar este residuo como árido grueso en las mezclas.

En la presente Tesis Doctoral, se comprobará la viabilidad de hormigones autocompactantes de alta resistencia y baja permeabilidad fabricados a partir de escorias siderúrgicas, derivadas de la etapa de fusión de distintos procesos de fabricación, como esqueleto granular y como adición (filler). El éxito de la alternativa redundará en la disminución del vertido de materiales aprovechables y permitirá revelar el elevado potencial mecánico de estos subproductos metalúrgicos.

1.2 Objetivos

El presente trabajo de investigación tiene como principal objetivo el diseño de un hormigón autocompactante de alta resistencia y baja permeabilidad, empleando como componentes mayoritarios escorias siderúrgicas, tanto las escorias de horno eléctrico de arco generadas en el proceso de fabricación del acero, como las escorias vitrificadas resultantes de la fabricación de la fundición dúctil.

Los cometidos del hormigón confeccionado, se concretan en los siguientes puntos:

- Cumplir, en estado fresco, con las exigencias mínimas de estabilidad y fluidez (escurrimiento superior a 650 mm), así como de capacidad de paso y de relleno, al no existir bloqueo en la caja en L, empleando tres barras.
- En estado endurecido, exhibir una resistencia a compresión a los 28 días superior a los 100 MPa y demostrar ser duradero desde una visión constructiva.

Para alcanzar los objetivos establecidos, se han definido las siguientes líneas de trabajo:

- Revisión bibliográfica de la situación actual en lo referente a la utilización de las escorias siderúrgicas y de los hormigones autocompactantes que incorporan residuos.
- Definir una metodología de valorización de la escoria de fundición.
- Caracterizar las materias primas a utilizar en la fabricación de los hormigones autocompactantes con la finalidad de determinar en las propiedades de cada uno de los componentes y su influencia en el comportamiento de las mezclas.

- Ajustar las proporciones óptimas de las fracciones, finas y gruesas y de árido siderúrgico en la confección de hormigón, tomando como referencia una dosificación con áridos naturales.
- Estudiar la contribución del filler de escoria de cubilote en el comportamiento de mezclas de morteros y hormigones fluidos y compararla con otras adiciones utilizadas en la fabricación de hormigones autocompactantes.
- Testar las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones autocompactantes confeccionados con esqueletos de áridos de origen natural e industrial.
- Evaluar la durabilidad de los hormigones autocompactantes diseñados, con la finalidad de confirmar, junto con el resto de propiedades, la viabilidad de utilización de las escorias siderúrgicas como árido y adición del hormigón.

1.3 Estructura de la Tesis

La presente Tesis Doctoral está compuesta por seis capítulos. A continuación se resume el contenido de cada uno de ellos:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos

En el primer apartado, se presenta el tema objeto de la investigación, se recogen los objetivos y se definen las líneas de trabajo.

- Capítulo 2: Estado del arte

En el segundo capítulo, se realiza una revisión del estado del conocimiento acerca de las escorias siderúrgicas y de los hormigones autocompactantes, profundizando en sus componentes, el comportamiento tanto en estado fresco como endurecido y en investigaciones previas que incorporan residuos o subproductos industriales a las mezclas.

- Capítulo 3: Materiales y metodología experimental

El tercer capítulo es el más extenso del documento. En él, se abarcan los siguientes aspectos:

- Metodologías de caracterización de los materiales de origen natural e industrial, haciendo hincapié en las características químicas, mineralógicas y microestructurales de las escorias.
- Método de evaluación del comportamiento de morteros convencionales y fluidos incorporando escoria de cubilote tras someterse a un proceso de valorización.
- Se presentan los métodos de caracterización normalizados para el hormigón autocompactante en estado fresco y la caracterización en estado endurecido dividida en tres bloques: propiedades físicas, propiedades mecánicas y durabilidad.

- Capítulo 4: Resultados y análisis

En el Capítulo 4, se da a conocer la combinación de materiales, la metodología de dosificación y los ajustes realizados para obtener un hormigón autocompactante con escorias siderúrgicas, partiendo de un hormigón autocompactante con áridos naturales.

Igualmente, se presentan y analizan los resultados obtenidos en la fase experimental. La comparativa del comportamiento de los hormigones, se realiza tomando como referencia los hormigones con áridos naturales, fabricados por triplicado con distintas adiciones, con el fin de evaluar el efecto de la incorporación de árido siderúrgico como esqueleto del hormigón autocompactante y de la escoria de cubilote valorizada como adición.

- Capítulo 5: Conclusiones y futuras líneas de investigación

En el quinto apartado, se recogen las conclusiones finales extraídas tras los resultados de la totalidad del trabajo experimental. Adicionalmente, se proponen posibles líneas de investigación que pueden dar continuidad al uso de subproductos industriales.

- Capítulo 6: Bibliografía

En el último apartado, se enumeran las referencias bibliográficas consultadas, así como, también, las normativas aplicadas en la fase experimental.

La Figura 1.1 recoge un diagrama de flujo que resume las actividades descritas en este documento.

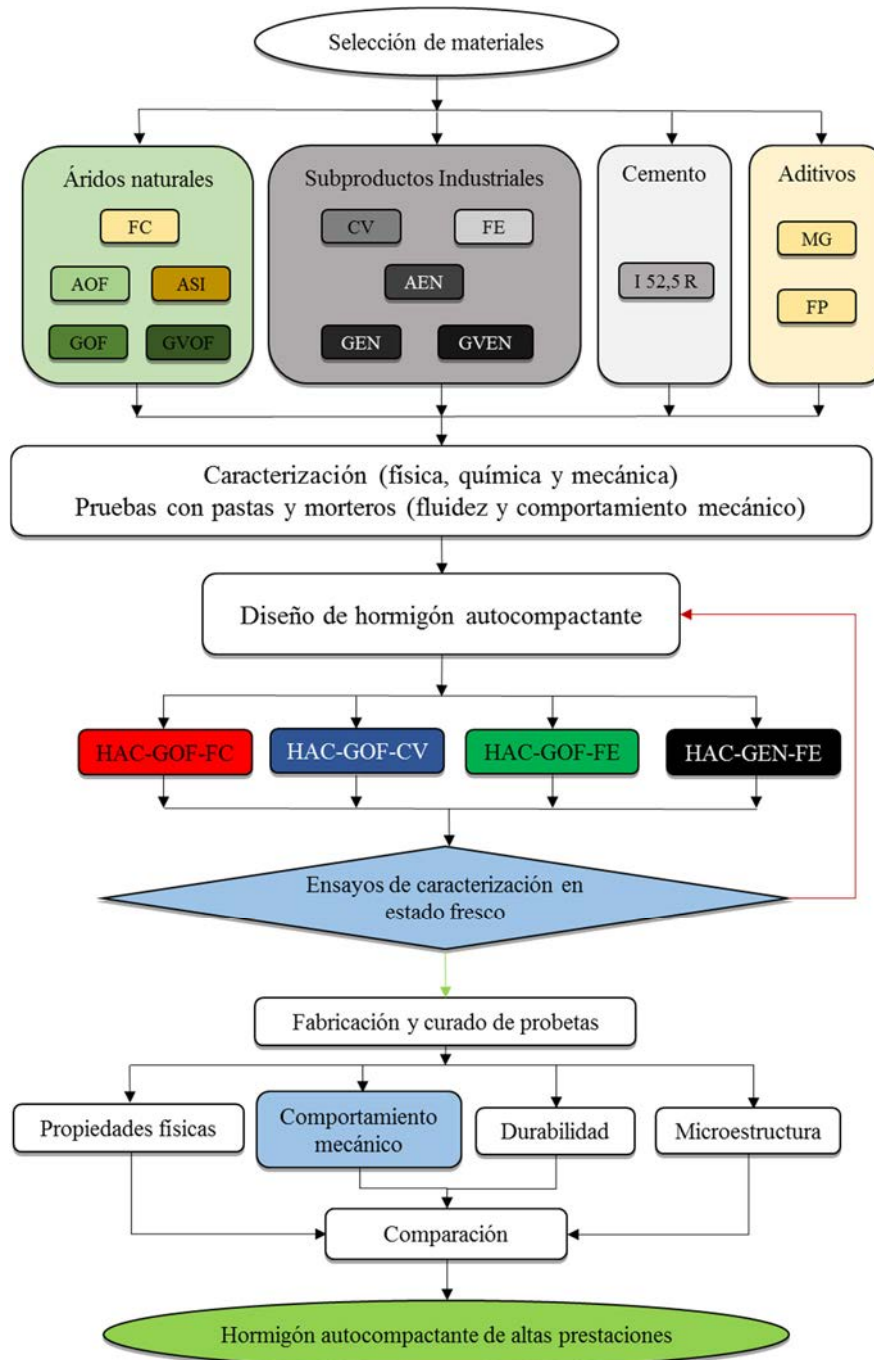


Figura 1.1 Líneas de trabajo desarrolladas en esta Tesis.

Capítulo 2 Estado del arte

2.1 Introducción

La fabricación de aceros y fundiciones a partir de minerales naturales, de prerreducidos o de chatarras, en sus distintos procesos industriales, conlleva, irremediablemente, la generación de diferentes residuos y subproductos. Incluso en los procesos de conformado, en los que el material metálico se somete a modificaciones que le proporcionan su geometría intermedia o final, se acumulan residuos, que se suman a la lista de subproductos de la industria siderúrgica.

En la Figura 2.1 se muestra un esquema de los cinco subproductos siderúrgicos con mayor tasa de generación, ordenados en función de la cantidad originada. Cada uno de estos residuos presenta una problemática particular de aprovechamiento o de rechazo.

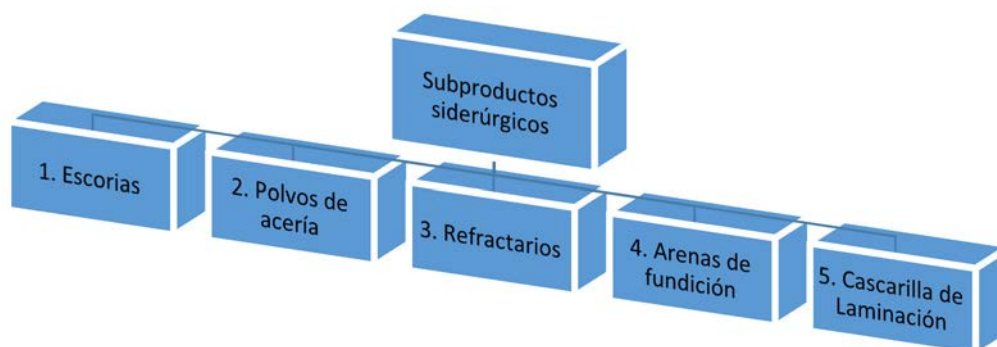


Figura 2.1. Principales subproductos generados en la industria siderúrgica [13].

El principal residuo generado en volumen, en los procesos de fabricación de las aleaciones férreas, lo constituyen las escorias obtenidas tras el enfriado y solidificación de las impurezas presentes. Éstas se pueden definir como el material que, debido a su densidad, flota sobre los caldos líquidos que constituyen dichas aleaciones. Dadas las ineludibles exigencias de sostenibilidad, las escorias se deben reutilizar en su mayor parte, lo que ha propiciado la realización de numerosos estudios de valorización, que han permitido acreditar su aptitud para diferentes usos en el sector de la ingeniería civil.

Así, las escorias se están utilizando como materia prima en la producción del cemento, en firmes de carreteras, como áridos para el hormigón o para mezclas bituminosas, sin olvidar otros usos menores, pero no por ello menos importantes, como, por ejemplo, en la conformación de piezas cerámicas, refractarios y vidrios reciclados [14].

Los polvos de acería son partículas finas arrastradas por el escape de los gases provenientes del horno eléctrico. Están compuestas, principalmente, por hierro, zinc y metales pesados como plomo y cadmio. Este residuo es considerado peligroso y se recicla en la propia acería. Su revalorización se realiza concentrando el material que, posteriormente, se emplea como materia prima en el proceso de fusión.

Los refractarios se utilizan como revestimiento del interior de las chapas o paneles tubulares que forman la coraza de los hornos, debido a su capacidad de resistir altas temperaturas. Con el uso, se van desgastando de manera irregular como resultado de los ataques químicos de la escoria que, en función del impacto que reciben, provocan roturas mecánicas. Están compuestos por ladrillos de magnesia, cromo o alúmina con un 20-30% de resinas o alquitrán. Tras ser retirados por un gestor de residuos, son seleccionados y triturados para la fabricación de nuevos ladrillos.

Las arenas de fundición, se generan en los moldes perdidos empleados para dar forma al producto final. Las más empleadas están constituidas por partículas de cuarzo mezcladas con aditivos que aportan cohesión a la mezcla. Las aplicaciones habituales de este residuo requieren de un tratamiento térmico para eliminar la presencia de resinas. Sus principales aplicaciones son de relleno en firmes de carretera, como materia prima en el proceso de

fabricación de clínker y para la elaboración de piezas cerámicas, destacando, también, su uso como materia prima en la industria del vidrio.

2.2 *Las escorias siderúrgicas*

La escoria siderúrgica se define como el producto resultante de las reacciones químicas entre la materia prima a fundir, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado de la aleación, que permanece flotando en la superficie de los caldos por la menor densidad que presenta respecto al metal líquido. Durante el proceso, se separa del caldo para, posteriormente, solidificar mediante enfriamiento [15].

Los desempeños de la escoria siderúrgica en los procesos de fabricación de los materiales férricos y de sus derivados, son los siguientes:

- Su disposición en la superficie de los caldos propicia la formación de una interfaz entre el metal líquido y la atmósfera próxima de contacto, garantizando la protección del horno frente a la atmosfera oxidante.
- Permite que el caldo se mantenga aislado térmicamente del ambiente, evitando la pérdida de calor e impidiendo un alto gradiente de temperatura en el metal líquido.
- Participa en el proceso de purificación y afinado del metal, favoreciendo reacciones químicas que mejoran sus características.

Las técnicas empleadas en el proceso de fabricación y los tratamientos aplicados posteriormente, afectan a la composición y aportan características particulares a las escorias. Éstos son parámetros determinantes para su futura valorización y aprovechamiento.

En la Figura 2.2, se presenta un esquema de clasificación de las escorias en función del producto buscado y, a su vez, del proceso metalúrgico empleado en la fabricación, lo cual refleja la variedad de escorias que pueden generarse.

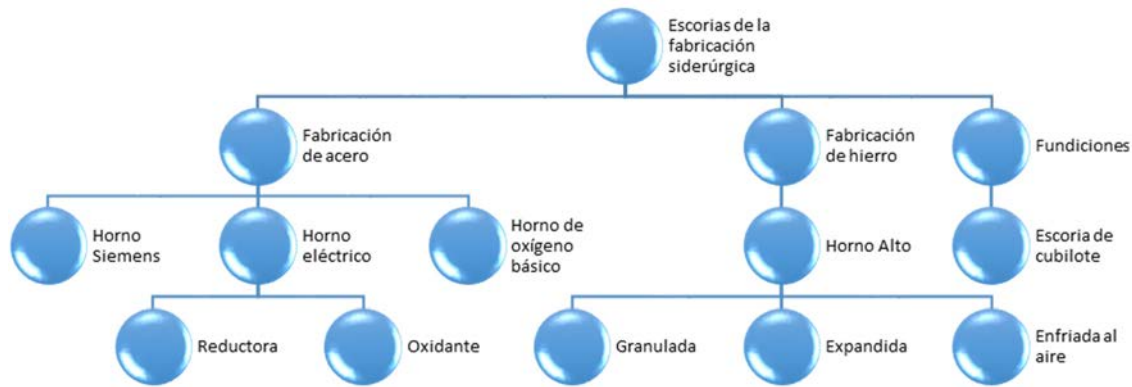


Figura 2.2. Principales subproductos generados en la industria siderúrgica [13].

Las escorias, tras generarse, según la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, se catalogan como “residuos de procesos térmicos” y, a la vista de los resultados de composición química obtenidos del test de lixiviados, pueden considerarse como valorizables o no. En caso de ser valorizables, es necesario determinar sus usos admisibles, someterlas a tratamientos que favorezcan su inertización y adjudicar su almacenamiento y comercialización a gestores autorizados que cuenten con instalaciones acondicionadas para estos fines. En caso contrario, las escorias no valorizables deberán ser controladas a través de su depósito en un vertedero debidamente autorizado.

Dentro del alcance experimental de esta Tesis Doctoral, se va a analizar, detalladamente, la aportación de dos tipos de escorias generadas en distintos hornos y durante la fabricación de dos productos diferentes:

1. Escorias de horno eléctrico de arco producidas en la elaboración de acero.
2. Escorias de cubilote, surgidas en la fabricación de fundición dúctil.

2.2.1 Normativa que afecta a la reutilización de las escorias

En este apartado, se presentan algunos fragmentos de la legislación española y autonómica de Cantabria, en lo que se refiere a las escorias siderúrgicas.

El contenido de la normativa española es análogo al de la normativa europea “**Directiva 2008/98 del Parlamento Europeo del consejo de 19 de noviembre de 2008**” [1], con la diferencia que se hace mención a los organismos responsables estatales.

- **Normativa estatal. Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados de 28 de julio de 2012 [2].**

Como consecuencia del incremento de los residuos que se generan en España y para adaptar las normativas españolas a las europeas, en el año 2011, se aprueba una ley sobre los residuos y los suelos contaminados que, en su preámbulo, manifiesta lo siguiente:

“En un contexto europeo en el que la producción de residuos se encuentra en continuo aumento y en el que la actividad económica vinculada a los residuos alcanza cada vez mayor importancia, tanto por su envergadura como por su repercusión directa en la sostenibilidad del modelo económico europeo”

Esta Directiva establece el marco jurídico de la Unión Europea para la gestión de los residuos, proporciona los mecanismos que permiten diferenciar la relación existente entre crecimiento económico y producción de residuos, haciendo especial hincapié en la prevención, definida como el conjunto de medidas adoptadas antes de que un producto se convierta en residuo, para reducir tanto la cantidad y contenido de las sustancias peligrosas, así como, también, los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente de los residuos generados. Incorpora el principio de jerarquía en la producción y gestión de residuos, que ha de centrarse en la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclaje u otras formas de valorización, incluida la valorización energética y aspira a transformar la Unión Europea en una sociedad del reciclado y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

En el artículo 3: Definiciones, se recogen una serie de conceptos que son necesarios para entender los términos y los procesos mencionados en el texto. A continuación, se presentan algunos de ellos:

- Residuo: cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar.
- Residuos industriales: residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre.
- Gestor de residuos: la persona o entidad, pública o privada, registrada mediante autorización o comunicación, que realice cualquiera de las operaciones que componen la gestión de los residuos, sea o no el productor de los mismos.
- Tratamiento: las operaciones de valorización o eliminación, incluida la preparación anterior a la valorización o eliminación.
- Valorización: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.
- Eliminación: cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía.

Posteriormente, el artículo 4: Subproducto, aclara que una sustancia u objeto resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, puede ser considerada como subproducto y no como residuo definido en el artículo 3, cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- a) que se tenga la seguridad de que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente;

- b) que la sustancia u objeto se pueda utilizar directamente sin tener que someterse a una transformación ulterior distinta de la práctica industrial habitual;
- c) que la sustancia u objeto se produzca como parte integrante de un proceso de producción, y
- d) que el uso ulterior cumpla todos los requisitos pertinentes relativos a los productos, así como a la protección de la salud humana y del medio ambiente, sin que produzca impactos generales adversos para la salud humana o el medio ambiente.

El artículo 5: Fin de la condición de residuo, establece que ciertos residuos, tras someterse a un proceso de valorización, pueden dejar de ser considerados como tales, siempre que se cumplan con las siguientes condiciones:

- a) que las sustancias u objetos resultantes se usen, habitualmente, para finalidades específicas;
- b) que exista un mercado o una demanda para dichas sustancias u objetos;
- c) que las sustancias u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para finalidades específicas, la legislación existente y las normas aplicables a los productos, y
- d) que el uso de la sustancia u objeto resultante no genere impactos adversos para el medio ambiente o la salud.

En el artículo 6: Clasificación y lista europea de residuos, la clasificación de los residuos se basa en el Catálogo Europeo de Residuos (CER) de la Decisión 2000/532/CE [16]. Los residuos incluidos en el CER de interés para esta investigación son:

- Residuos de la industria del hierro y del acero:
 - Residuos del tratamiento de escorias (10 02 01)
 - Escorias no tratadas (10 02 02)
- Residuos de la fundición de piezas férreas:
 - Escorias de horno (10 09 03)

En el Capítulo II, artículo 8: Jerarquía de residuos, se contempla un orden de prioridad en la gestión de los residuos:

Las administraciones competentes, en el desarrollo de las políticas y de la legislación en materia de prevención y gestión de residuos, aplicarán para conseguir el mejor resultado ambiental global, la jerarquía de residuos por el siguiente orden de prioridad:

- a) Prevención
- b) Preparación para la reutilización
- c) Reciclado
- d) Otro tipo de valorización, incluida la valorización energética
- e) Eliminación

De todo ello se deduce que la eliminación en vertedero es la última opción, y que se prioriza el esfuerzo en buscar usos que den una nueva vida o una segunda oportunidad a residuos transformados en lugar de ser depositados en vertedero sin ningún otro fin. En este sentido, el Título II, artículo 15: Programas de prevención de residuos, establece:

“Estas medidas se encaminarán a lograr la reducción del peso de los residuos producidos en 2020 en un 10% respecto a los generados en 2010”

Existen países productores generadores de un importante volumen de residuos que cuentan con una capacidad importante de reciclaje como Alemania, donde se reutilizan casi la totalidad de áridos siderúrgicos valorizados, Reino Unido y Francia, donde estas cifras alcanzan un 60% o como Japón que reutiliza un 50%. Esto solo es posible con una política de apoyos y promoción clara de las administraciones públicas a la reutilización de los residuos siderúrgicos valorizados y así lo hace constar la propia Ley en su artículo 16: Medidas e instrumentos económicos:

“Las administraciones publicas promoverán, en el marco de contratación de las compras públicas, el uso de productos reutilizables y de materiales fácilmente reciclables, así como de productos fabricados con materiales procedentes de residuos, cuya calidad cumpla con las especificaciones técnicas requeridas”

- **Normativa autonómica. Decreto 104/2006, de 19 de octubre de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria [5]**

En este decreto, se establece el régimen jurídico aplicable a la gestión de las escorias según los requerimientos medioambientales y los procedimientos administrativos para su valorización. Se describen, detalladamente, los procedimientos técnicos y legales, así como las obligaciones de los productores y gestores de residuos.

Textualmente: “El presente Decreto pretende responder fielmente al espíritu de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos que, en su artículo uno, concede atención prioritaria “al empleo de técnicas dirigidas a fomentar la reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización de residuos, como la mejor manera de prevenir la producción de los mismos y, todo ello, con la finalidad de proteger el medio ambiente y asegurar la salud de las personas”.

A mayor abundamiento, y confiriendo verdadera naturaleza de mandato imperativo al principio de prelación en la gestión de residuos, el apartado segundo del artículo 11 de la citada Ley 10/1998, de 21 de abril, establece, taxativamente, que todo residuo potencialmente reciclable o valorizable deberá ser destinado a estos fines, evitando su eliminación en todos los casos posibles. En este párrafo, se especifica la preferencia de darle un segundo uso a los materiales que no son peligrosos para el medio ambiente y que pueden ser aprovechables antes de ser vertidos.

Dentro del Decreto y unos párrafos más abajo, se hace referencia a la EHE-08 [7] y, en concreto, dice: “asimismo, la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE), en su artículo 28 indica que: Como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse arenas y gravas existentes en yacimientos naturales, rocas machacadas o escorias siderúrgicas enfriadas por aire...”

En el texto, se exigen una serie de ensayos y estudios encaminados a demostrar la efectividad de los áridos siderúrgicos en distintas utilidades posibles en obra como bases de explanada mejorada y subbases, en formación de subbalastos de vías ferroviarias, en la fabricación de mezclas bituminosas, incluso en sustitución de las ofitas, y en la fabricación de prefabricados de hormigón.

En el artículo 2 del Decreto: Definiciones, en lo que se refiere a la valorización de escorias, establece lo siguiente:

“Todo procedimiento aplicado, bien por el productor de la escoria, bien por un tercero, que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en las escorias y, específicamente, la obtención, a partir de las mismas, de materiales inorgánicos sustitutivos de los áridos naturales”

El propósito de este punto es intentar emplear los áridos siderúrgicos valorizados provenientes de escorias en lugar de tener que utilizar áridos extraídos de cantera, siempre que cumplan funciones idénticas en sus aplicaciones en carreteras y viales.

El artículo 3: Clasificación de las escorias, destaca que las escorias pueden clasificarse como valorizables o no según el resultado del test de lixiviación. Para ello, es necesario comparar los valores aportados tras el ensayo con las concentraciones de elementos químicos admitidas por el Decreto.

Adicionalmente, el artículo 7: Usos admisibles de las escorias negras valorizadas, contempla las siguientes opciones:

- 1.- En las carreteras y vías públicas o privadas de tráfico rodado de cualquiera de las siguientes capas estructurales de firme: capas de pavimento de mezcla bituminosa, base y explanada de apoyo.
- 2.- En obras de urbanización de áreas industriales y comerciales.
- 3.- Como árido de hormigón.

Finalmente, el Decreto incide en la necesidad de fomentar el uso de las escorias valorizadas por parte de las administraciones públicas:

“Con el fin de conseguir una racional y eficiente aplicación del presente Decreto, las Administraciones Públicas Cántabras adoptarán medidas tendentes a fomentar la utilización de las escorias en los usos autorizados a los que se refiere el apartado anterior”.

2.2.2 Producción de escorias en España

Para cuantificar la producción de escorias derivadas de la fabricación de acero en horno eléctrico de arco, se parte de la cantidad de acero que se produce en España y de su incidencia a nivel mundial.

Hoy en día en España existen 22 acerías. En una de ellas, se fabrica arrabio en un horno alto (siderurgia integral), mientras que en el resto se preparan distintos tipos de acero en hornos de arco eléctrico (ruta eléctrica). A pesar de que la gran mayoría están situadas en la cornisa cantábrica (Asturias, Cantabria y País Vasco) como puede observarse en la Figura 2.3, la industria del acero se encuentra distribuida en once comunidades autónomas.



Figura 2.3. Mapa de las acerías en el territorio Español (www.unesid.org).

A nivel mundial, esta tendencia es totalmente diferente, ya que la siderurgia integral lidera el sector productivo con más del 70%. Ahora bien, a pesar de que la ruta eléctrica es la que menos acero genera a nivel mundial, los datos del año 2014 de la World Steel Association indican que, en dicho año, la producción de acero en hornos eléctricos alcanzó 430.251 millones de toneladas, de los cuales España produjo 10.042 millones de toneladas (https://www.worldsteel.org).

En la Figura 2.4, se presenta la evolución durante los últimos 10 años en España (indicadores en rojo) y a nivel global (indicadores en azul), junto a la distribución en porcentaje a nivel mundial de la fabricación de acero en hornos eléctricos durante el año 2014.

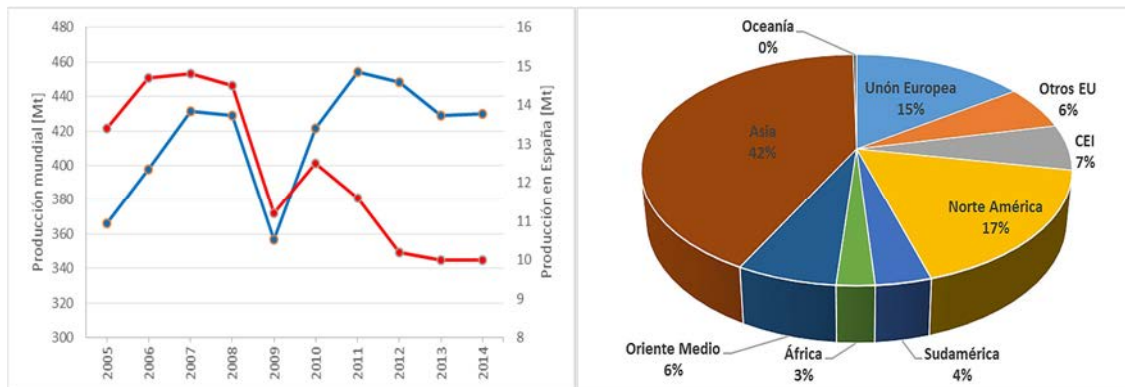


Figura 2.4. Historial de la producción de acero durante los últimos 10 años en España y el mundo (Izq.). Distribución de la producción a nivel mundial del año 2014 (Dcha.).

Considerando, de manera aproximada, que la proporción de escorias que se generan durante el proceso siderúrgico en el horno eléctrico por cada tonelada de acero fabricado en la etapa de fusión es de 110 a 150 kg/ton y en la etapa de afino es de 20 a 30 kg/ton, en el año 2014 en España resultaron 1.305.460 toneladas de escorias de fusión y 251.050 toneladas de escorias de afino. Determinando las cantidades a nivel mundial, se obtienen alrededor de 56 millones de toneladas de escorias de fusión y 10,7 millones de toneladas de escorias de afino.

2.2.3 La escoria de horno eléctrico de arco

La fabricación de aceros al carbono y de baja aleación, ha sufrido una reconversión a mediados del siglo XX, tras la sustitución progresiva del horno Martin-Siemens por el horno eléctrico de arco (HEA) [14]. El cambio se ha debido a la mayor eficiencia del segundo proceso basado, fundamentalmente, en dos factores: la reducción del ciclo de producción, pasando de 8 horas a 60 minutos y la disminución del consumo energético, resultando un tercio del anterior proceso.

La fabricación de aceros en el HEA se realiza en dos etapas, Figura 2.5. La primera, denominada metalurgia primaria o fusión, tiene lugar en el horno eléctrico. La segunda etapa, denominada metalurgia secundaria o afino, se lleva a cabo en el horno de cuchara. Por ello, a lo largo del proceso de fabricación del acero, se obtienen dos escorias con diferentes características, tanto físicas como químicas: las oxidantes (escorias negras), producidas en la fundición y oxidación de la colada en el horno eléctrico y las reductoras (escorias blancas) originadas en el afino de la colada en el horno de cuchara. En el caso de los aceros de alta aleación (inoxidables), el tratamiento final se realiza en el convertidor Argón Oxígeno Decarburación-Vacuum Oxígeno Decarburación (AOD/VOD).

El acero fabricado en el HEA se obtiene utilizando como materia prima chatarra de acero, añadiendo pequeñas cantidades de mineral de hierro, prerreducidos, ferroaleaciones, cal, espatofluor, coque y oxígeno.

Se denomina chatarra al conjunto de piezas que han finalizado su vida útil, bien sea por desgaste, ataque químico u otros factores. Su contenido en hierro está en torno al 20%. Debido a la capacidad de poder reciclarlo, las piezas se funden y son tratadas químicamente mediante distintos procesos para ser aprovechadas como materia prima.

El control de calidad de la chatarra resulta esencial en el proceso. Antes de cargar el horno, la misma se clasifica cuidadosamente. Para ello, se almacena en distintos depósitos con la finalidad de fijar la aportación de elementos no oxidables tales como níquel, molibdeno y cromo.

La chatarra que se recicla debe cumplir una serie de requerimientos de seguridad. No debe contener elementos que puedan producir explosiones (depósitos cerrados), ni materiales peligrosos e inflamables y ha de estar libre de contaminación radioactiva y de elementos estériles.

Además de la chatarra, el HEA se carga con ferroaleaciones o prerreducidos (hierros de reducción directa) con el propósito de cubrir la insuficiencia de la chatarra. Los prerreducidos son pellets pequeños y uniformes de composición química conocida y constante, que facilitan la carga continua en el HEA. Su empleo supone el aumento de fundentes, por presentar impurezas residuales no metálicas, y de refractarios, al demandar mayor potencia y un arco más largo.

Los HEA suelen ser cilíndricos, su interior se protege con ladrillos refractarios y cuentan con una bóveda por donde se introducen las cargas, una compuerta para operar durante la etapa de fusión y, al mismo tiempo, para retirar las escorias y una piqueta en el lado opuesto o lateral para verter el acero líquido.

Como se comenta en el apartado siguiente, la oxidación, desfosforación y formación de la escoria forman parte del proceso de fusión en el que se obtiene, por un lado, un líquido fundido a muy alta temperatura y, por otro, una escoria básica que flota sobre su superficie. La reacción oxidante tiene como finalidad eliminar las impurezas de manganeso y silicio, oxidar el fósforo (la desfosforación) y la formación de la escoria básica para acumular todas las impurezas de la colada [15].

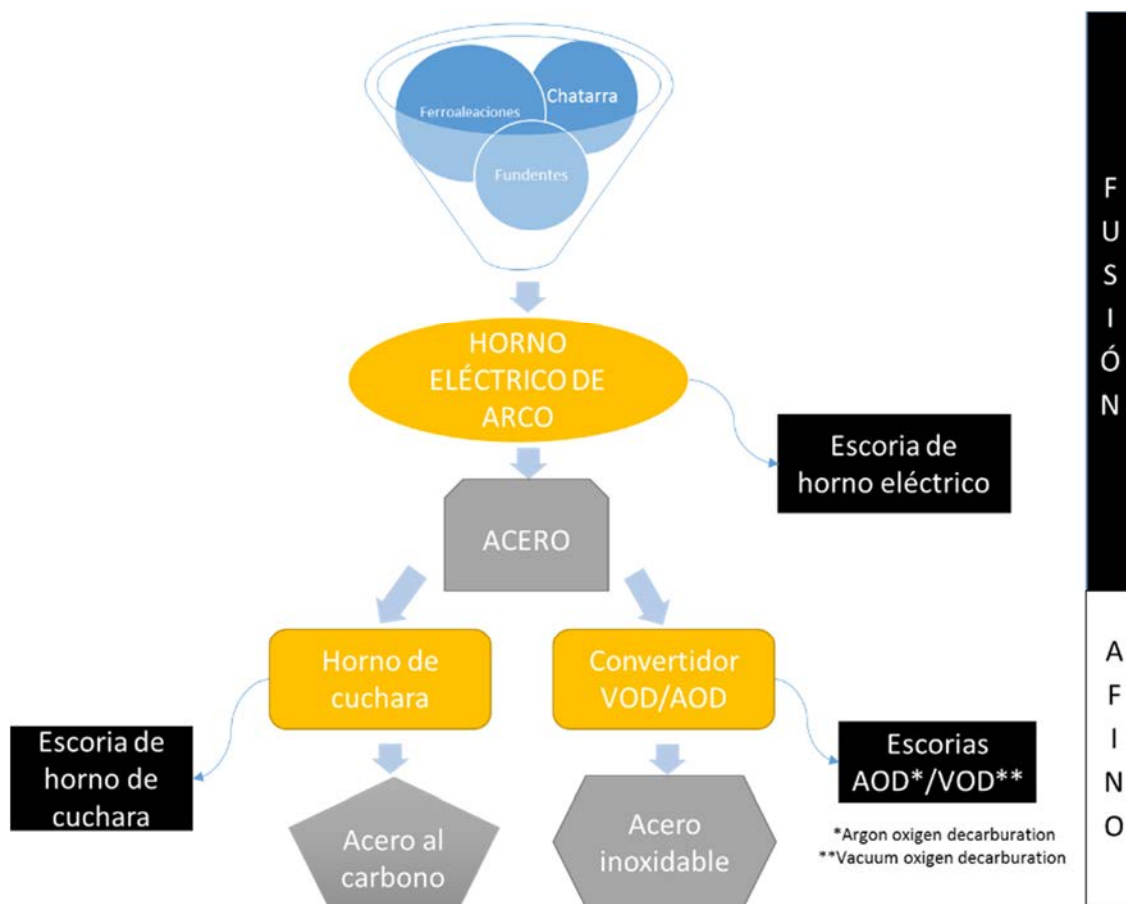


Figura 2.5. Esquema de producción de acero en el horno eléctrico de arco.

2.2.3.1 Proceso de la formación de la escoria de arco eléctrico

Tras introducir la materia prima por la bóveda, se cierra el horno y se hace saltar el arco eléctrico. La energía requerida para la fusión de las cargas es corriente eléctrica alterna trifásica que genera entre tres electrodos de grafito el arco eléctrico, Figura 2.6. La materia prima funde en pocos minutos debido a las altas intensidades del arco. Durante el proceso, se generan saltos entre los electrodos y la chatarra, debido a los espacios vacíos que se crean al fundir algunas piezas antes que otras.

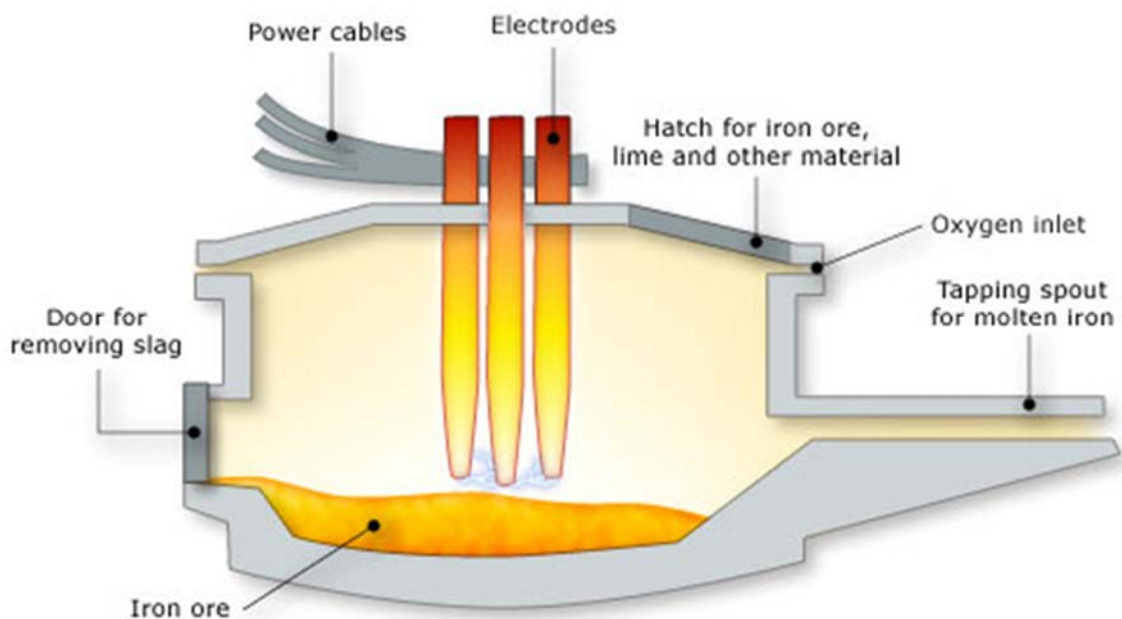


Figura 2.6. Esquema general del HEA (www.teara.govt.nz).

Una vez que el metal está fundido y el funcionamiento del horno se ha estabilizado, se inyecta oxígeno mediante un sistema de lanzas y se añaden fundentes que aportan cal, magnesio, sílice y aluminio que, tras oxidarse, forman la escoria que se presenta flotando en la superficie para proteger el acero líquido y el revestimiento refractario. Esta fase se denomina fase oxidante.

La alimentación de oxígeno (O_2) al horno provoca la oxidación del hierro (Fe) contenido en la chatarra para formar óxido de hierro y de calcio (FeO y CaO). A continuación, el óxido de hierro (FeO) oxida al silicio y al manganeso (SiO_2 y MnO), liberando al hierro. Estos óxidos, junto con el del hierro remanente, pasan a formar parte de la escoria.

Las reacciones de oxidación mencionadas son exotérmicas y producen un aumento brusco de la temperatura, lo cual minimiza el consumo energético. Una vez que se ha oxidado todo el silicio y gran parte del manganeso, la temperatura del metal fundido ronda los 1600 °C.

Debido a una presencia importante de FeO, se adiciona carbón en polvo que, al reaccionar con éste, libera el hierro y forma monóxido de carbono (CO). En esta etapa, se homogeniza la composición y temperatura del baño, debido a la eliminación del monóxido de carbono del baño en forma de gas.

El paso de las burbujas de monóxido de carbono a través de la escoria, genera una característica muy particular que es su espumación, facilitando la penetración de los electrodos e incrementando la eficiencia energética del horno. Así mismo, la presencia de cal en la escoria garantiza la eliminación del fósforo del líquido, proceso conocido como desfosforación.

Tras finalizar la etapa oxidante, se extrae la escoria, basculando el horno y rastrillándola hacia fuera. Una vez enfriada su aspecto es poroso, de color oscuro y su morfología es irregular y angulosa, Figura 2.7. El color oscuro característico hace que, a estos residuos, se los conozca con el nombre de escorias negras.



Figura 2.7. Aspecto de la escoria de horno eléctrico de arco enfriada.

Posteriormente, se inicia la fase de afino del acero obtenido, en la que se agregan fundentes y coque para formar carburo de calcio (CaC_2) y que generan unas condiciones reductoras, permitiendo reacciones de desulfuración y reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño. Esta fase se denomina desoxidación. Al finalizar la metalurgia secundaria, se obtiene una escoria de color blanco, con un contenido de óxidos de hierro muy bajo o nulo. En esta Tesis no se profundiza acerca de la reutilización de las escorias blancas. No obstante, existen numerosos estudios de este subproducto industrial que avalan sus aplicaciones en el sector de la construcción [17-20]. Cabe destacar que la escoria negra se genera en una proporción 80/20 frente a la escoria blanca.

2.2.3.2 Enfriamiento y transformación

Como se ha mencionado anteriormente, la escoria forma una capa en flotación sobre el acero líquido que aglutina los productos de afino del acero. La misma, se retira del horno en estado incandescente para ser transformada, dentro de la propia acería, por un gestor de residuos.

De acuerdo con el Decreto 104/2006 de 19 de octubre de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria, las instalaciones necesarias para la valorización de este tipo de residuos como árido siderúrgico, deben contar con las siguientes condiciones de diseño:

- Vías de circulación pavimentadas y dimensionadas por número y carga de vehículos.
- Zonas de almacenaje pavimentadas acorde con el paso de vehículos (pavimentado).
- Diseño adecuado de zonas de maniobras y de parking.
- Diseño adecuado para conducción de aguas pluviales.
- Balsa de decantación.
- Instalaciones limpias y acondicionadas.
- Medidas preventivas para minimizar la emisiones de polvo y ruido.

Ajustándose a estas exigencias, a continuación, se describe el proceso de transformación de la escoria de horno eléctrico de la acería GSW de Santander en árido siderúrgico.

La escoria de fusión, tras ser retirada de la colada, Figura 2.8, se transporta desde el foso de desescoriado a un tanque de enfriamiento rápido, donde se descarga, primeramente, sobre una playa formada por escorias anteriormente vertidas, Figura 2.9. Con esta operación, se pretende que el enfriamiento inicial se produzca por encima del nivel del agua del tanque, Figura 2.10, evitando que el material basculado en estado incandescente entre directamente en contacto con el agua, lo que provocaría explosiones y proyecciones de escoria a gran velocidad y distancia por la diferencia térmica de los dos medios.



Figura 2.8. Transporte de las escorias tras ser retiradas de la colada.



Figura 2.9. Vuelco del camión en la zona de enfriamiento.



Figura 2.10. *Enfriamiento de las escorias sobre el nivel del agua.*

Una vez depositadas las escorias en la playa, se refrigeran durante media hora con potentes cañones de agua tomada del propio tanque de enfriamiento, mediante un circuito cerrado. Una vez se ha completado este primer ciclo de atemperamiento, las escorias se pueden manipular por medios mecánicos, permitiendo introducirlas en el interior del tanque, de 70 cm de profundidad, mediante palas retroexcavadoras, que facilitan la distribución del material en la mencionada piscina. En esta disposición se mantienen durante al menos dos horas, para que terminen de enfriar.

El proceso descrito conduce a una fracturación moderada de las escorias, generando partículas de tamaños menores a 400 mm. Esto permite realizar la recuperación de elementos metálicos que se han separado de las escorias durante la partición y facilita la devolución de las raspas metálicas de acero al horno para ser refundidas. Para ello, se dispone de una criba que rechaza los elementos de tamaños superiores a 150 mm, Figura 2.11, tanto de escorias como de partes metálicas. Las partículas que pasan por la criba, se procesan en el interior de la misma, fracturándose mediante vibración y se depositan en una cinta transportadora provista de un imán permanente que permite eliminar las pequeñas raspas metálicas que pudieran contener.



Figura 2.11. Precriba de la escoria.

A continuación, la escoria, exenta de partes metálicas, se acopia en pilas que son cargadas según su destino, Figura 2.12.



Figura 2.12. Acopio de la escoria.

Para su valorización como árido, el material se procesa en una planta trituradora móvil dotada de una machacadora de mandíbulas. El producto triturado alimenta la cinta de una cribadora que proporciona la granulometría adecuada para su empleo en el sector de la construcción (el tamaño final de las partículas depende de la luz de las mallas que se instalen en la cribadora), Figura 2.13.



Figura 2.13. Cribado de la escoria y acopio del árido siderúrgico.

2.2.3.3 Envejecimiento de la escoria

La utilización de la escoria no puede ser inmediata, debido a las variaciones de volumen de ciertos componentes en estado activo, lo cual puede afectar negativamente a los procesos y al resultado de su utilización. Frías, Sánchez y Uría del Instituto Eduardo Torroja estudiaron estos fenómenos expansivos, asociándolos a la presencia de cal libre, magnesia libre, cloruros y sulfatos [21].

El método más económico para estabilizar los procesos expansivos y asegurar la inertización de la escoria consiste en la exposición continuada a la intemperie durante un amplio lapso de tiempo, que estará condicionado por las condiciones climatológicas durante el periodo de exposición.

En zonas con baja pluviosidad, se recomienda el riego por aspersion de las escorias para asegurar la hidratación de los componentes inestables.

Para facilitar su contacto con la intemperie, es necesario remover los acopios con el fin de evitar que la hidratación solamente se complete en la capa superior del material almacenado (aproximadamente 20 cm).

El tiempo que requiere la escoria para estabilizarse se sitúa entre los 30 y los 90 días. Concretamente, el catálogo de residuos del CEDEX [8] establece que la inertización se hace efectiva a partir de los 45 días. Para comprobar dicha estabilización, la norma NLT-361-91 [22] describe el procedimiento para determinar el grado de envejecimiento (IGE) que, en el caso de ser empleada como árido de carreteras, debe ser inferior al 1%.

2.2.3.4 Características de las escorias de horno eléctrico

2.2.3.4.1 Caracterización química

La composición química de las escorias negras es muy variable debido a distintos factores como la materia prima empleada, los factores termodinámicos del proceso metalúrgico, el producto objeto de fabricación y el posterior tratamiento de las mismas.

Los porcentajes recogidos en la Tabla 2.1 son rangos representativos de la composición química de las escorias producidas en España.

Tabla 2.1. Composición química de las escorias en España (fuente:www.cedex.es).

<i>Composición química</i>	<i>Rango [% peso]</i>	<i>Valor medio [% peso]</i>
<i>FeO</i>	7,0-35,0	25
<i>Fe₂O₃</i>	11,0-40,0	25
<i>CaO</i>	23,0-32,0	25
<i>CaO libre</i>	0-4,0	2
<i>SiO₂</i>	8,0-15,0	11
<i>Al₂O₃</i>	3,5-7,0	5
<i>MgO</i>	4,8-6,6	5
<i>MnO</i>	2,5-4,5	4

El rango de basicidad de la escoria negra, obtenida de la relación CaO/SiO_2 , suele estar entre 1,5 y 2. Éste es un parámetro que debe ser controlado rigurosamente para evitar el ataque químico excesivo del refractario y la correcta espumación de la escoria [14].

La escoria negra se compone, mayoritariamente, de óxidos de hierro (FeO , Fe_2O_3) y silicatos cálcicos (bicálcico y tricálcico). La presencia abundante de silicato bicálcico se debe a su formación en el baño a elevadas temperaturas, así como durante la descomposición del silicato tricálcico en silicato bicálcico y cal libre durante el enfriamiento.

La presencia de cal libre suele ser muy pequeña, sin embargo, la magnesia libre se presenta en proporciones próximas al 5%. Parte de la magnesia se combina con otros componentes, bien sean férricos, silicatos o aluminatos y el resto se presenta como magnesia libre amorfa (no hidratable) o cristalina (periclasa).

El contenido de periclasa en las escorias supone un riesgo de expansión potencial, al ser el proceso de transformación en brucita, tras hidratarse, lento e incluso diferido en el tiempo, lo que pone en riesgo su estabilidad dimensional.

El hierro contenido en la escoria se presenta en sus distintos estados de oxidación como son: Wustita, Hematita y Magnetita. Su presencia es indispensable para la formación de la escoria espumosa, no obstante, a mayor proporción de óxido ferroso en la escoria, menor cantidad de acero producido. El contenido de hierro se refleja en la alta densidad de las escorias ($D_a = 3,2-3,9 \text{ g/cm}^3$), así como en su alta resistencia al desgaste y a la abrasión.

Además de elementos indeseables como la cal libre y la magnesia, existe preocupación por la presencia de metales pesados en las escorias de acería eléctrica. Así, el contenido de cromo proveniente de la chatarra que se oxida durante el soplado del baño, a pesar de presentarse en pequeñas proporciones (en torno al 0,3%), puede producir problemas medioambientales debido al lixiviado de cromo hexavalente en las zonas de acopio de escorias.

2.2.3.4.2 Características físicas y propiedades mecánicas

A pesar de la presencia de elementos potencialmente problemáticos, la escoria de horno eléctrico es un material que exhibe importantes prestaciones, lo cual ha motivado su empleo en el sector de la ingeniería civil.

En la Tabla 2.2, se recogen los rangos de algunas propiedades físicas y mecánicas de este material tras su transformación en árido siderúrgico.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas (fuente:www.cedex.es).

<i>Característica</i>	<i>Rango</i>
<i>Desgaste de Los Ángeles [% peso]</i>	<i>17-25</i>
<i>Coefficiente de pulimento acelerado</i>	<i>0,5-0,6</i>
<i>Absorción de agua [% volumen]</i>	<i>1-4</i>
<i>Densidad relativa [g/cm³]</i>	<i>3,1-4,5</i>

Para su empleo como árido siderúrgico destacan estas características [23]:

- El árido es limpio, con ausencia de finos o plásticos y con elevado equivalente de arena.
- Presentan buena forma, angulosa y rugosa, y bajos índices de lajas y agujas.
- Valores de densidad superiores a los de los áridos naturales. Este es un factor a tener en cuenta para su transporte y dosificación.
- Su porosidad accesible y absorción es elevada, lo cual afecta a la demanda de agua de amasado a la hora de dosificar el hormigón y puede influir en la resistencia de éste frente a los ciclos de humedad-sequedad o hielo-deshielo.
- La capacidad de retención del calor es superior a la de los áridos naturales, así como, su conductividad eléctrica.
- Son áridos muy resistentes a la fragmentación y al desgaste, si bien, como se ha puesto de manifiesto anteriormente, el método de enfriamiento influye en su comportamiento mecánico.

Profundizando en este último punto, relativo a la importancia de la velocidad de enfriamiento, lo cual determina las propiedades físicas y mecánicas del producto final, cabe señalar [14]:

- Para obtener mejores propiedades mecánicas es preferible realizar un enfriamiento lento, resultando un material más compacto. En este caso, es recomendable realizar el enfriamiento en un cono de fundición que se coloca debajo de la piquera del horno eléctrico.
- Tras un enfriamiento rápido, el resultado es un material más poroso y menos resistente. El método más empleado y descrito en el apartado 2.2.3.2, se realiza rociando la escoria con cañones de agua.

2.2.3.4.3 Granulometría de la escoria tras ser procesada

Tras el machaqueo y cribado de las escorias negras inertizadas, las granulometrías conseguidas arrojan como resultado que, las fracciones gruesas (tamaño máximo de 25 mm), pueden ajustarse perfectamente a los requerimientos exigidos para la fabricación de hormigón en las normas ASTM C33 [24] y UNE-EN 12620 [25].

En cambio, el árido fino obtenido no presenta una distribución adecuada de partículas pequeñas. En las arenas de escorias negras existe un déficit importante de tamaños de partículas que pasan por los tamices menores de la serie española. Por ello, la fabricación de morteros y hormigones con arena de escorias negras conlleva dosificar combinándolas, bien con arena natural, bien con filler inerte [13,26].

2.2.3.4.4 Estabilidad volumétrica

Como se ha descrito en el apartado 2.2.3.4.1, en la composición de las escorias están presentes compuestos expansivos, que pueden ser perjudiciales en sus distintas aplicaciones. El método más efectivo para inertizarlos, es el envejecimiento mediante ciclos de humedad-sequedad, bien sea por regado o exposición a la intemperie. Previo a su utilización, se debe realizar un ensayo de expansividad, con el fin de comprobar la estabilidad dimensional de las escorias.

Los compuestos o procesos expansivos presentes en la escoria negra son, según Manso [13]:

1. Conversión de fases del silicato bicálcico.
2. Cal libre (CaO).
3. Magnesia o periclasa (MgO).
4. Proceso de oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} .

1. Conversión de fases del silicato bicálcico

Durante el enfriamiento, la escoria presenta un problema inicial de inestabilidad volumétrica debido al cambio en la estructura del silicato bicálcico. Entre los 500 °C y 400 °C, el cambio de fase beta (β) a gamma (γ) incrementa el volumen en al menos un 10%, fracturando el macizo de escoria.

En algunos casos, el cambio de fase no es completo. Sin embargo, esto no supone un riesgo para el aprovechamiento del material enfriado, al no producirse nuevas transformaciones debido a la presencia de fósforo derivado del proceso de desfosforación del acero que estabiliza al silicato beta, inhibiendo su transformación.

2. Cal libre (CaO)

La basicidad de las escorias negras, se debe a los altos contenidos de CaO, la cual se añade en cantidades importantes por ser indispensable para fabricar aceros al carbono.

La cal se presenta en las escorias enfriadas en forma de silicatos bi y tri-cálcicos (C_2S y C_3S), así como de ferritos y aluminatos. Adicionalmente, puede aparecer sin combinarse en forma de cal libre ($\text{CaO}_{\text{libre}}$), al descomponerse el silicato tricálcico en silicato bicálcico o como cal residual no disuelta durante el baño.

La cal libre primaria corresponde a la cal no combinada en la etapa de fusión quedando en suspensión. Genera problemas de expansividad al hidratarse formando hidróxido cálcico o cal apagada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A continuación, el hidróxido cálcico reacciona con el CO_2 presente en la atmósfera, dando como resultado carbonato cálcico, CaCO_3 .

El efecto de la expansividad de la cal está condicionado por la porosidad de las escorias, puesto que los poros y cavidades existentes posibilitan la hidratación de una mayor proporción de la misma. El hinchamiento crea un efecto cuña en la zona que rodea los nódulos de cal, ocasionando tensiones internas que conducen a la fracturación de las partículas.

3. *Magnesia o periclasa (MgO)*

Los óxidos de magnesio no ligados químicamente presentes en la escoria en forma cristalizada (periclasa) y los compuestos con más del 70% en peso de MgO, como es el caso de las wustitas de magnesio (Fe_2MgO), conforman la magnesia libre. Al igual que la cal libre, la fase hidratada del MgO libre requiere de mayor volumen, influyendo negativamente en la estabilidad volumétrica de las partículas.

En comparación con la cal libre, la hidratación del MgO ocurre de manera más lenta e incluso diferida en el tiempo. La fase más reactiva es la periclasa y, en menor proporción, la wustita de magnesio que puede ser imperceptible al estar contenida dentro de la fracción vítrea.

Según Vázquez y Barra [27] la presencia conjunta de CaO y MgO es la causa principal de los problemas de inestabilidad de las escorias, si bien, en algunos casos, el problema depende exclusivamente del contenido de MgO.

4. *Proceso de oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+}*

La escoria negra contiene concentraciones de hierro que, en la mayoría de los casos, se manifiesta en forma de óxidos estables.

No obstante, algunas escorias pueden presentar un aspecto granulado y/o una morfología laminar. Esta condición se debe a la transformación por oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} , que conlleva un aumento de volumen y que genera la partición de las partículas de escoria, apareciendo como escamas o granos de pequeño tamaño.

Es por ello, que conocidos los procesos que afectan a la estabilidad volumétrica, es indispensable evaluar su expansión antes de ser utilizadas.

2.2.3.5 Experiencias en la utilización de las escorias negras

Las escorias negras han sido objeto de investigación durante décadas. Los resultados publicados por diferentes autores han permitido validar distintas aplicaciones, no obstante, aún no están incluidas dentro de las normativas actuales, lo cual limita su libre utilización.

Las aplicaciones de las escorias negras dependen del tipo de acero fabricado: acero al carbono (EAF C) o acero inoxidable (EAF S). Según EUROSLAG, sus principales alternativas de valorización son: su utilización como árido en el sector de la construcción y como materia prima en la fabricación de cemento (clínker), lana de roca y vidrio (combinada con otros elementos).

En el sector de la construcción, los estudios han demostrado su aptitud para los siguientes usos:

- Utilización en la capa de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa.
- Como material para explanadas, subbases y bases de carreteras.
- Como árido para hormigón.

Debido al alcance experimental de esta Tesis, el estudio bibliográfico se centra en su uso en hormigones:

Manso, Polanco, Losañez y González [11] demostraron mediante ensayos mecánicos y de durabilidad, la posibilidad de fabricar hormigón con distintas fracciones de escorias negras, haciendo hincapié en los siguientes aspectos:

- Debido al bajo contenido de finos en la arena de escoria, para el ajuste granulométrico de la fracción fina fue necesario añadir filler mineral.
- A causa de las posibles reacciones expansivas, es importante verificar la eficiencia de los tratamientos de estabilización.
- El uso de escorias no afecta las propiedades mecánicas del hormigón, sin embargo, disminuye la durabilidad del mismo, siendo más vulnerable a las heladas.

Pelegrino et al. [28] fabricaron cinco dosificaciones de hormigón, sustituyendo de manera parcial o total las fracciones fina y gruesa el árido natural por escorias negras, siguiendo la distribución de Fuller. Realizaron una caracterización microestructural, mecánica y de durabilidad de los hormigones que les permitieron concluir:

- El uso de las escorias afecta negativamente la trabajabilidad de las mezclas cuando el porcentaje de sustitución es superior al 50%. Esto se manifiesta aún más en las arenas; se recomienda limitar este porcentaje.
- El uso de escorias aumenta la densidad del hormigón. La fracción gruesa de las escorias contribuye al incremento de la resistencia a compresión y a tracción indirecta, además del módulo de elasticidad. En cambio, la sustitución total del árido fino ocasiona la disminución de la resistencia a compresión.
- La durabilidad determinada por ciclos humedad-sequedad del hormigón con escorias es ligeramente inferior al compararse con el hormigón tradicional.

La microestructura del hormigón con sustitución total de ambas fracciones presentaba menos microporos en su estructura lo cual puede afectar su respuesta frente a efectos expansivos y al comportamiento mecánico.

Abu Eishah et al. [29] estudiaron el efecto de las escorias negras como árido grueso en el hormigón. Fabricaron cinco tipos de hormigón de distintas clases resistentes (30, 50 y 70 MPa), empleando en tres distintas dosificaciones de cemento portland y en otras dos adiciones de cenizas volantes o humo de sílice como sustituto del cemento. Debido a la discontinuidad de la granulometría que presentaba la escoria, fue necesario añadir gravilla y arenas naturales. Los resultados permiten concluir la aptitud de las escorias negras para fabricar hormigones de alta resistencia con la trabajabilidad adecuada para ser bombeados.

Arribas I. et al. [10] analizaron dos tipos de hormigón con dos escorias de horno eléctrico de distinta procedencia. En el microscopio electrónico de barrido observaron que la zona de transición pasta-árido de los hormigones con escoria presenta mejores propiedades mecánicas y menor porosidad que la mezcla de hormigón con árido natural.

2.2.4 La escoria de cubilote

El horno de cubilote consiste en una coraza cilíndrica de acero revestida con material refractario y equipado con una caja de viento y toberas para la admisión de aire, Figura 2.14. La carga empleada se compone, mayoritariamente, de metal (chatarra, lingotes y retornos), coque, ferrosilicio y fundentes como caliza o dolomía que aportan el carbono necesario, facilitan la fusión y permiten disminuir la acidez de los óxidos del cubilote. Ocasionalmente se añaden pequeñas cantidades de espato-flúor limitado por su elevado coste o por el desgaste que genera en el refractario. Estos materiales se incorporan al horno a través del tragante situado en la parte superior de la zona de fusión.

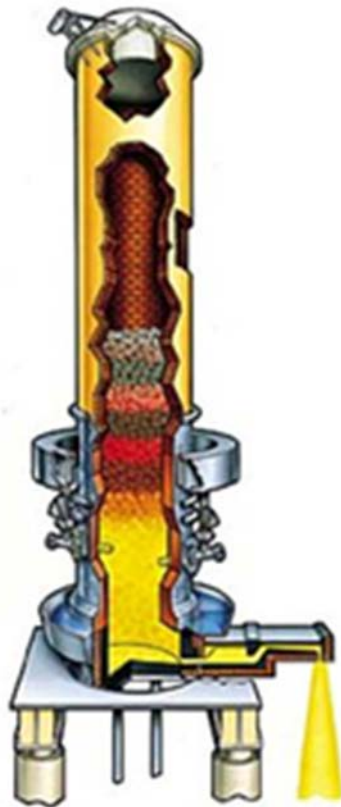


Figura 2.14. Interior del horno de cubilote (pelandintecno.blogspot.com.es).

La temperatura de fusión del cubilote ronda los 1600 °C. Para optimizar el proceso, se genera aire caliente impulsado mediante ventiladores y se introduce mediante toberas ubicadas en la zona inferior del cubilote. Los gases calientes generados en la parte baja del cubilote ascienden y precalientan la carga durante su descenso. Este tipo de hornos se denomina de viento caliente.

Una vez que la carga precalentada desciende a la zona de combustión el metal se funde por las altas temperaturas y el coque comienza a quemarse ante la presencia de oxígeno inyectado de manera continua. El metal fundido comienza a gotear a través de la capa de coque y se acumula en el fondo del cubilote, debajo de la zona de combustión.

En el fondo se sitúa una piqueta por la que, una vez que el caldo acumulado alcanza una determinada altura, se retira la colada por un canal hasta una cuchara para pasar a la siguiente etapa del proceso metalúrgico.

A una altura ligeramente superior a la piqueta de vertido se encuentra otra piqueta para retirar la escoria en la parte posterior del cubilote. Esta abertura se ubica debajo de las toberas para evitar un posible enfriamiento de la escoria, provocado por la corriente de aire.

Al igual que en el proceso descrito para la EAF, en la fábrica del Grupo Saint-Gobain PAM, ubicada en Nueva Montaña, la separación de la escoria y el metal líquido es posible por la diferencia de densidad entre el metal y la escoria. Ésta, tras ser extraída del baño, se recoge de forma discontinua en una cinta transportadora dotada con bandejas, Figura 2.15 (Izq.). Debido al pequeño espesor de la escoria depositada, su enfriamiento ocurre de forma rápida. Finalmente se deposita, por gravedad, en pequeños acopios, Figura 2.15 (Dcha.).



Figura 2.15. *Transporte y enfriamiento de la escoria del cubilote en bandejas (Izq.) y detalle del acopio en la planta (Dcha.).*

Tras retirar la escoria, se procede a reducir el contenido de azufre de la fundición. La desulfuración se realiza con carburo de calcio en la producción de hierro dúctil. En esta etapa del proceso, la escoria generada puede ser clasificada como un residuo con cierto potencial hidráulico.

2.2.4.1 Producción de escorias de horno de cubilote

El sector de fundición de hierro, a nivel mundial, alcanzó una producción de 74,5 millones de toneladas en el año 2014. Del total de la producción global, el 64% corresponde a fundición gris, el 34% a fundición dúctil y el 2% a fundición maleable. (www.afsinc.org). Desafortunadamente, no se especifican los hornos empleados para la producción de las distintas fundiciones de hierro, no obstante, en este sector se emplean, fundamentalmente, hornos de cubilote.

En los últimos años, el sector de la fundición ha obtenido balances positivos con pequeños incrementos anuales, por ejemplo, la producción del año 2014 resultó un 2,3% mayor comparada con la producción del año 2013.

Los países que lideraron el sector en el año 2014 fueron: China, India, Rusia, U.S.A, Alemania, Japón, Brasil y Corea.

En España, se generaron 796.400 toneladas de fundición de hierro en el año 2014. El 66% de la producción se destinó al sector del automóvil, seguido del 9% para la fabricación de válvulas y accesorios para tuberías, un 8% para el sector de las energías renovables y en menor proporción se sitúan el sector de la construcción y de los elementos ferroviarios (www.feaf.es). De la producción total española, el 36% se corresponde a fundición gris, más del 63% a fundición dúctil y menos de 1% a fundición maleable, lo cual difiere de la tendencia a nivel mundial [30].

2.2.4.2 Proceso de formación de la escoria de cubilote

El volumen de escoria producida está directamente relacionado con el revestimiento del cubilote, las cenizas del coque, las condiciones de limpieza de la carga metálica y de su

estado de oxidación, así como, también, de las pérdidas al fuego de Si y Mn. Según el origen de las mezclas de carbones, el coque tendrá distintos contenidos de cenizas y la composición de las mismas y su temperatura de reblandecimiento variará.

El tamaño del cubilote influye en la cantidad y composición de las escorias. A mayor tamaño, menor es su desgaste y, por tanto, la generación de escoria. Los revestimientos de cuarcita aportan mucha sílice a la escoria que deberá ser neutralizada. Lo mismo puede decirse de los retornos con arena adherida o las chatarras muy oxidadas.

En total, la cantidad de escoria generada representa entre el 4,5 y el 5% del metal fundido. Partiendo de la composición del refractario, del coque y demás componentes es posible predecir con gran exactitud la composición de la escoria y adecuar el tipo y cantidad de fundente más adecuado [31].

La escoria contiene óxidos que no se han reducido en el cubilote, los cuales provienen de impurezas del material de carga, desprendimientos del refractario del horno, de la ceniza del coque y de las pérdidas en la fusión del metal cargado. Como su densidad es menor que la del hierro y no es miscible con él, puede separarse fácilmente del metal. Los componentes básicos son SiO_2 , CaO , Al_2O_3 y en menor proporción FeO .

Las escorias de cubilote suelen ser densas, sólidas y vítreas, su aspecto varía notablemente dependiendo del funcionamiento del horno, del proceso de separación y en mayor medida del enfriamiento.

Las diferencias que pueden presentar estas escorias se deducen según su color. Las escorias vítreas y de color verde reflejan una fusión adecuada, en cambio, si tienden a ser amarillas es un reflejo del alto contenido de Mn que forma lana de vidrio y requiere temperaturas elevadas para fundir. Cuando existe un exceso de FeO su color es marrón tendiendo a negro.

Con el propósito de que la escoria sea lo suficientemente fluida para separarse del hierro y facilitar el desescoriado del baño, se añaden fundentes. Éstos se calcinan en la zona de fusión para formar cal viva, un óxido básico que se combina con los demás elementos, mayoritariamente ácidos, que forman la escoria.

La basicidad de la escoria calculada mediante la relación $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ suele ser ligeramente ácida en la mayoría de los cubilotes ($< 1,2$) lo cual incrementa su fluidez.

Sin embargo, algunos cubilotes funcionan con escorias básicas (< 2) aportando las siguientes ventajas [32]:

- Mayor contenido de carbono
- Menor contenido de azufre
- Posibilidad de utilizar chatarra de menor calidad en la carga

Y los siguientes inconvenientes:

- Pérdidas de silicio elevadas
- Costes de refractario elevados
- Costes de material fluidificante superiores
- Mayor dificultad para controlar la composición del metal.

2.2.4.3 Enfriamiento

Tras el proceso de enfriamiento seguido, la escoria se presenta como una masa más o menos vítrea, relativamente inerte y con una estructura química compleja. A la hora de identificar las propiedades de la misma, tan importante como la composición química de la escoria es la forma en que ha sido enfriada. En enfriamientos rápidos, con ayuda de agua, se produce la vitrificación de la escoria, quedando la sílice en forma amorfa y, por tanto, susceptible de reaccionar. Por el contrario, los enfriamientos lentos propician la cristalización completa de las fases y la inertización del producto final, no viéndose comprometida, de esta forma, su estabilidad dimensional.

En el primer caso, la reactividad de la escoria podría manifestarse en una hidraulicidad latente de tal forma que, con ayuda de activadores alcalinos, la escoria llegaría a desarrollar, por sí misma, propiedades cementantes de gran valor añadido. Si, por el contrario, únicamente exhiben actividad puzolánica, su aprovechamiento pasaría por la mezcla parcial con cemento para potenciar al máximo el valor cementante que, en la escoria, por sí sola, sería prácticamente nulo. Ambas situaciones resultan, en cualquier caso, ventajosas de cara al aprovechamiento del residuo y al ahorro de costes que

supondría la reducción en el consumo de conglomerante hidráulico (cemento portland) durante el proceso productivo.

En el caso de que la escoria se enfríe lentamente y, consecuentemente, se obtenga un producto inerte, no reactivo, sin propiedades hidráulicas latentes y sin actividad puzolánica, su valorización pasa por el aprovechamiento como árido en la fabricación de morteros y hormigones, para lo cual, en efecto, se requiere de la mayor estabilidad del componente a largo plazo.

2.2.4.4 Caracterización química

En función de las materias primas cargadas en el horno, de las ferroaleaciones utilizadas en el proceso siderúrgico, e incluso de los refractarios empleados, la composición química de las escorias obtenidas es variable dentro de intervalos bastante amplios.

La escoria generada por los cubilotes se compone en un 30% de material refractario, un 10% de arena procedente de la chatarra, un 40% de CaO (fundente), un 10% de cenizas de coque y un 10% de material quemado [32].

Los porcentajes recogidos en la Tabla 2.3 son rangos representativos de la composición química de las escorias de cubilote en España.

Tabla 2.3. *Composición química característica de la escoria de cubilote [32].*

<i>Composición química</i>	<i>Rango [% peso]</i>
SiO₂	45-55
CaO	25-40
Al₂O₃	8-20
MgO	1-3
MnO	1-4
FeO	1-6
Sulfuros	< 1
TiO₂	< 1
ZnO	< 0,1

En cualquier caso, los componentes mayoritarios son siempre la sílice (SiO_2), la cal (CaO), la alúmina (Al_2O_3), el óxido de hierro (FeO) y la magnesia o periclusa (MgO), encontrándose como constituyentes minoritarios (< 1%) el azufre, el titanio, el cromo, el bario y el potasio. Existe una semejanza composicional de estas escorias con las procedentes de horno alto. No obstante, conviene señalar que, el parecido en contenidos de óxidos, que es como se expresan los resultados analíticos, no necesariamente implica que las fases cristalinas presentes en ambos tipos de escorias sean las mismas [33].

2.2.4.5 Experiencias en la utilización de las escorias de cubilote

En la industria metalúrgica, la valorización de las escorias es la única solución para evitar que el subproducto generado sea catalogado como un residuo. Dicha valorización dependerá de su reactividad o hidraulicidad, lo cual está condicionado por el enfriamiento, su composición química y, en consecuencia, su basicidad.

Baricová, Pribulová y Demeter [33] fabricaron hormigones con escorias de cubilote granuladas como árido fino y grueso (0-16 mm). Basados en las resistencias obtenidas, concluyeron que el material no es viable para este tipo de aplicación.

Aderibigbe y Ojobo (1982) [34] observaron que las escorias de cubilote molidas presentan un efecto puzolánico bajo a pesar de su composición química. Mediante calcinación a 700 °C durante 5 horas, obtuvieron un incremento en la actividad puzolánica. El uso de escorias de cubilote en la fabricación de morteros resultó en una pequeña reducción de las propiedades mecánicas, permitiendo sustituir escorias por cemento hasta en un 20%.

Ceccato, Masuero, Moraes, y Vilela [35] estudiaron las propiedades mecánicas de hormigones con escoria granulada de fundición tras su molienda, sustituyendo parte del cemento (10%, 30% y 50%) con distintas relaciones agua/cemento. Los autores observaron que las reacciones puzolánicas ocurren lentamente, manifestando mayores resistencias en edades más avanzadas. La sustitución de un 10% del cemento por escoria de cubilote prácticamente no influye en las propiedades mecánicas; sin embargo, porcentajes superiores de incorporación condujeron a la disminución de la capacidad resistente de los hormigones.

2.3 Hormigón autocompactante

El hormigón autocompactante (HAC), se define como un hormigón muy fluido que tiene la capacidad de rellenar perfectamente los encofrados por la acción de su propio peso y compactarse sin la necesidad de aplicación de energía externa. Desde su colocación hasta el endurecimiento, el HAC debe mantener una composición que se obtiene con una pasta de viscosidad moderada garantizando su fluidez y al mismo tiempo con la cohesión adecuada para evitar la separación de sus componentes.

Son muchas las ventajas que ofrece el HAC. Al no requerir de los métodos de compactación tradicionales para su consolidación, se reduce el número de los operarios, los costes energéticos, la contaminación acústica asociada a la compactación y los plazos de ejecución. Otras de las ventajas asociadas al comportamiento en estado fresco del HAC son: mejor encapsulado de las armaduras, facilidad de colocación por gravedad o bombeo, independientemente de la densidad de la ferralla en los armados y la capacidad de relleno de moldes con geometrías complejas. En el caso del HAC en estado endurecido, se incluyen mejores propiedades mecánicas, de durabilidad y buen acabado superficial.

El HAC se diferencia del hormigón vibrado convencional (HVC), en líneas generales, por tener menor contenido de árido grueso y menor tamaño máximo de árido, mayor volumen de partículas finas de tamaño menor a 125 μm , así como, también, por el uso de aditivos superplastificantes y/o cohesionantes en dosis superiores.

No cabe duda que, el desarrollo tecnológico más importante durante las últimas décadas en cuanto a hormigones, el HAC, se debe, particularmente, a la evolución de los aditivos superplastificantes, en especial a los de última generación basados en policarboxilatos. El efecto de estos aditivos se caracteriza por modificar las propiedades reológicas de las mezclas en estado fresco, afectando, a pesar de no ser claramente apreciable, a la cinética de las reacciones de hidratación y a la formación de los productos de hidratación del cemento [36].

2.3.1 Antecedentes

El profesor de la Universidad de Tokio, Hajime Okamura propone, en 1986, la necesidad de crear este tipo de hormigón con la finalidad de solventar los problemas de durabilidad de las estructuras de hormigón armado que se habían presentado a comienzos de los años ochenta en Japón. La durabilidad del hormigón está condicionada por una adecuada dosificación, la correcta compactación del hormigón durante la puesta en obra y su posterior curado. En aquel momento, los problemas detectados, se atribuyeron a una reducción gradual de trabajadores del sector de la construcción, especialmente de la mano de obra especializada en la colocación y compactación del hormigón, lo cual, se reflejó en la calidad de las construcciones y en la durabilidad de las estructuras. El objetivo de la propuesta de Okamura estaba basado en crear un hormigón durable que no dependiera del factor humano para garantizar su compactación.

Partiendo de esta propuesta, los principales estudios para el desarrollo del HAC, llevados a cabo por Piocha Maekawa y Kazumasa Ozawa en la Universidad de Tokio, se centraron en la trabajabilidad y en la homogeneidad del hormigón.

En 1988, el profesor Ozawa alcanzó el objetivo de diseñar el primer prototipo de hormigón autocompactante. La experiencia concluyó con su colocación en una obra en Japón, empleando materiales existentes en el mercado [37]. El resultado fue muy satisfactorio y se le denominó “High performance concrete” (hormigón de altas prestaciones), por su característica de autocompactarse en estado fresco, mantener su homogeneidad y, lo que más interesaba en aquel entonces, una buena respuesta frente a los agentes externos [38].

En enero de 1989, el profesor Ozawa introdujo el término “Self compacting concrete” en la Segunda Conferencia de Ingeniería Estructural y Construcción del Pacífico y Este de Asia (East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction EASEC-2) celebrada en Chiang Mai, abriendo una nueva puerta en la tecnología del hormigón [39].

En mayo de 1991, Ozawa realizó una presentación en la Conferencia Internacional del Instituto Americano del hormigón ACI (American Concrete Institute) en Estambul, la cual tuvo mayor influencia en la difusión del HAC a nivel global [40].

En agosto de 1994 en Kiochi (Japón) tuvo lugar el primer taller de trabajo sobre el HAC del RILEM.

En noviembre de 1994, el tema de mayor interés en la reunión de trabajo del ACI celebrada en Bangkok (Tailandia) fue el HAC. Los investigadores e ingenieros se veían atraídos por las mejoras en la durabilidad del hormigón y la optimización del sistema tradicional de construcción [41].

A finales de 1996 el profesor Okamura, presenta el HAC en la convención del ACI celebrada en Nueva Orleans, fomentando el interés sobre este material en Norteamérica.

En 1997, RILEM forma un comité para estudiar el HAC y, posteriormente, publica el “Self Compacting Concrete State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC” [42], con el propósito de agrupar las experiencias de un material emergente, introducir conceptos reológicos, de trabajabilidad y presentar los métodos de ensayo y control empleados por distintos grupos de trabajo.

Ese mismo año, se abre el proyecto BriteEuram BE96-3801, titulado “Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete” en el que participaron distintas empresas y universidades con la finalidad de promover el uso del HAC en algunos países de Europa. Fruto de este proyecto, se redactó, en 2002, un documento que presenta, detalladamente, varios aspectos del HAC en estado fresco y endurecido, así como, también, sobre la producción, el transporte y la ejecución a gran escala [41].

En febrero de 1999, se crea una página web en Japón para difundir e intercambiar información sobre el HAC denominada SCC-Net “International Network for Self Compacting Concrete”) [39]. A finales de ese año, en Estocolmo (Suecia), el RILEM celebró la primera conferencia internacional sobre el HAC en la que participaron 67 miembros de 13 delegaciones de distintos países [41].

En octubre de 2001, se celebró en Tokio (Japón) The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete organizado por el RILEM. Esto demostraba el auge de los estudios y las aplicaciones de este material.

En Febrero de 2002 EFNARC (European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete) publica una guía para el uso del HAC [43]. Ese mismo año, en Chicago, se celebró la primera conferencia norteamericana sobre el diseño y aplicación del HAC.

En agosto de 2003 el RILEM convocó en Reyjavik (Islandia) The Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, en el que se manifestó la tendencia ascendente en el desarrollo y utilización del HAC [44].

En 2005, en Chicago (USA), se realizó la cuarta conferencia internacional de RILEM junto a la segunda conferencia norteamericana sobre el uso y la aplicación del HAC en el que investigadores y profesionales del sector del hormigón se centraron en aspectos reológicos y en las propiedades mecánicas. Ese mismo año, en China (Changsha) se celebró la primera conferencia internacional del diseño, comportamiento y uso del HAC con más de 150 participantes de 13 países [44].

Por esas fechas, el Grupo de Proyecto Europeo (EPG) de Hormigón Autocompactante con la participación de BIMB, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO, orientado a unificar criterios en la fabricación de HAC en Europa publica la guía “The European guidelines for Self-compacting concrete; Specification, Production and Use” [45], considerado uno de los documentos más completo y detallado.

En 2006 RILEM forma un segundo comité para estudiar el HAC y publica el “Report rp035 Casting of Self-Compacting Concrete Final report of Rilem TC188-CSC” [46], enfocado en la colocación, curado y acabado del HAC.

En 2007, se celebró en Ghent (Bélgica) la quinta conferencia RILEM y, AENOR publica las primeras normas para la caracterización del HAC en estado fresco. Adicionalmente, RILEM publica el documento “Durability of Self-Compacting Concrete State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC205-DSC” [47], enfocado a la respuesta del HAC frente a los mecanismos de degradación. Asimismo, el Comité Técnico No. 237 del ACI publica la guía “Self consolidating concrete” [48].

En 2008, se desarrolló en Chicago la tercera conferencia norteamericana sobre HAC; ese mismo año en la ciudad de Valencia, se realizó el primer congreso Ibérico sobre HAC y

se publica la Instrucción Española del Hormigón EHE-08, que incluye el ANEJO 17 “Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante”[7]. Por otro lado, la ACHE publica la monografía M-13 “Hormigón autocompactante: Diseño y aplicación” [49].

En 2009, se celebró en Pekín (China) la segunda conferencia internacional en Diseño, prestaciones y uso del HAC. Las presentaciones incluyeron aspectos fundamentales del HAC como tecnología de las adiciones, trabajabilidad y reología, simulación del flujo granular, métodos de ensayo, diseño de mezclas, producción, colocación, acabado, durabilidad, propiedades ingenieriles, comportamiento estructural y aspectos económicos. La diversidad del contenido de este Congreso refleja la evolución del conocimiento asociado a la investigación, desarrollo del conocimiento e implementación de la tecnología del HAC.

En julio de 2010 en Guimarães (Portugal) se celebró el segundo congreso Ibérico de HAC con un notable incremento de trabajos presentados por ingenieros de países latinoamericanos. En septiembre del mismo año, se realizó en Montreal (Canadá) la sexta conferencia internacional RILEM junto a la cuarta conferencia norteamericana del diseño y aplicación de HAC. El propósito de este encuentro era presentar los resultados de las investigaciones y las aplicaciones prácticas, así como, también, los beneficios que ofrece el HAC a la industria del hormigón, la sociedad y el medio ambiente. Este encuentro contó con la presencia de investigadores, representantes de industrias y del gobierno.

En diciembre de 2012 se celebró el tercer congreso Ibérico de HAC, el cual pasó a denominarse Congreso Iberoamericano de HAC. En esta edición, se presentaron experiencias del sector de la construcción.

En mayo de 2013, en Chicago (USA), se realizó la quinta conferencia del diseño y aplicación de HAC norteamérica. Además se publica la norma UNE-EN 206-9 “Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante” [50], basada en los criterios de EFNARC [43] y de la EHE-08 [7].

En 2014, se celebró en Xiamen (China) la tercera conferencia internacional en diseño, prestaciones y uso del HAC. Ese mismo año Rilem publica el documento “Mechanical Properties of Self Compacting Concrete State of the Art Report of RILEM Technical Committee 228” [51], en el que se estudian más de 1500 dosificaciones para analizar distintas propiedades mecánicas del HAC y compararlas con las del hormigón vibrado convencional (HVC).

En Julio de 2015 se realizó en Oporto (Portugal) el cuarto congreso Iberoamericano de HAC. El contenido del congreso abarcaba temas como la composición, la caracterización del HAC, la durabilidad y experiencias de obras.

En mayo de 2016 se celebró la sexta conferencia norteamericana en Washinton DC. Esta edición contó con la presencia de H. Okamura y las presentaciones se centraron en la sostenibilidad, la durabilidad y el uso de materiales alternativos en la fabricación de cemento y hormigón como son los subproductos industriales.

Estos eventos ponen de manifiesto la investigación y evolución tecnológica asociada al HAC. Asimismo, las publicaciones relacionadas con este material han presentado un crecimiento exponencial desde la difusión de los estudios de Okamura.

2.3.2 Materiales empleados en la fabricación de HAC

No existe una gran diferencia entre los componentes empleados para la fabricación de un HVC y un HAC. No obstante, es indispensable el uso de un aditivo superplastificante que proporciona una elevada capacidad reductora de agua y, al mismo tiempo, aporta gran fluidez a la mezcla.

Las proporciones utilizadas en la dosificación de HAC son significativamente distintas a las del HVC. Particularmente, se emplea un menor tamaño máximo y contenido de árido grueso y se incrementa el porcentaje de material fino para mejorar la resistencia a la segregación. En la Figura 2.16 se representan, esquemáticamente, los componentes del HAC.

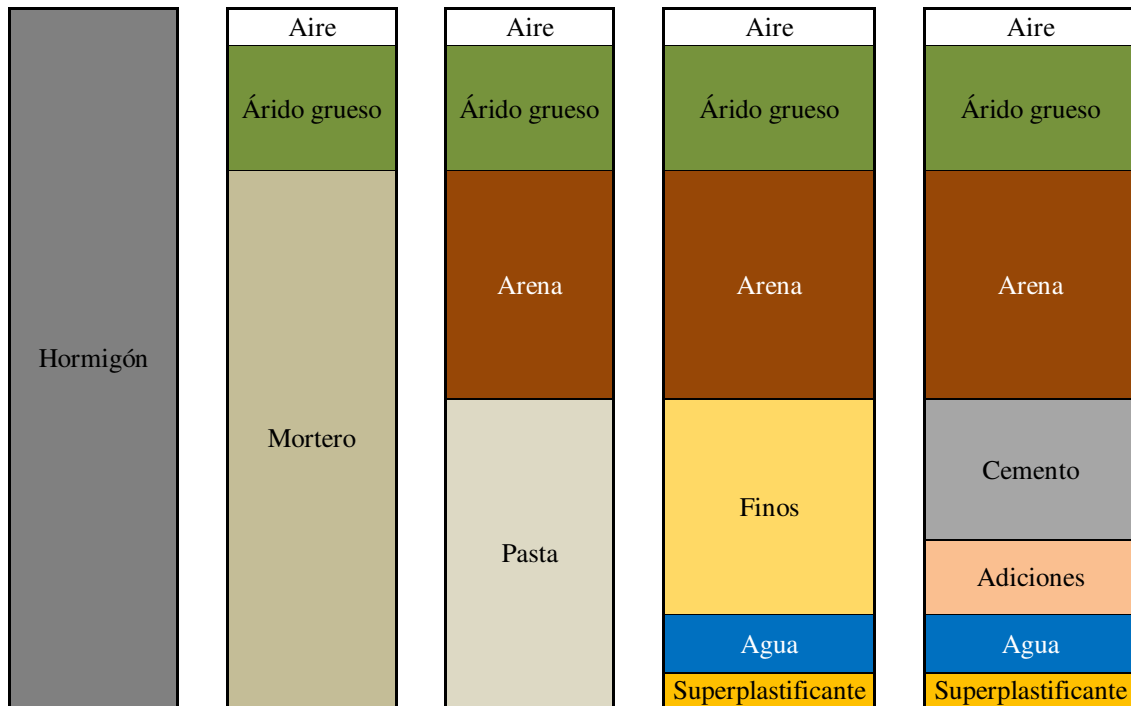


Figura 2.16. Representación esquemática de los componentes del HAC y sus proporciones volumétricas [52].

2.3.2.1 Cemento

No hay restricciones en cuanto al tipo de cemento que pueda utilizarse en el HAC. Los criterios para su elección no difieren de los empleados en el HVC, por lo tanto, dependerán de los requisitos de aplicación, el tipo de ambiente y la disponibilidad en el mercado. Los cementos elegidos deberán cumplir con la normativa UNE-EN 197-1 [45].

Los cementos más utilizados son los portland tipo I, el CEM I 42,5 en el sector del prefabricado y el CEM I 52,5 para la fabricación de hormigones de alta resistencia. Sin embargo, pueden emplearse perfectamente, cementos conteniendo una o más adiciones [53].

Cabe destacar que, propiedades del cemento como la superficie específica, la composición química y la presencia de adiciones minerales influyen en la interacción con los aditivos, sobre todo en mezclas con relación agua/cemento baja. Por ello, se recomienda comprobar la compatibilidad del cemento con el aditivo fabricando pastas o mezclas de mortero [54].

La cantidad de cemento que se utiliza en el HAC usualmente se sitúa en torno a los 350 kg/m³ [51]. No se recomienda superar los 500 kg/m³ para evitar problemas de retracción. Para cantidades inferiores a los 350 kg/m³ es indispensable emplear adiciones en la dosificación de las mezclas para mejorar la trabajabilidad del hormigón en fresco.

2.3.2.2 Adiciones

Se consideran adiciones a las partículas inferiores a 125 µm [7] o con tamaños máximos comprendidos entre 80 y 125 µm [43]. Estos finos se añaden al HAC en estado fresco para aumentar el volumen de pasta, lo que disminuye la interacción intergranular, incrementar la cohesión de la mezcla y fortalecer la resistencia a la segregación, mientras que, en estado endurecido, mejoran el acabado superficial, reducen la capilaridad y la permeabilidad e incrementan las propiedades mecánicas.

También, la incorporación de adiciones en las mezclas como sustituto del cemento, permite reducir el coste del hormigón y el calor de hidratación generado durante el endurecimiento.

Para la dosificación del HAC, se pueden emplear finos tanto inertes como reactivos. Son adiciones inertes los fillers minerales, tales como el filler calizo, el filler dolomítico, el polvo de cuarzo y el polvo de granito. En cuanto a las adiciones reactivas se pueden mencionar las puzolanas naturales, el humo de sílice, las cenizas volantes, el metacaolín, la cáscara de arroz y la escoria de horno alto (hidráulicamente activa).

2.3.2.2.1 Filler mineral

El artículo 28º del Anejo 17 de la Instrucción EHE-08 [7], considera el filler mineral como un árido. Además, recomienda que, la cantidad máxima en peso de material con tamaño de partículas inferior a 0,063 mm, calculado como la suma del fino aportado por los áridos, por las adiciones del cemento y por el filler empleados en la fabricación de HAC no supere los 250 kg/m³. Factores como la finura, la granulometría y la composición química y mineralógica influyen en la demanda de agua y de aditivo en las mezclas.

La norma UNE-EN 12620:2003 [25] define los requisitos granulométricos para el filler mineral de acuerdo a la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Granulometría del filler mineral (UNE-EN 12620:2003).

Tamaño del tamiz (mm)	% que pasa
2	100
0,125	85 a 100
0,063	70 a 100

Puesto que el HAC requiere cantidades importantes de material fino, en lugar de añadir más cemento del necesario, se recomienda el uso de filler mineral para evitar los problemas de retracción, el excesivo calor de hidratación, aunque su incorporación dependerá de la disponibilidad a nivel local de estos materiales. Al ser un material inerte, su empleo como sustituto del cemento está asociado a una reducción de las propiedades mecánicas [55,56].

Su uso mejora las propiedades reológicas del hormigón, favorece la hidratación de la pasta [57], incrementa la fluidez disminuyendo la interacción entre las partículas de árido [56], aumenta la cohesión para brindarle estabilidad al HAC y aporta la viscosidad necesaria para evitar la segregación del árido.

El filler mineral más empleado es el filler calizo, Figura 2.17. Está compuesto, principalmente, de carbonato cálcico (CaCO_3) en forma de calcita (75-85%). Para añadirse en el HAC no debe contener materia orgánica ni arcilla. Se caracteriza por un color beige claro y su densidad se sitúa en torno a $2,6 \text{ g/cm}^3$.



Figura 2.17. Aspecto del filler calizo.

El filler calizo se utiliza en la fabricación del cemento tipo II denominado como cemento con adiciones (CEM II), también se puede añadir de forma directa en la fabricación del hormigón.

Al igual que el resto de los finos empleados ($< 125 \mu\text{m}$) en el HAC, las partículas de filler mejoran la microestructura del hormigón mediante la adecuada distribución de tamaños de los poros, la disminución de la capilaridad y la permeabilidad. Sin embargo, este efecto se aprecia hasta cantidades de filler no superiores al 20% en peso de cemento [55].

2.3.2.2.2 Cenizas volantes

La ceniza volante es una adición activa que, al combinarse con el cemento, reacciona con la portlandita, producto surgido en la hidratación del clínker de portland, aportando mejores propiedades mecánicas, que suelen apreciarse a largo plazo. Adicionalmente, disminuye el calor de hidratación, contribuye en la compacidad y mejora el comportamiento en estado fresco, incrementando la cohesión y la fluidez del HAC.

Las cenizas volantes son un subproducto generado en las centrales termoeléctricas de que utilizan carbón como combustible. Se recogen por precipitación electrostática o por

captación mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de los quemadores alimentados con carbón pulverizado.

Se constituyen por partículas esféricas en estado vítreo de tamaño muy pequeño (1 a 150 micras). Algunas de ellas son huecas y contienen esferas de menor tamaño dentro de las mismas. Están compuestas, principalmente, por dióxido de silicio reactivo (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y, en cantidades menores, de óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de cal (CaO) y óxidos de azufre (SO_2 y SO_3). Generalmente son de color gris, Figura 2.18, con peso específico que varía entre los 2,0 y 2,9 g/cm^3 [8].



Figura 2.18. Aspecto de las cenizas volantes (fuente: www.arthaminerals.com).

Al igual que sucede en todos los subproductos industriales, el efecto de las cenizas volantes en el hormigón está condicionado por el tipo de carbón con el que se generan, lo cual influye, directamente, en las características químicas, mineralógicas, morfológicas y físicas. Es importante tener en consideración la variabilidad de su composición química, que debe ser evaluada con un adecuado control de recepción. Debido a posibles problemas de expansividad ocasionados por el alto contenido de óxido de calcio libre, la instrucción EHE-08 [7] recomienda controlar la finura Blaine y la expansión de las cenizas mediante el ensayo de las agujas de Le Chatelier.

Para que las cenizas volantes sean utilizables como adición en hormigones y cementos (CEM II, CEM IV y CEM V), deben cumplir con una serie de requisitos químicos y físicos especificados en la norma EN 450-1 [58].

Según la instrucción para la recepción de cementos RC-08, [59] existen dos clases de cenizas volantes que pueden ser empleadas como adiciones en los cementos empleados en la fabricación de mortero y hormigón, definidas por las clases V y W. Su diferencia radica en la naturaleza del material.

Las cenizas volantes clase V, de naturaleza silíceas, son las más abundantes. Se generan tras la combustión de la antracita (carbón bituminoso) y se caracterizan por un contenido en peso de cal reactiva (CaO) inferior al 10%, y de cal libre menor al 1%, siendo su composición mayoritaria sílice reactiva (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃). Exhiben propiedades puzolánicas.

Las cenizas volantes clase W, de naturaleza calcárea, se generan de la combustión del lignito (carbón subbituminoso) y se caracterizan por un contenido de cal reactiva que oscila entre el 10 y el 30% y más de un 25% de dióxido de silicio reactivo. Exhiben propiedades hidráulicas y/o puzolánicas.

Las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con cenizas volantes mejoran debido a la reacción del hidróxido de calcio liberado en la hidratación de los silicatos del clínker con las puzolanas, dando lugar a silicatos de calcio hidratados adicionales, que rellenan los espacios capilares [60].

2.3.2.2.3 Humo de sílice

El humo de sílice es una adición con carácter puzolánico. Es un subproducto industrial que se genera al reducir cuarzo y carbón en hornos de arco eléctrico durante la fabricación de aleaciones ferrosilíceas. Su captación se realiza con filtros electrostáticos para evitar la contaminación del medio ambiente, resultando un producto muy valorado.

Está constituido por partículas amorfas esféricas de diámetro muy pequeño (< 0,5 µm), por ello, también es conocido como nanosílice, y se caracteriza por un contenido de sílice

(SiO₂) muy reactiva de 90 a 95% junto a otros componentes en pequeñas proporciones (Fe₂O₃, CaO, MgO). Presenta un color gris y un peso específico en torno a 2,2 g/cm³, Figura 2.19.

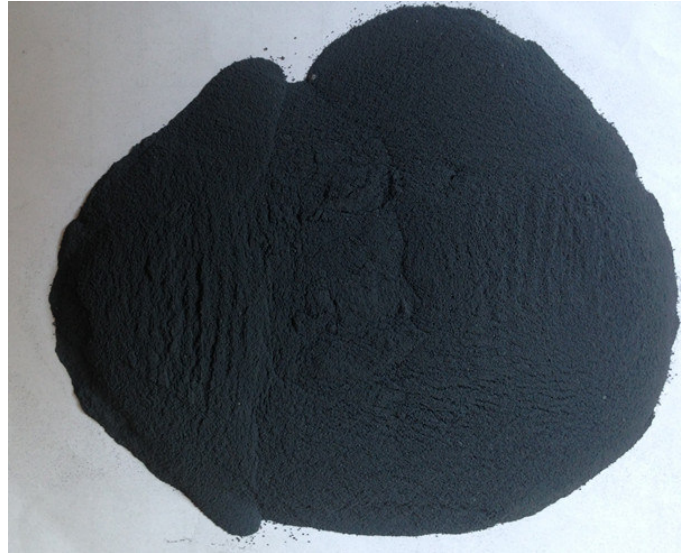


Figura 2.19. Aspecto del humo de sílice (www.tjsunward.com).

El efecto puzolánico del humo de sílice se manifiesta al combinarse con el hidróxido de calcio durante el proceso de hidratación del cemento para formar silicatos cálcicos hidratados que densifican la matriz del hormigón. Esto se refleja en el incremento de las propiedades mecánicas, así como, en la disminución de la permeabilidad y de la porosidad. A diferencia de las cenizas volantes este efecto es apreciable a temprana edad.

En estado fresco aporta mayor cohesión a las mezclas y mejora la resistencia a la segregación. Debido a su finura presenta una importante demanda de agua, lo que hace indispensable dosificarlas junto con aditivos superplastificantes.

La instrucción EHE-08 [7] estipula que el humo de sílice se puede añadir directamente en el hormigón con cementos tipo I (CEM I) en una proporción inferior al 10% en peso del cemento, al mismo tiempo, se emplea como adición en algunos de los cementos tipo II, y V. Para ello, debe cumplir con los requerimientos de la norma UNE-EN 197-1 [61].

2.3.2.2.4 Escoria de alto horno

Las escorias de alto horno provienen de la solidificación de las gangas o impurezas que no son aprovechables durante la obtención de arrabio. Su composición química depende de la materia prima con que se carga el horno y del tipo de coque utilizado como combustible.

Las características y usos de las escorias de horno alto están influenciados por la manera en que se procede a su solidificación. Así, en función de la velocidad de enfriamiento elegida, pueden presentar una estructura cristalina, expandida o granulada. Como adición en los hormigones, las más empleadas son las granuladas. Para ello, se enfrían bruscamente con un chorro de agua tras ser retiradas del horno, confiriéndoles una estructura vítrea.

Se componen, principalmente, por óxidos de cal (CaO), sílice (SiO_2) y magnesia (MgO). Presentan un color gris oscuro y un peso específico de $2,8 \text{ g/cm}^3$, Figura 2.20.



Figura 2.20. Escorias de alto horno enfriadas al aire (fuente: edwclevy.com).

Las escorias de alto horno son hidráulicamente activas. No obstante, el tiempo de fraguado es considerablemente más lento que el de un cemento, aunque se puede acelerar con activantes químicos, aumentando la superficie específica o elevando la temperatura.

Está constatada la eficacia conseguida al emplear activantes de carácter básico como el cemento y la cal [8].

La escoria de alto horno granulada, tras el proceso de enfriamiento, presenta una granulometría 0/6 mm, sometiéndose, posteriormente, a un proceso de molienda para obtener la finura deseada según su aplicación. Se combina con clínker de portland en la fabricación de cementos tipo II, III y V. En la normativa de algunos países europeos se recoge la posibilidad de añadirla, de forma directa, al hormigón como adición [49]. La instrucción EHE-08 [7], no contempla esta vía de uso. Sin embargo, la norma UNE 83841:1996 EX [62] contempla una serie de recomendaciones de dosificación y medioambientales para su empleo en la fabricación de morteros y hormigones con cementos tipo I.

La disminución del calor de hidratación, el aumento del tiempo de fraguado, el incremento de la densidad de la matriz cementicia, una mayor trabajabilidad y mejor resistencia frente a los ataques químicos y a los ciclos de hielo-deshielo, son las ventajas de su utilización.

2.3.2.3 Áridos

2.3.2.3.1 Fracción fina

Las fracciones finas en la fabricación de HAC deben cumplir con las estipulaciones de la instrucción EHE-08 [7].

Las arenas que no presenten un elevado contenido de finos pueden ser corregidas con las adiciones, mientras que, las arenas con porcentajes elevados de partículas de tamaño inferior a 0,125 mm reducen la necesidad de incorporar las mismas para completar el volumen de pasta requerido [49]. El contenido de estas partículas debe ser considerado en el total de finos incorporados en las dosificaciones [7,43].

La rugosidad de las arenas influye, directamente, en la trabajabilidad de las mezclas. El uso de arenas rodadas favorece la reología de las mezclas por presentar menor superficie específica, mientras que, el efecto de las arenas de machaqueo es el contrario debido a la fricción entre las partículas, demandando mayor cantidad de pasta o aditivo para obtener resultados operativos [48].

La naturaleza mineralógica de las arenas puede influir en la reología de las mezclas debido a la incompatibilidad con el aditivo. Las moléculas de los aditivos pueden quedar atrapadas entre las partículas de finos ($< 0,063$ mm) de la arena, como es el caso de las arcillas de estructura laminar, incrementando la demanda de aditivo para mantener la fluidez [63].

2.3.2.3.2 Fracción gruesa

No existen restricciones en cuanto al tipo de áridos a ser empleados en la fabricación de HAC. Sin embargo, existen limitaciones de tamaño para reducir el bloqueo de la mezcla al pasar entre las armaduras o por secciones reducidas y brindar mayor uniformidad al movimiento.

La instrucción EHE-08 [7], en el Artículo 28, recomienda que las partículas de árido no deben superar los 20 mm de tamaño máximo. Los tamaños máximos habituales para el HAC se sitúan entre 12 y 16 mm [49]. Asimismo, es preferible dosificar con granulometrías continuas para incrementar la densidad de empaquetamiento del HAC, reducir el número de huecos y optimizar la cantidad de pasta disponible en la mezcla.

La dosificación de HAC contiene menor proporción de áridos gruesos en comparación con el hormigón convencional. Esto disminuye la interacción entre las partículas de árido, debido a que la separación entre las mismas incrementa la capacidad de paso por armados muy densos o encofrados con secciones muy estrechas.

Cabe destacar que, la segregación en el HAC ocurre por el efecto de la fuerza gravitacional sobre las partículas de árido. En función del tamaño y la densidad del árido empleado, la pasta deberá contar con la viscosidad necesaria para contrarrestar dicho efecto.

Otras propiedades fundamentales en cuanto a las partículas de árido son la rugosidad y la morfología de las partículas. La rugosidad incrementa la demanda de pasta alrededor de las partículas, Figura 2.21, y, por otro lado, la angulosidad incrementa el rozamiento, afectando al comportamiento en estado fresco [64]. Este efecto se magnifica a mayor contenido de árido grueso por el contacto directo entre las partículas [65,66].

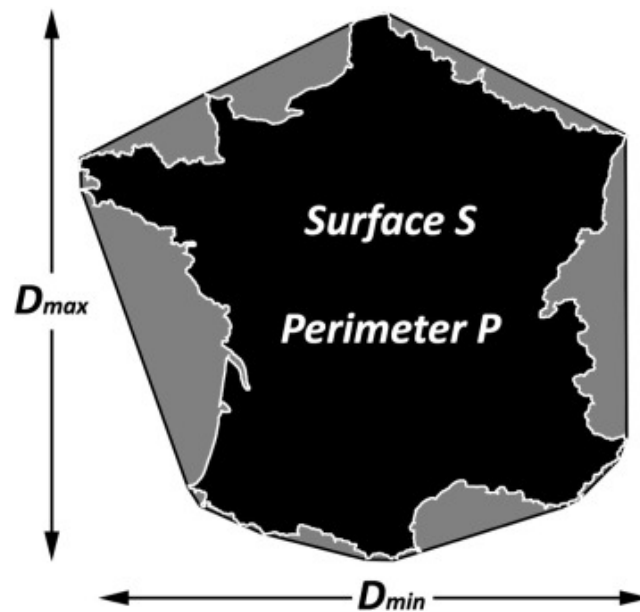


Figura 2.21. Incremento de la demanda de pasta (gris) en las partículas (negro) con mayor angulosidad [64].

2.3.2.4 Aditivos

2.3.2.4.1 Aditivos fluidificantes

La forma más sencilla de clasificar los aditivos plastificantes y superplastificantes comerciales es según su formulación química. En el caso de los plastificantes existen tres familias: lignosulfatos modificados, sales de ácido hidrocarboxílico y derivados de polisacáridos. En el caso de los superplastificantes: derivados de naftaleno, derivados de melanina y, por último, pero no menos importante, los aditivos de última generación que son polímeros solubles en agua de tipo peine. Estos polímeros son no lineales a diferencia de los derivados de naftaleno y melanina.

Los superplastificantes de última generación se caracterizan por poseer una cadena principal (hidrocarbonada) a modo de columna vertebral, a la que están unidos los grupos hidrofílicos e hidrofóbicos, Figura 2.22 [54].

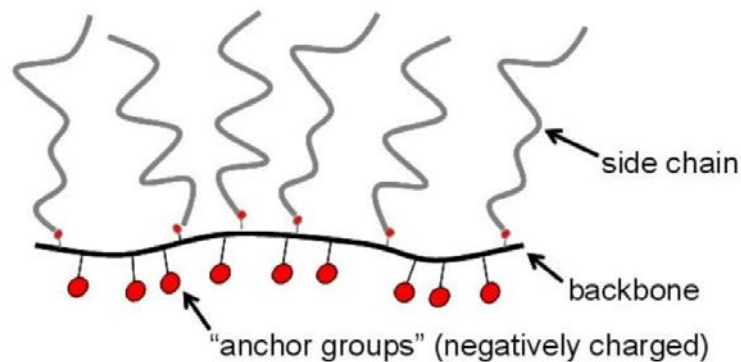


Figura 2.22. Estructura de los polímeros empleados en los aditivos de última generación
(fuente: *deu.sika.com*).

El aditivo superplastificante se considera el componente más importante e indispensable en la fabricación de los HAC y de los hormigones de altas prestaciones (HAP). El progreso del HAC en los últimos años ha sido el reflejo de la evolución tecnológica de la química de los aditivos.

La incorporación de aditivos superplastificantes de última generación consigue reducir la cantidad del agua del hormigón, hasta en un 40%, manteniendo la consistencia y mejorando, significativamente, las propiedades mecánicas y de durabilidad. En cambio, si se mantiene la cantidad de agua, el aditivo confiere alta fluidez al hormigón, sin afectar a las propiedades mecánicas y a la durabilidad. Adicionalmente, su capacidad reductora de agua permite optimizar el contenido de cemento y la relación agua/cemento para obtener un hormigón de igual trabajabilidad y resistencia que el de referencia sin aditivo [54].

Los aditivos superplastificantes se caracterizan por ser tensoactivos aniónicos, es decir, la cadena principal (carboxilatos) de los polímeros tipo peine se adsorbe sobre la partícula de cemento y es la encargada de generar la carga electrostática, mientras que, las cadenas secundarias (éteres) al orientarse forman una capa exterior en toda la superficie de los

granos de cemento con cargas eléctricas del mismo signo, denominada capa de Stern, Figura 2.23. El efecto repulsivo de las cargas del mismo signo impide la formación de flóculos, permitiendo la dispersión de las partículas de cemento.

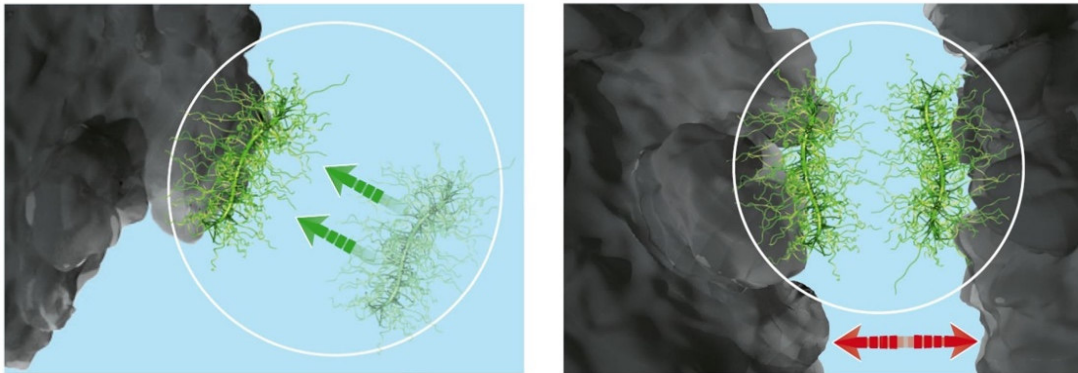


Figura 2.23. Adsorción de los polímeros en el cemento (izq.) y el efecto repulsivo (Fuente: *esp.sika.com*).

Sobre la capa de Stern, se forma una segunda capa denominada doble capa difusa donde el número de iones con carga opuesta a la capa de Stern disminuye progresivamente cuanto mayor es la distancia a la superficie de la partícula. En la capa difusa, se forma un plano de cizalladura por la reducción del potencial zeta, mientras que, alrededor de dicha capa, se encuentran los iones de la solución en equilibrio, Figura 2.24.

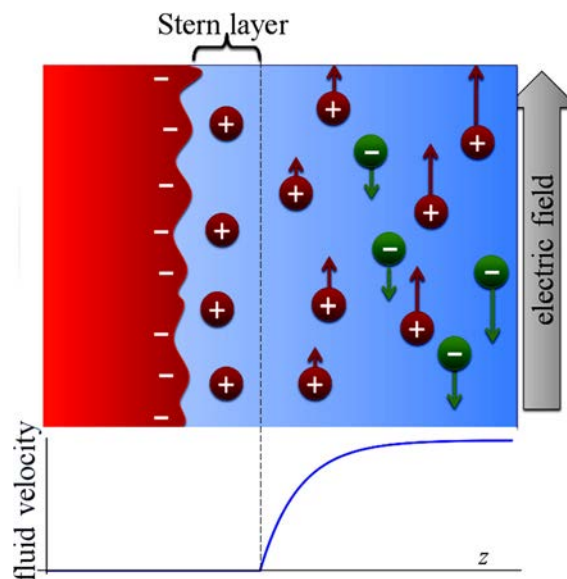


Figura 2.24. Potencial z en la capa de Stern (fuente: *chemistry.osu.edu*).

No solo ocurre un mecanismo de repulsión electrostática por la adsorción de los polímeros sobre las partículas de cemento, ya que, además, las cadenas poliméricas aportan un volumen adicional a los granos de cemento que impide su acercamiento, Figura 2.25. Este efecto se acentúa a medida que aumenta la longitud de las cadenas secundarias, reflejado en el incremento de la trabajabilidad y la disminución de la demanda de agua.

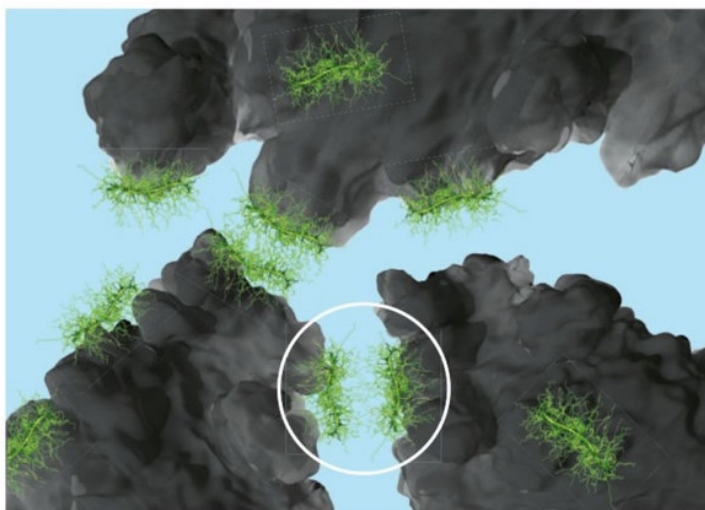


Figura 2.25. Efecto estérico del aditivo (fuente: *esp.sika.com*).

Al momento de seleccionar los aditivos es necesario comprobar la compatibilidad entre éstos, el cemento y las adiciones. Los problemas de incompatibilidad se manifiestan en el comportamiento reológico mediante una rápida disminución de la fluidez, una baja trabajabilidad e incluso con indicios de segregación. Simultáneamente, pueden ocasionar el retraso anómalo del proceso de hidratación del cemento.

La compatibilidad entre el aditivo y el cemento está condicionada por factores asociados a los aditivos, a los cementos y a las condiciones de preparación. En cuanto a los factores asociados al aditivo están: la dosificación, el peso molecular y la estructura. A mayor dosificación, mayor será el efecto fluidificante que proporciona el aditivo hasta alcanzar el punto de saturación [67]. Una vez que los polímeros se han adsorbido en la superficie de los granos de cemento, añadir mayor cantidad de aditivo no resulta en una mayor capacidad dispersante, sino que puede causar efectos indeseados y encarecer el precio del hormigón.

Las fracciones que constituyen los polímeros con mayor peso molecular son las que se adsorben en mayor proporción [68]. Influye la longitud de la cadena principal polimérica, que es la responsable de la adsorción sobre las partículas de cemento, así como, también, la densidad y longitud de las cadenas secundarias que manifiestan el efecto estérico [69]. Otro factor que interviene en el comportamiento reológico es la estabilidad de los enlaces entre la cadena principal y las cadenas secundarias.

Los factores asociados al cemento son: la superficie específica, la composición química y mineralógica, y la presencia de adiciones minerales. A mayor superficie específica, mayor es la demanda de aditivo necesaria para obtener una fluidez determinada [36].

El aluminato tricálcico (C_3A) es la fase que presenta mayor afinidad por los aditivos superplastificantes debido a su elevado potencial zeta de signo positivo. Además, existe una competencia entre los iones sulfato aportados por el regulador de fraguado y los aditivos por adsorberse sobre las partículas de aluminato tricálcico [54].

La adición de caliza en el cemento disminuye el efecto fluidificante del aditivo; la incorporación de ceniza volante no altera dicho efecto y la escoria de alto horno presenta incrementos de fluidez más acusados. En definitiva, ciertas adiciones adsorben partículas de aditivo [70].

Los factores asociados a las condiciones de preparación son el tiempo de adición, las condiciones de mezclado y la temperatura. A pesar de que el tiempo de adición no es un factor muy acusado en los aditivos superplastificantes de última generación, cuando se añade combinado con el agua de amasado, se adsorbe principalmente sobre el componente de mayor afinidad (C_3A), mientras que si se añade tras dos minutos del inicio del amasado con agua, aumenta la adsorción sobre los silicatos (C_3S y C_2S). Esto se refleja en una menor pérdida de trabajabilidad con el tiempo y una menor demanda de aditivo para la misma fluidez.

Debido a la pequeña proporción de aditivo en el volumen total de hormigón, el tiempo y la energía de mezclado influyen en la dispersión y adsorción del aditivo. El efecto que puede surtir el aditivo en la mezcla, además de los factores mencionados, también dependerá de la energía para repartir el mismo, que puede aportar el equipo empleado para el amasado.

Las variaciones de temperatura no afectan al punto de saturación. Sin embargo, a altas temperaturas ($>35\text{ }^{\circ}\text{C}$), se reduce la trabajabilidad del hormigón por la aceleración de las reacciones de hidratación, mientras que, a bajas temperaturas ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) disminuye la velocidad de adsorción del aditivo superplastificante sobre las partículas de cemento, incrementando la trabajabilidad en el tiempo [54].

2.3.2.4.2 Moduladores de la viscosidad

Los aditivos moduladores de la viscosidad se emplean con el propósito de mejorar la cohesión del hormigón para aumentar la robustez y la estabilidad de la mezcla al reducir la pérdida de agua por exudación y, por ende, minimizar el riesgo de segregación. No obstante, su uso no es imprescindible como el de los aditivos superplastificantes puesto que las adiciones pueden aportar la cohesión necesaria al HAC. Como una función o efecto secundario, ciertos aditivos superplastificantes incrementan la viscosidad de la mezcla [54].

En la fabricación del HAC se combinan estos productos con los aditivos superplastificantes para obtener mezclas muy fluidas y al mismo tiempo estables, facilitando el mezclado, bombeo y su puesta en obra. La combinación de estos productos químicos conlleva la comprobación de la compatibilidad entre ambos para evitar efectos indeseados como el retraso del fraguado o la presencia de mayor porcentaje de aire ocluido.

Estos aditivos se pueden clasificar de la siguiente manera: polímeros que interactúan con el agua, polímeros que interactúan con las partículas de cemento, materiales orgánicos y emulsiones que proporcionan partículas muy finas.

2.3.2.5 Agua

El agua empleada para la fabricación del HAC debe cumplir los mismos requerimientos exigidos para un hormigón convencional, tal y como estipula la Instrucción EHE-08 [7].

La presencia de impurezas puede llegar a afectar al proceso de hidratación del cemento, originando retrasos del tiempo de fraguado y a la disminución de las propiedades mecánicas y de durabilidad.

El HAC, debido al uso de aditivos superplastificantes de última generación, se fabrica con relaciones agua/cemento bajas, cumpliendo con la premisa de aportar la cantidad mínima de agua para garantizar la hidratación de los granos de cemento y las adiciones activas, así como, también, para lubricar la superficie de los áridos, lo que facilita la trabajabilidad requerida a la mezcla en estado fresco.

El agua libre en las mezclas de HAC da lugar a problemas de inestabilidad (segregación y sangrado), mientras que, la carencia de agua disminuye la fluidez y puede llegar a ocasionar el bloqueo [71].

En los estudios realizados por Yamada et al [69], partiendo de relaciones de agua/cemento bajas ($< 0,3$), unas ligeras variaciones en la cantidad de agua, se reflejan en importantes cambios en la fluidez, mientras que, a relaciones agua/cemento altas, este hecho sucede con ligeras variaciones del aditivo.

2.3.3 Composición

Si bien no existen diferencias esenciales en cuanto a componentes entre un hormigón convencional y un HAC, a la hora de diseñar las proporciones de las mezclas, para el hormigón autocompactante se parte de:

- Menor contenido de árido grueso: para asegurar que cada partícula esté plenamente recubierta por una capa de mortero y así disminuir el rozamiento entre las partículas que reduce el flujo del hormigón, y minimizar el bloqueo de los áridos entre las armaduras o en espacios confinados. La relación de arena/áridos se sitúa en torno a 0,5 para el HAC frente a 0,4 para el HVC.
- Menor tamaño máximo de árido: el esqueleto granular se compone por áridos de menor tamaño máximo, para reducir el riesgo de segregación. En el HVC, se admiten tamaños máximos de 37,5 mm; en cambio, la Instrucción EHE-08 [7] recomienda tamaños máximos de 20 mm para el HAC.

- Mayor volumen de pasta: para recubrir y lubricar con una capa de pasta todas las partículas de árido. Proporciona mayor deformabilidad en la mezcla y evita el bloqueo del árido grueso. El volumen de pasta del HAC oscila entre 28-40%, mientras que, en el HVC, varía entre 25-30%.
- Mayor contenido de finos (cementos, filler y adiciones): aportan cohesión y viscosidad moderada a la pasta para mantener en suspensión las partículas de árido y reducir la interacción entre ellas. El contenido de finos totales varía entre 450-600 kg/m³ [43].
- Uso indispensable de aditivos superplastificantes: permiten reducir la cantidad de agua hasta un 40% y aportan la fluidez necesaria para que el hormigón se consolide por su propio peso con gran escurrimiento. Adicionalmente, estos productos aportan mejores propiedades mecánicas y de durabilidad.

En la Figura 2.26, se representa la composición de un HAC frente a la de un hormigón convencional. Se observa lo ya comentado, que la diferencia radica en las proporciones de sus componentes.

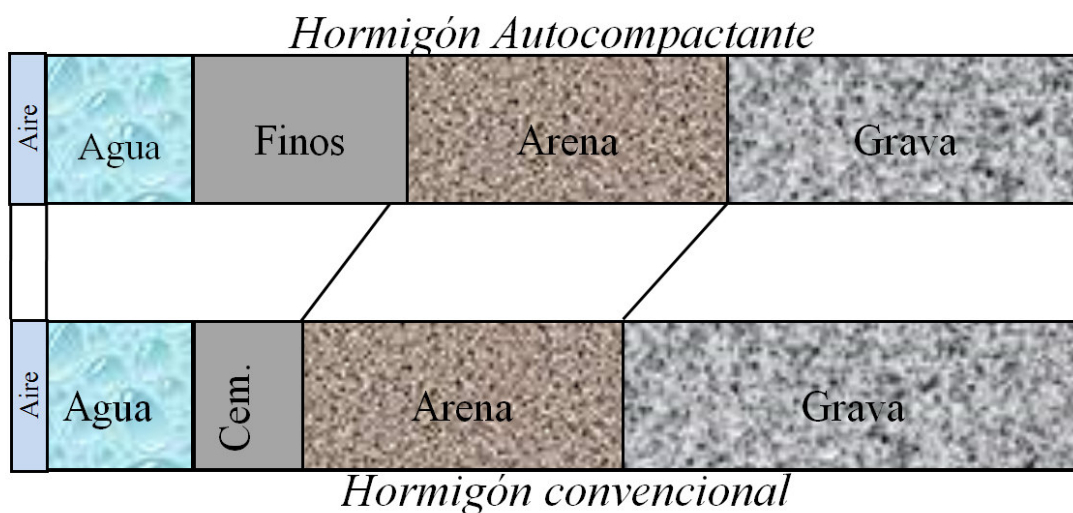


Figura 2.26. Comparación esquemática de las proporciones de mezcla del HAC y el hormigón convencional [72].

2.3.4 Métodos de dosificación

El diseño de la mezcla del HAC es un paso crítico para obtener un material que cumpla con los requerimientos específicos, tanto en estado fresco como en estado endurecido. En la actualidad, además de las exigencias técnicas, es importante tener en consideración la sostenibilidad y el coste como factores clave.

Para el diseño de la dosificación del HAC existen recomendaciones con rangos de proporciones en peso y volumen en la Instrucción EHE-08 [7], Tabla 2.5, y en la guía EFNARC [43], Tabla 2.6, que se pueden usar como punto de partida.

Tabla 2.5. Rangos típicos recomendados por la EHE-08 para la dosificación de HAC.

Material	Contenido
Filler*	< 250 kg/m ³
Cemento	250-500 kg/m ³
Finos totales (cemento+filler+adiciones)	400-600 kg/m ³
Pasta (cemento+filler+adiciones+agua)	>350 l/m ³
Árido grueso (T _{máx.} < 25 mm)	≤ 50%

(*) Incluyendo la adición de caliza del cemento y partículas de los áridos < 63 μm

NOTA: las limitaciones de contenido de agua y cemento quedarán precisadas según las condiciones de exposición definidas en la instrucción

Tabla 2.6. Rangos típicos recomendados por EFNARC para la dosificación de HAC.

Componente	Rango típico por:	
	Masa [kg/m ³]	Volumen [l/m ³]
Finos	380-600	-
Pasta	-	300-380
Agua	150-210	150-210
Árido grueso	750-1000	270-360
Árido fino (arena)	45-55% del peso total de áridos	
Rel. agua/finos (Vol.)	-	0,85-1,10

En la literatura existen distintos métodos de dosificación del HAC que pueden ser agrupados en cinco clases [73]: empíricos, según la resistencia a compresión, de ajuste de empaquetamiento de áridos, basados en estadística factorial y basados en la reología de las pastas. A continuación, se describen algunos de los métodos recogidos en la bibliografía para cada uno de los grupos.

1. Métodos empíricos

Estos métodos, se basan en datos empíricos para estimar el contenido de partida del árido, tanto fino como grueso, agua, cemento y aditivo superplastificante. Son métodos muy laboriosos, ya que, la forma de definir las proporciones de la dosificación, se realiza mediante amasadas de prueba y ajustes consecutivos. Para ello, es necesario disponer de material suficiente para realizar baterías consecutivas de ensayos de laboratorio.

El método más empleado en la dosificación mediante métodos empíricos del hormigón viene de la mano de los pioneros del HAC, Okamura y Ozawa en el año 1995 [38]. El diseño de la mezcla se realiza de la siguiente manera: se ajusta el contenido de la fracción gruesa de árido en un 50% del volumen sólido total del hormigón, luego se fija el contenido de la fracción fina de árido en un 40% del volumen de mortero, a continuación la relación agua/finos (cemento y adiciones) se sitúa en torno a 0,9-1 en volumen, en función de las propiedades del aglomerante y las adiciones. Finalmente, la proporción de aditivo superplastificante y la relación agua/conglomerante se optimiza mediante ensayos sobre la pasta..

Otro método empírico, con mejoras al método de Okamura fue propuesto por Edamatsu, Sugamata y Ouchi [74]. Los autores analizaron métodos de caracterización en estado fresco del mortero (flujo y embudo en V) para definir la proporción de árido fino, relación agua/finos en volumen y la dosificación de superplastificante.

Domone [75], partiendo de las propiedades requeridas en estado fresco con morteros, persigue la mejor estimación de las proporciones de mezcla y, luego, realiza amasadas de hormigón para contrastar los parámetros obtenidos con los estimados.

Khaleel and Razak [76] para facilitar el diseño de la mezcla con sustitución del cemento por metacaolín, proponen realizar ensayos independientes sobre la pasta, el mortero y el hormigón. Los ensayos de fluidez sobre la pasta sirven para determinar la relación agua/cemento y la proporción óptima de aditivo, mientras que, los ensayos sobre el mortero en estado fresco permiten determinar la cantidad óptima de arena y su influencia, en los porcentajes de sustitución de material puzolánico y el efecto sobre el aditivo superplastificante. Finalmente, con el hormigón en estado fresco, se comprueban los requerimientos de fluidez, capacidad de paso y resistencia a la segregación.

2. Métodos según la resistencia a compresión

En estos métodos, se determina el contenido de cemento, adiciones, agua y áridos en función de la resistencia a compresión. Son métodos que no requieren de amasadas consecutivas para establecer las proporciones de la dosificación. Sin embargo, es necesario ajustar las proporciones de todos los componentes. Enfatizan en la distribución granulométrica de las fracciones fina y gruesa de áridos, así como, también, en el empleo de adiciones de carácter puzolánico.

Gazí et al [77] se basaron en el método de la norma ACI 211.1 para dosificar hormigón convencional y el método de EFNARC para la fabricación de HAC.

Dinakar, Sethy y Sahoo [78] emplean escoria granulada de alto horno con el fin de cumplir los requerimientos de resistencia. En la dosificación consideran la eficiencia de la escoria en la mejora de las propiedades mecánicas.

3. Métodos de ajuste basados en el empaquetamiento de áridos

Este tipo de diseño obtiene las proporciones de mezcla mediante la máxima compacidad entre áridos, basándose en el modelo de empaquetamiento que propone llenar con arena los espacios entre la fracción gruesa de árido, seguido del uso de pasta suficiente para rellenar con finos los huecos restantes entre las partículas de arena, recubriéndolas con la cantidad necesaria para cumplir con las exigencias de autocompactibilidad. La principal ventaja es que emplean cantidades mínimas de aglomerante.

Petterson, Billberg y Van [79] se basaron en la habilidad de paso, condicionada por la separación del refuerzo y el tamaño máximo del árido. El método considera al hormigón como dos fases, una sólida y otra líquida: la fase de árido grueso suspendida en la fase de pasta compuesta por agua, cemento y adiciones.

Wang and Tsai [80] usaron el algoritmo de diseño de mezcla densificada (DMDA "Densified Mixtures Design Algorithm"), que deriva de la teoría de la máxima densidad y del exceso de pasta. El diseño se basa en la durabilidad del hormigón y busca la menor cantidad de agua y cemento, incorporando cenizas volantes.

Kanadasan y Razak [81] combinan el concepto de empaquetamiento de partículas y volumen de pasta para garantizar el comportamiento en estado fresco y endurecido de las mezclas.

4. Métodos basados en estadística factorial

Estos métodos, se basan en los efectos de distintos parámetros clave como el contenido de cemento y de adiciones, relación agua/cemento, volumen de árido grueso y dosificación de aditivo superplastificante, en la trabajabilidad y el comportamiento en estado fresco y endurecido del HAC. Determinan rangos razonables para cada parámetro y las proporciones de mezcla se calculan de acuerdo a diseños de hormigón convencional. Una vez definidos, permiten optimizar la campaña de ensayos necesaria para ajustar una dosificación, disminuyendo el número de amasadas de prueba para obtener el balance de las distintas variables de la mezcla. Para ello, se requiere un intenso trabajo experimental y material suficiente para analizar, en profundidad, el efecto de los parámetros en los modelos.

Khayat, Checar and Hadriche [82] obtienen relaciones estadísticas entre cinco parámetros de dosificación y las propiedades del hormigón. Los resultados permiten optimizar el diseño y realizar el control de calidad de las mezclas.

Bouziani [83] evalúa el efecto de la proporción de tres tipos de arena (arena de río, arena de machaqueo y arena de duna), mediante sistemas binarios y ternarios, sobre las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón autocompactante.

5. Métodos basados en la reología de las pastas

Estos métodos están basados en ensayos utilizando equipos de laboratorio muy sofisticados. Estudian los parámetros reológicos de pastas y morteros con el propósito de optimizar las dosificaciones y mejorar el comportamiento en estado fresco de las mezclas. Su principal ventaja es que reducen el número de amasadas de prueba y la demanda de material. El estudio de la reología permite controlar, de manera precisa, la calidad de los aditivos superplastificantes y el efecto de las adiciones en la pasta.

Saak, Jennings y Shah [84] han diseñado un método para controlar la resistencia a la segregación basado en la reología de la pasta de cemento para áridos con granulometría y proporción en volumen específicas.

Bui, Akkaya y Shah [85] mejoraron el modelo de Saak incluyendo el efecto de la proporción en volumen árido-pasta, la distribución del tamaño de partículas y la relación árido fino-árido grueso.

2.3.5 Comportamiento en estado fresco

El HAC, al ser comparado con un hormigón convencional, se diferencia, notablemente, por su comportamiento en estado fresco. Para su caracterización es necesario evaluar tres propiedades que deben cumplirse simultáneamente:

- Capacidad de paso: describe la capacidad del HAC para pasar por zonas estrechas, entre las barras de refuerzo o sortear obstáculos, sin que el contacto entre las partículas de árido origine el bloqueo de la pasta. Por este motivo, también se describe como resistencia al bloqueo. Esta característica del HAC se logra con el uso de aditivos superplastificantes y disminuyendo la proporción y el tamaño máximo del árido grueso.

- Capacidad de relleno: describe la capacidad del HAC para llenar perfectamente el volumen a hormigonar sin la posterior aparición de defectos. Esta propiedad permite que las armaduras queden perfectamente encapsuladas por el hormigón, obtener buenos acabados y una coloración homogénea. Para rellenar con un material todo el encofrado sin manifestar segregación, es necesario contar con una mezcla deformable y con suficiente cohesión.
- Resistencia a la segregación: describe la capacidad del HAC a mantenerse homogéneo durante su colocación y fraguado sin que ocurra la separación de sus componentes. La resistencia a la segregación está asociada a la estabilidad, es decir, a la distribución uniforme de sus componentes.

La estabilidad abarca la resistencia a la segregación, tanto durante su colocación, denominada estabilidad dinámica, como una vez que ha cesado el flujo con la mezcla en estado plástico, conocida como estabilidad estática.

El comportamiento del hormigón como un fluido, se puede evaluar de forma rigurosa mediante el estudio de sus parámetros reológicos, empleando reómetros que determinan dichas magnitudes físicas. Paralelamente, existen métodos empíricos consistentes en ensayos normalizados, sencillos y fáciles de llevar a cabo, tanto en el laboratorio como en obra, que permiten determinar de manera individual o simultánea dichas propiedades.

El HAC es más sensible a pequeños cambios en las características de los componentes, parámetros de mezcla y las condiciones de fabricación que un HVC. Esta sensibilidad viene definida por la robustez, que es la capacidad de un hormigón para mantener sus requisitos de comportamiento tras introducirse algunas variaciones en las características de los componentes, cambios de temperatura o pequeños ajustes en la dosificación.

La robustez del HAC cobra gran importancia en estado fresco, dada la necesidad de cumplir con la capacidad de flujo, la capacidad de paso y la resistencia a la segregación durante el llenado del volumen a hormigonar.

Los parámetros que afectan, notablemente, a la robustez del hormigón, básicamente se refieren a los materiales empleados en la dosificación. No obstante, se ha demostrado que, el método de amasado, influye de manera directa en el comportamiento de la mezcla en estado fresco, así como, también, en las propiedades en estado endurecido [86,87].

En el caso de los materiales, el contenido de agua, la dosificación de superplastificante, el contenido de filler o de adiciones, la finura de la arena, la granulometría de los áridos, la humedad de los áridos y las características de los aglomerantes son: los parámetros más influyentes. En cuanto al procedimiento de amasado, las variables que pueden afectar son: el tiempo de amasado, la incorporación de aditivo retardada y la energía de mezclado (tipo de amasadora, velocidad de mezclado).

Los requerimientos para la caracterización y conformidad del hormigón autocompactante en estado fresco están estipulados en la norma UNE-EN 206-9 [50].

2.3.5.1 Comportamiento reológico del HAC

La reología es la disciplina que estudia el vínculo entre el esfuerzo aplicado (tensión de corte), la deformación ocasionada y el tiempo en los materiales que son capaces de fluir. En el caso del hormigón, aporta magnitudes físicas que no son específicas de los métodos de ensayo habituales, que son incapaces de describir los múltiples aspectos de la trabajabilidad.

La resistencia que un fluido opone al flujo se puede modelar analizando el movimiento del mismo entre dos placas paralelas, donde una de ellas se mueve en la dirección de su propio plano y la otra está fija. Se considera que el flujo es laminar, unidimensional y que la velocidad varía de forma directamente proporcional a la distancia perpendicular entre las placas, Figura 2.27.

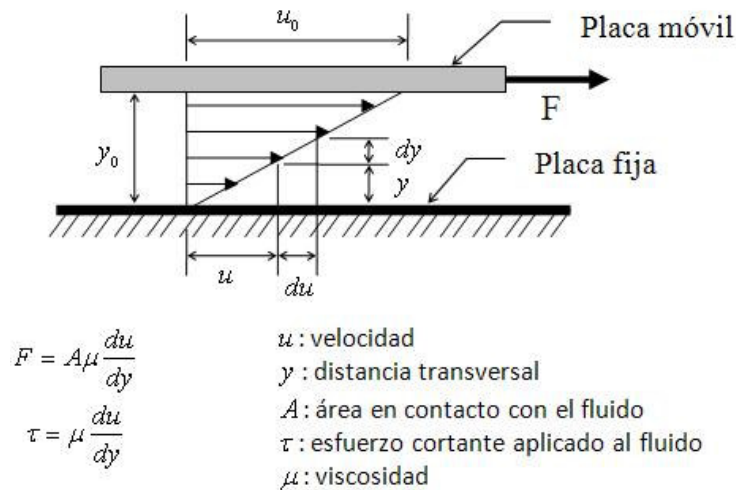


Figura 2.27. Esquema del movimiento de un fluido en régimen laminar (fuente: *webdelprofesor.ula.ve*).

La tensión de corte (τ) se define como la fuerza aplicada por unidad de área en contacto con el fluido. La velocidad de corte (γ) es el gradiente de velocidad por unidad de distancia entre las dos placas. La constante μ relaciona el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación adoptada por el fluido, magnitud denominada viscosidad. La viscosidad depende de la naturaleza del fluido y es un reflejo de su “fluidez”.

El caso descrito para el flujo laminar entre dos placas, Figura 2.27, es aplicable a fluidos de estructura simple, que obedecen al modelo lineal de la ley de Newton:

$$\tau = \mu \cdot \gamma'$$

Existen otros fluidos, con estructuras más complejas, que presentan un comportamiento elástico, viscoso o una combinación de ambos. Estas sustancias se denominan fluidos no-newtonianos.

El hormigón es un material que se puede considerar como una sustancia de estructura compleja, al estar compuesto por un líquido viscoso con partículas sólidas en suspensión que, en escala macroscópica, puede fluir como un líquido [88].

Generalmente, el comportamiento de las suspensiones de partículas sólidas floculadas, como es el caso del hormigón, puede describirse según el modelo de Bingham, caracterizado por una resistencia a la deformación en condiciones estáticas definida como

tensión umbral (τ_0) y por una viscosidad creciente al movimiento definida como viscosidad plástica (μ), Figura 2.28.

Para representar el comportamiento reológico de un fluido, se recurre a un diagrama denominado curva de flujo, graficando, en el eje de las ordenadas, la tensión de corte y, en el de las abscisas, el gradiente de velocidades de deformación.

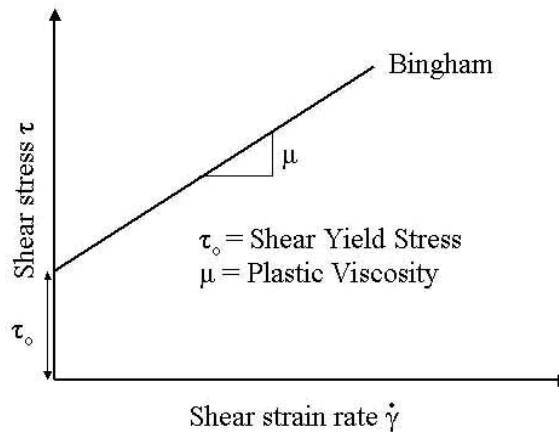


Figura 2.28. Representación gráfica del modelo de Bingham (fuente:theconcreteportal.com).

El modelo de Bingham se define mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

En el caso del hormigón, la tensión umbral es el esfuerzo mínimo que se debe aplicar para iniciar el flujo del hormigón. En el caso de los HVC, esto se logra con el uso de vibradores, mientras que, el HAC fluye por su propio peso, lo cual es un indicio de que la tensión umbral es significativamente más baja.

La viscosidad plástica es la resistencia a fluir una vez que se ha superado la tensión umbral. En el caso del HAC la viscosidad no debe ser demasiado alta ya que sería demasiado rígido y con poca trabajabilidad. Al mismo tiempo la viscosidad no debe ser demasiado baja debido a que el hormigón no sería estable. La solución es un punto de equilibrio con una viscosidad moderada, de manera tal, que se asegure la capacidad de flujo y, al mismo tiempo, la resistencia a la segregación.

Se han propuesto otros modelos para describir el comportamiento no lineal de ciertos hormigones en estado fresco tras superar la tensión umbral como es el caso de Herschel-Bulkley [89], Figura 2.29. El mismo se utiliza en algunos HAC cuando exhiben un comportamiento pseudoplástico y al realizar la determinación de parámetros como la tensión umbral mediante la ecuación de Bingham arroja resultados negativos.

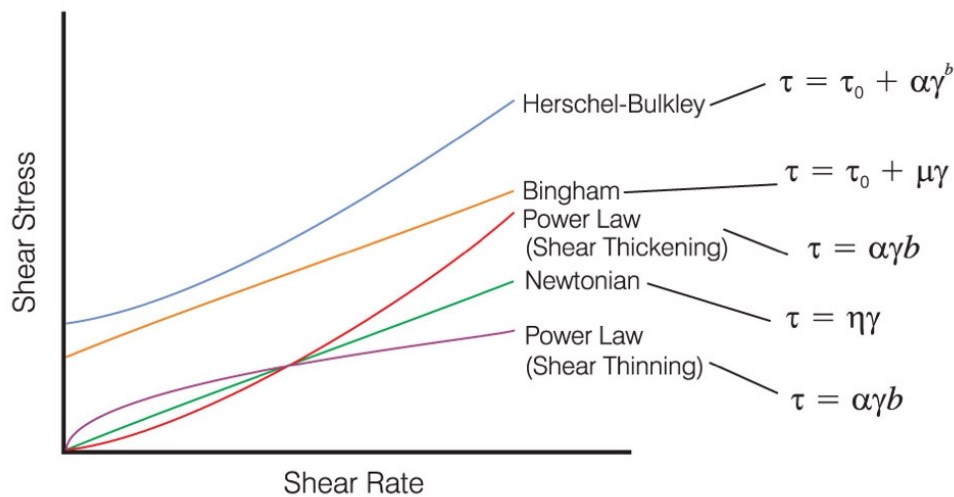


Figura 2.29. Representación gráfica de los modelos reológicos (fuente: <http://procesosbio.wikispaces.com/Fluidos>).

Otra propiedad reológica que describe el comportamiento en estado fresco del hormigón es la tixotropía, Figura 2.30, la cual se define como la pérdida de viscosidad reversible, isotérmica y dependiente del tiempo, cuando un fluido es sometido a esfuerzos de corte.

Este comportamiento está asociado a la capacidad del HAC de reestructurarse al dejar de fluir, lo que posibilita la estabilidad del material una vez ha rellenado el encofrado.

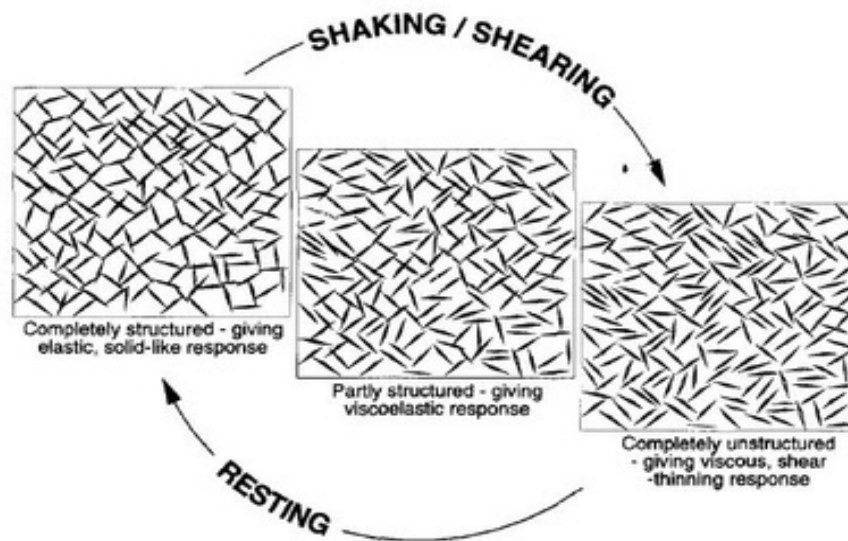


Figura 2.30. Efecto tixotrópico [90].

Una descripción de este comportamiento es la siguiente: partiendo del HAC en reposo, las partículas de cemento floculan para formar una estructura en red tridimensional atraídas por las fuerzas de Van der Waals, lo que genera un aumento de la viscosidad. Para iniciar el flujo del hormigón, siguiendo el modelo de Bingham, es necesario aplicar un esfuerzo de corte umbral con el que se rompen los enlaces de la red, lo que conlleva la disminución de la viscosidad y, por lo tanto, una mínima resistencia al flujo.

Finalizado el flujo el hormigón vuelve al reposo, iniciando nuevamente el ciclo. El aumento de la viscosidad en reposo reduce la presión sobre los encofrados y previene la segregación de las partículas de árido en suspensión. Ahora bien, si esta viscosidad es muy elevada, dificulta la puesta en obra en el caso de realizar la misma mediante bombeo.

Cabe destacar que, la formación de estos enlaces reversibles en la estructura del hormigón, disminuye con el tiempo por el avance de la hidratación del cemento. Este suceso afecta, directamente, al tiempo abierto, parámetro que se define como el lapso de tiempo, contado desde el momento de la fabricación, durante el cual se mantienen las características de autocompactabilidad.

2.3.6 Comportamiento en estado endurecido

Es cierto que lo más atractivo y diferenciador del HAC es su comportamiento en estado fresco, si bien, los materiales, las proporciones empleadas en la dosificación y la autocompactación, influyen en las propiedades del hormigón endurecido.

El mayor contenido de finos y de pasta, el uso de aditivos superplastificantes, la reducción del contenido de árido grueso y del tamaño máximo, así como, también, la homogeneidad de las mezclas, se refleja, en estado endurecido, en estructuras más densas (menos porosas) y una mayor resistencia a compresión y durabilidad. Sin embargo, el mayor contenido de pasta repercute en un menor módulo de elasticidad y una mayor retracción al ser comparado con el hormigón convencional.

Debido a la diversidad de variables existentes y a la falta de aceptación de un parámetro base, resulta difícil comparar las propiedades en estado endurecido de un hormigón convencional con un hormigón autocompactante. En la bibliografía existente, la mayoría de referencias emplean la relación agua/cemento como base para la comparación [91-93], mientras que, otros autores usan los finos o el contenido de pasta [94,95].

Los requerimientos para la caracterización y conformidad del HAC en estado endurecido no difieren de los HVC, de acuerdo a la norma UNE-EN 206-9 [50] y deben seguir las estipulaciones de la norma UNE-E-206-1 [96].

2.3.6.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es la propiedad mecánica más importante del hormigón, dado que es un indicador de la calidad del material al estar directamente relacionada con la estructura interna del mismo [97].

Los parámetros que influyen en la resistencia a compresión del HAC son: la proporción y tipo de cemento, la relación agua/cemento, el tipo y contenido de adiciones y aditivos, las propiedades de los áridos, la cantidad de aire ocluido, las condiciones de curado, los parámetros de ensayo, las probetas empleadas y la edad del hormigón [51].

Propiedades de los áridos como la forma, el tamaño, la angulosidad y la textura afectan, notablemente, a la transmisión y distribución de los esfuerzos entre la pasta y las partículas de árido. El uso de partículas de árido de mayor tamaño máximo reduce la demanda de agua en las mezclas, no obstante, la interfase pasta-árido es más débil. En cambio, las partículas con mayor rugosidad y angulosidad incrementan la transmisión de esfuerzos [93,98].

En los hormigones de alta resistencia a compresión ($f_c > 90$ MPa), el comportamiento mecánico de los áridos es fundamental en la capacidad resistente, mientras que, el comportamiento mecánico de los hormigones con resistencia a compresión normal, depende de las propiedades de la pasta. En el estudio realizado por E. Rozière et al. [95], el incremento del volumen de pasta de las mezclas de HAC de resistencias normales, manteniendo la relación agua/cemento efectiva, resultó en un ligero descenso de la capacidad resistente.

El uso de adiciones incrementa la capacidad resistente del hormigón, efecto que se manifiesta, en mayor proporción, al emplear adiciones con propiedades puzolánicas. Según Domone [93], en la resistencia a compresión tiene mayor influencia el tipo y la proporción de adición que la relación agua/finos (cemento + adiciones). E. Rozière et al. [95], observó el aumento de la resistencia a compresión al incrementar el contenido de filler calizo, manteniendo la relación agua/cemento efectiva y la cantidad de cemento.

Los aditivos superplastificantes de última generación, empleándose en proporciones óptimas, permiten reducir la relación agua/cemento hasta un 40% sin afectar la trabajabilidad. Esto se refleja en el incremento de la capacidad resistente del hormigón. El efecto dispersante de estos productos mejora la distribución de las partículas de cemento en toda la pasta y permite que ocurra la hidratación de mayor superficie de las partículas, mejorando la resistencia a compresión.

Comparar las propiedades mecánicas de un HAC con un HVC es una cuestión que ha generado discrepancias entre distintos investigadores. Esto debido al rango tan amplio de variables en cuanto a dosificación, amasado, propiedades en estado fresco y condiciones de ensayo que influyen en el estudio. Según el comité técnico 228-MPS de RILEM [51], los tres factores más influyentes en la diferencia de comportamiento entre el HAC y el hormigón convencional son:

- Las estructuras más densas del HAC: debido al mayor contenido de finos y al uso de aditivos superplastificantes, que conducen a bajas relaciones agua/cemento.
- Mejor adherencia entre la pasta y los áridos: debido al mayor contenido de finos y pastas más fluidas.
- La distribución de manera uniforme de los esfuerzos durante la aplicación de cargas a compresión: asociado al mayor volumen de pasta y, en consecuencia, menor contenido de árido.

Según EFNARC [43] y Holschemacher [92], el HAC con una relación agua/cemento similar a la de un HVC tendrá una resistencia a compresión ligeramente superior debido a la mejor interfase pasta-árido que se forma al no existir el vibrado.

2.3.6.2 Relación tensión-deformación

El módulo de elasticidad es una propiedad del hormigón que refleja la rigidez del material y se emplea para determinar las deformaciones de las estructuras en servicio y, en su caso, frente a seísmos. En el hormigón pretensado es un parámetro empleado en el cálculo del acortamiento elástico y de la fluencia.

El comportamiento del módulo de elasticidad del hormigón está relacionado con las tres fases que componen este material: pasta, árido e interfase pasta-árido.

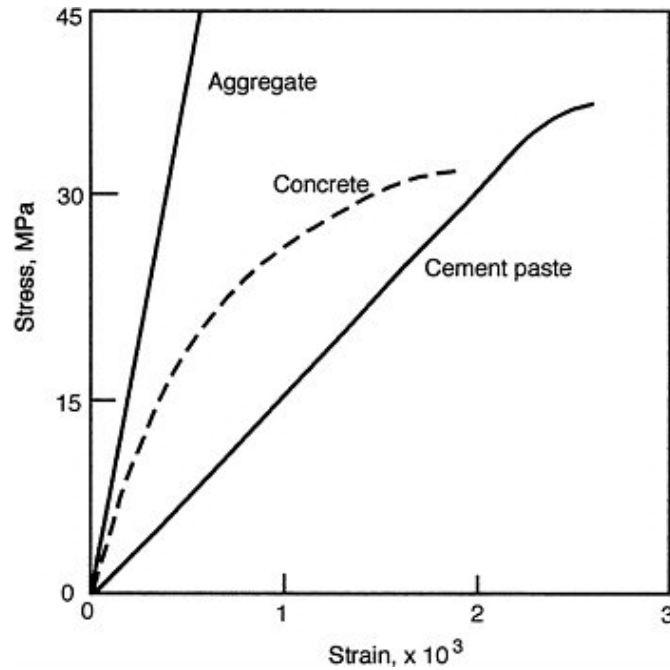


Figura 2.31. Relación tensión-deformación de la pasta de cemento, el árido y el hormigón
(fuente: nap.edu)

En la Figura 2.31 se puede observar que la rigidez de los áridos es notablemente superior a la de la pasta de cemento. Adicionalmente, el comportamiento del hormigón, en este caso un hormigón convencional, tiende a ser más próximo al comportamiento de los áridos en el tramo lineal, lo que refleja el papel que desempeñan en la rigidez del material. El comportamiento no lineal del módulo de elasticidad del hormigón está asociado a la formación de microfisuras en la interfase pasta-árido.

Al igual que en la resistencia a compresión del HAC, el contenido y las propiedades de los áridos influyen directamente en el módulo de elasticidad del hormigón. Los áridos con mayor angulosidad y rugosidad proporcionan módulos más elevados al presentar mejor adherencia con la pasta de cemento.

Como se ha puesto de manifiesto, con la finalidad de incrementar la fluidez y la resistencia a la segregación, el HAC presenta menor proporción de árido grueso y, en consecuencia, mayor contenido de pasta. El incremento en el contenido de pasta, resulta en la disminución del módulo de elasticidad del HAC; sin embargo, la proporción en la que disminuye esta propiedad dependerá de las propiedades de la pasta [95].

Según el Comité Técnico 228-MPS de RILEM on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete [51], además de la disminución del módulo de elasticidad, se registran incrementos en los valores máximos de deformación, al comparar hormigones autocompactantes y convencionales con igual resistencia a compresión. Adicionalmente, se menciona que, la disminución de la relación tensión-deformación posiblemente esté asociada al tipo de adición empleada, lo que requiere de estudios posteriores.

En los datos aportados por Domone [93], la rigidez del HAC es 40% menor al ser comparada con mezclas de hormigón convencional a niveles de resistencias bajas. Sin embargo, esta diferencia se reduce a un 5% en hormigones de alta resistencia.

2.3.6.3 Resistencia a tracción

La resistencia a tracción es un parámetro empleado para el diseño de estructuras de hormigón armado, dado que condiciona el diseño del refuerzo de acero, y en la evaluación de la aparición de fisuras a causa de las solicitaciones o de la propia retracción del hormigón.

La resistencia a tracción se puede determinar mediante tres métodos: tracción uniaxial, flexión o tracción indirecta. La tracción indirecta es el procedimiento más utilizado, debido a la facilidad de su ejecución. Además, permite emplear las mismas probetas cilíndricas que se fabrican para determinar la resistencia a compresión.

Según Neville [97], la resistencia a tracción indirecta está asociada a la resistencia a compresión del material. La correlación entre estos dos factores no es lineal: a mayor resistencia a compresión del hormigón, el incremento de la resistencia a tracción indirecta es menor.

Al estar relacionada la resistencia a tracción indirecta con la resistencia a compresión del hormigón, los parámetros que influyen en ambas propiedades son, fundamentalmente, los mismos. Principalmente, la resistencia a tracción está asociada a la calidad de la zona de transición pasta-árido.

Algunos autores afirman que el uso de pastas con estructuras más cerradas, como es el caso del HAC, se refleja en una mejor adherencia de ésta con los áridos de la mezcla, lo que permite obtener valores de resistencia a tracción superiores [92,99]. En el estudio realizado por Domone [93] prácticamente no aprecia diferencias en la resistencia a tracción indirecta del HAC. En las propiedades estructurales, EFNARC [43] menciona que el contenido de pasta del HAC no influye, significativamente, en la resistencia a tracción y que presenta el mismo valor que la de un hormigón convencional, mientras que Rozière et al [95], observa que, a mayor contenido de pasta, ocurre una ligera disminución de la resistencia a tracción del HAC.

El Comité Técnico 228-MPS de RILEM [51] pone de manifiesto que la tracción indirecta del HAC y del HVC fabricados con la misma cantidad de cemento y relación agua/cemento está directamente influenciada por el tipo de árido empleado. Mayor concentración y tamaño máximo de árido incrementa la resistencia a tracción indirecta.

2.3.6.4 Retracción

La retracción hace referencia al acortamiento diferido en el tiempo que sufre el hormigón debido, por un lado, al gradiente de humedades existente entre la estructura y el medio que la rodea denominada retracción por secado y, por otro, por la pérdida de agua consumida durante el proceso de hidratación del cemento definida como retracción autógena.

La retracción autógena sucede a temprana edad, mientras que, la retracción por secado sucede tras finalizar el fraguado de la mezcla. En hormigones con altos contenidos de cemento y baja relación agua/cemento ($< 0,42$), se incrementa la retracción autógena. Este efecto se magnifica con el uso de adiciones activas y filler [100].

La retracción por secado disminuye a menor relación agua/cemento, mientras que, aumenta a mayor contenido de finos y menor contenido de árido grueso. Un factor que influye de manera directa en la retracción por secado es la velocidad de secado. Cuando es muy alta, se generan esfuerzos de tracción en el material que pueden superar su resistencia a tracción, con la consiguiente aparición de fisuras antes de que la fluencia del hormigón relaje dichas tensiones. La fisuración debido a la retracción del hormigón puede ser controlada con el curado adecuado del hormigón durante los primeros 7 días [101].

Rozière et al. [95] observaron que la retracción por secado es proporcional al volumen de pasta, manteniendo la relación agua/cemento efectiva y la relación filler/cemento constantes, mientras que, la retracción disminuye al incrementar el volumen de pasta con mayor contenido de filler calizo.

Asimismo, Loser y A. Leeman [102] reportan la dependencia de la retracción con el volumen de pasta; mayor retracción cuanto mayor es el contenido de pasta y que la alta velocidad de secado en hormigones con restricción de movimiento es el factor que más influye en la fisuración.

En el estudio realizado por A. Darquennes et al. [103] se concluye que las relaciones agua/cemento bajas derivan en una retracción autógena acelerada. Adicionalmente, el porcentaje de sustitución de cemento por adiciones como las cenizas volantes o la escoria de alto horno debe ser evaluado en función del desarrollo de la retracción a temprana edad.

2.3.6.5 Durabilidad

La durabilidad del hormigón depende de la capacidad de circulación de fluidos a través de su masa, siendo la capilaridad del material y la zona de transición pasta-árido, la ruta de penetración de los agentes externos.

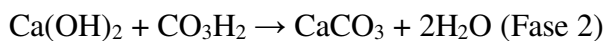
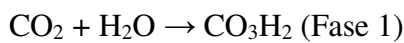
Las principales causas del deterioro del hormigón son: la carbonatación, los ataques por cloruros y sulfatos, la acción de los ciclos hielo-deshielo, el ataque químico, el desgaste por abrasión y la reacción entre el árido y ciertos componentes del cemento. La cinética en la que actúan los mecanismos de degradación, se relaciona con la temperatura, la humedad y la capacidad de transporte de fluidos [7].

Antes de analizar la respuesta del HAC frente a las causas del deterioro del hormigón es importante tener en cuenta que la microestructura del HAC depende de factores como la relación agua/finos, el tipo y contenido de adiciones, el tipo y la proporción de aditivos y el procedimiento de mezclado [47,47].

2.3.6.6 Carbonatación

La carbonatación es la reacción que se produce entre la portlandita y el anhídrido carbónico de la atmósfera que penetra, junto con vapor de agua, en el hormigón a través de los conductos capilares.

La reacción consta de dos fases. En una primera, el dióxido de carbono reacciona con el agua para formar ácido carbónico y, en la segunda fase, el ácido carbónico se combina con el hidróxido de calcio, formando carbonato cálcico insoluble.



Tras el endurecimiento, el hormigón presenta un pH que oscila entre 12 y 13, lo cual protege a las armaduras de la corrosión. La formación de carbonato cálcico reduce el pH del hormigón a valores comprendidos entre 9 y 9,5 que son insuficientes para la pasivación del acero.

S. Asia et al. [104], al comparar distintas dosificaciones de HAC y HVC, obtuvo una resistencia ligeramente inferior del HAC al deterioro por dióxido de carbono en condiciones aceleradas. Esto se fundamenta en que ambos hormigones presentaban valores similares de absorción por capilaridad.

El Comité Técnico TC 205-DSC de RILEM [47], basado en una cantidad limitada de datos, concluye que la carbonatación del HAC no difiere excesivamente de la del HVC.

2.3.6.7 Ataque por cloruros

Los cloruros en el hormigón pueden provenir de sus componentes, por estar sumergido total o parcialmente en agua de mar o por aportes ocasionales sobre la superficie, en forma de sales para el deshielo en carreteras o a través de la niebla salina por su proximidad a la costa.

El ion cloruro penetra en la red de poros del hormigón normalmente disuelto en agua, una parte queda ligada químicamente con el aluminato tricálcico del cemento para formar la Sal de Friedel, otra parte queda inmovilizada por enlaces físicos y el resto en forma de cloruros libres en la solución de poros [105]. En función de la concentración de cloruros libres puede llegar a ocurrir la corrosión por picadura del acero de refuerzo. Adicionalmente, al evaporarse el agua sobre o en el interior de los poros, cristalizan las sales generando, por el aumento de volumen, tensiones internas en el hormigón y, consecuentemente, fisuras.

La respuesta del HAC frente a la penetración de cloruros depende de la estructura de poros y de la composición iónica de los mismos. Zhu y Bartos [106] concluyen que la difusión del ion cloruro depende del tipo de adición empleada. Adicionalmente, comentan que la penetración de cloruros no es menor para el HAC con la misma resistencia o fabricado con la misma relación agua/cemento que para un HVC.

Otros autores han observado que la penetración del ion cloruro disminuye con el uso de adiciones, especialmente las de carácter puzolánico [56,107].

2.3.6.8 Ataque por sulfatos

Los sulfatos, tras penetrar por la red porosa del hormigón endurecido, reaccionan con el aluminato tricálcico del cemento, resultando en sulfoaluminato tricálcico hidratado (ettringita, bacilo del cemento o sal de Candlot), compuesto expansivo (los cristales son 2,5 veces de mayor volumen), lo que puede conducir a la desintegración del hormigón. En condiciones de humedad y bajas temperaturas (< 15 °C) los sulfatos pueden llegar a formar una sal compleja denominada taumasita que deteriora el hormigón (con o sin efectos expansivos) al debilitar la matriz de la pasta (gel C-S-H) a una velocidad muy lenta.

Para incrementar la resistencia frente al ataque de los iones sulfato, además de un adecuado tipo de cemento, se recomienda el uso de adiciones del tipo puzolánico como son las cenizas volantes, el humo de sílice y la escoria de horno alto en la fabricación de HAC debido a que densifican la microestructura del hormigón y reducen el tamaño de los

capilares. Además, el uso de filler calizo en cantidades elevadas hace que el hormigón sea más vulnerable al ataque por taumasita [47].

En el estudio realizado por Siad et al. [108], se comparan tres dosificaciones de HAC con distintos contenidos de cemento y tres tipos de adiciones con dosificaciones de HVC con el mismo contenido de cemento y relación agua/cemento. Se concluye que el HVC presenta mayor expansividad frente al HAC tras mantenerse sumergido en una solución de sulfato sódico. En las dosificaciones con filler calizo, la expansividad es mayor frente a las dosificaciones con ceniza volante o puzolana natural. Adicionalmente, este efecto se magnifica a mayor contenido de cemento.

2.3.6.9 Ciclos de hielo-deshielo

El incremento del 9% en volumen de las moléculas de agua al congelarse a bajas temperaturas en el interior de los poros del hormigón genera tensiones internas que se acumulan por la repetición de los ciclos hielo-deshielo, ocasionando la degradación del material.

La resistencia frente a los ciclos hielo-deshielo del HAC, al igual que en el HVC, depende de la red de poros, la capacidad de transporte de fluidos, las propiedades de la mezcla basadas en la relación agua/cemento, el tipo de cemento y las condiciones de curado.

Para prevenir el deterioro ocasionado por los ciclos hielo-deshielo, se recomienda el uso de aditivos aireantes que generan una red de pequeñas burbujas de aire estable y ordenada, que permite disipar las tensiones en el seno del hormigón. Sin embargo, en el HAC se debe prestar atención a la compatibilidad entre aditivos aireantes y superplastificantes [7]. Es posible mejorar la resistencia a los ciclos hielo-deshielo sin aditivos aireantes con relaciones agua/cemento bajas, con cantidades elevadas de cemento y planificando un curado óptimo.

El Comité Técnico TC 205-DSC [47] considera que los ciclos hielo-deshielo afectan al HAC en la misma proporción que un HVC debidamente dosificado y fabricado, en condiciones de saturación.

Yazici [107] realizó una evaluación del efecto de los ciclos hielo-deshielo de distintas dosificaciones de HAC al sustituir cemento por cenizas volantes y humo de sílice. Observó que la resistencia a compresión para las dosificaciones con un porcentaje del 30% de cenizas volantes y del 10% de humo de sílice, se incrementa tras 90 ciclos, lo cual está asociado a un efecto de curado extra aportado por los iones de sodio (Na^+). Dosis de cenizas volantes superiores al 40% generaron un efecto contrario.

2.3.6.10 Reacción álcali-árido

La reacción álcali-árido, en términos generales, comprende tres tipos de reacción: álcali-sílice, álcali-carbonato y álcali-silicato [49].

La solución intersticial resultante de la hidratación del cemento contiene hidróxidos de sodio y potasio (alcalinos) que, al disolverse con el agua aportada desde el exterior, pueden llegar a reaccionar con los minerales silíceos de algunos áridos, formando gel de sílice, que genera un importante aumento de volumen y, paralelamente, esfuerzos superiores a la resistencia a tracción del hormigón. Para que la reacción produzca fisuración y expansión, deben existir cantidades de sílice reactiva y de álcalis disponibles en proporciones suficientes en presencia del agua aportada por el exterior.

Existe muy poca información relacionada con la reacción álcali-árido en el HAC. El conocimiento y la experiencia adquirida del HVC en cuanto a este tipo de ataques, se están aplicando en el HAC, debido a que las propiedades que se han obtenido en la caracterización del HAC como la humedad presente, la alcalinidad de la solución intersticial y la presencia de áridos reactivos no es excesivamente diferente a la del hormigón convencional [47].

2.3.7 Experiencias de HAC fabricados con subproductos industriales

La búsqueda de materiales y métodos de construcción sostenibles ha propiciado el aprovechamiento de residuos en el HAC, con la finalidad de evitar su traslado y acumulación en vertederos.

Debido a la mayor cantidad de finos requerida por el HAC para presentar la fluidez y capacidad de relleno necesarias, además de, para mejorar la resistencia a la segregación, se ha estudiado la viabilidad de incorporar diferentes partículas de subproductos industriales en la fabricación de este tipo de hormigón como adiciones o sustitutos parciales del cemento portland.

Las adiciones más empleadas en las investigaciones como las escorias de alto horno, las cenizas volantes y el humo de sílice; como se ha manifestado anteriormente, son subproductos industriales, que debido a su carácter hidráulico o puzolánico, mejoran el comportamiento del HAC.

Si bien es cierto que las adiciones mencionadas se han empleado en la fabricación de hormigones y cementos, existen estudios novedosos en los que se han empleado otro tipo de residuos. Rozière et al. [109] han utilizado sedimentos depositados en los ríos aledaños a zonas industriales tras ser tratados mediante fosfatación y calcinación. Los sedimentos mencionados están compuestos, en parte, por metales pesados y otros contaminantes orgánicos. Las primeras experiencias con dichos sedimentos se realizaron con morteros. Los resultados obtenidos reflejaron una ligera disminución de la trabajabilidad a causa de la porosidad de las partículas de los sedimentos y un comportamiento puzolánico a largo plazo. A raíz de esto, se propuso emplearlos para la fabricación de HAC como sustituto del filler calizo. El HAC con sedimentos requirió de un incremento del volumen de pasta para obtener el mismo escurrimiento, resultando en un material con propiedades mecánicas comparables a los del hormigón de referencia.

Anastasiou, Papayianni y Papachristoforou [18] emplearon escorias del proceso de afino de la fabricación de acero como sustituto del cemento en la fabricación de HAC reforzado con fibras. Los resultados reflejaron un buen comportamiento en estado fresco, así como un incremento en las propiedades mecánicas y de durabilidad del HAC.

Existen otras investigaciones en las que los residuos o subproductos empleados en la fabricación de HAC se incorporan a las mezclas para sustituir a los áridos naturales.

Los residuos de hormigón tras su machaqueo y cribado se transforman en árido reciclado de hormigón. La incorporación de este material al HAC ha sido objeto de estudio por distintos autores [110-112]. Las conclusiones de los estudios coinciden en que el comportamiento mecánico del HAC resultante es inferior al convencional a mayor contenido de árido reciclado. Este efecto dependerá de las propiedades mecánicas del hormigón de origen del árido. Además y debido a su porosidad, el uso de áridos reciclados incrementa la demanda de agua de las mezclas para mantener el escurrimiento. Por otro lado, la densidad de los hormigones disminuye a medida que se incrementa la cantidad de árido reciclado.

Kou [113] preparó mezclas de HAC con vidrio reciclado como reemplazo de la fracción fina de árido. Para controlar la reacción álcali-sílice se utilizó como adición ceniza volante. El uso de este residuo (hasta un 30%) se reflejó en el incremento del escurrimiento de las mezclas, de la resistencia a la penetración de cloruros y en la disminución de la retracción. No obstante se observó que las propiedades mecánicas disminuían a mayor contenido del residuo.

A diferencia de los numerosos artículos científicos de HVC fabricados con escorias de HEA, en la actualidad son muy pocas las publicaciones de HAC con residuos siderúrgicos empleados como áridos. En el caso de las escorias de HEA derivadas de la fabricación de acero, se han encontrado las experiencias descritas a continuación.

Tomasiello y Felitti [114] fabricaron HAC con escorias negras de horno eléctrico generadas en la fabricación de acero con la finalidad de evaluar el efecto de la incorporación de estos subproductos en las propiedades en estado fresco y endurecido del HAC. En las mezclas, se utilizó la fracción de escoria (4-8 mm) combinada con adiciones como filler calizo o ceniza volante. Adicionalmente, se emplearon arenas y áridos naturales. Debido a que la fracción de mayor tamaño correspondía a un árido natural, el efecto de las escorias no fue tan acusado. Sin embargo, en estado fresco se observó una ligera disminución de la fluidez y de la capacidad de paso, mientras que, en estado endurecido, no se constataron grandes diferencias en la resistencia a compresión y se obtuvo un ligero incremento de la densidad.

Sheen, Le y Sun [115] fabricaron HAC con escorias de la etapa de fusión y afino generados en la fabricación de aceros inoxidables en hornos de arco eléctrico. Las escorias de la etapa de fusión, se han empleado como árido fino y grueso con sustituciones de 50% y 100%, mientras que, las escorias de la etapa de afino se han incorporado como sustituto del cemento con sustituciones de 10%, 20% y 30% en peso. Las mezclas se diseñaron utilizando cenizas volantes como adición y una cantidad importante de aditivo superplastificante.

Los resultados del estudio indican que un mayor contenido de escorias como árido, supone la disminución de la fluidez del HAC debido a la rugosidad y a la angulosidad de las partículas, que incrementan la fricción intergranular. Adicionalmente, el uso de las escorias como árido condujo al aumento de la resistencia a compresión, relacionado a una mejor interfase pasta-árido. A pesar de que las escorias se habían expuesto a la intemperie para su inertización, la presencia de óxidos de calcio y magnesio en la superficie generó efectos expansivos observados mediante cambios volumétricos de las probetas.

El uso de las escorias de la etapa de afino resultó en el incremento de la viscosidad de las mezclas y, a diferencia de las escorias de la etapa de fusión, la resistencia a compresión disminuyó ligeramente a los 28 días. Esta propiedad fue evolucionando con el paso del tiempo, hasta alcanzar valores comparables al HAC de control. Finalmente, determinaron que la mejor dosificación en cuanto a comportamiento mecánico y de durabilidad, es la que contenía 100% escorias de fusión y 20% de escorias de afino.

En las bases de datos no se han encontrado experiencias de HAC con la incorporación de escorias de horno de cubilote, uno de los objetivos de esta Tesis Doctoral.

2.4 Hormigón de alta resistencia

Un hormigón se considera de alta resistencia (HAR) cuando su resistencia a compresión es superior o igual a 55 MPa [116]. Debido al incremento del conocimiento con respecto a la disponibilidad de materiales, métodos de diseño y técnicas constructivas, la tecnología del hormigón de alta resistencia se mantiene en constante evolución.

Para garantizar el comportamiento mecánico, entre otras propiedades deseadas, en el HAR, las pruebas experimentales son parte esencial del proceso de diseño. En función de la aplicación para el cual va a ser destinado, se define la resistencia a compresión a una edad específica, siendo en la mayoría de los casos superior a los 28 días de curado tradicionales.

Al igual que en el HAC, se deben considerar ciertos aspectos durante la selección de los materiales, tales como, el tipo y la cantidad de cemento y adiciones, las propiedades de los áridos, el efecto y la compatibilidad de los aditivos, en particular, los aditivos superplastificantes de última generación indispensables para minimizar el contenido de agua en las mezclas.

El HAR suele elaborarse con finos puzolánicos (microsílice) que permiten incrementar la resistencia a compresión a largo plazo y, al mismo tiempo, aportar docilidad en estado fresco y reducir la temperatura de la mezcla durante el fraguado.

Los métodos de dosificación tradicionales de Fuller, Bolomey, De la Peña y Faury, no son adecuados para el diseño de HAR, debido a que incorporan contenidos de arena superiores a los necesarios. A pesar de no existir un método de dosificación específico para el HAR, se dispone de suficiente bibliografía que permite definir las pautas de diseño [117].

2.5 Hormigón de altas prestaciones

El aumento de la resistencia del hormigón por encima de los valores convencionales permitió asignarle a los hormigones especiales la categoría de alta resistencia. No obstante, las mejoras asociadas al incremento de propiedades tales como, mayor trabajabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia a la flexión, menor aparición de microfisuras y permeabilidad, condujeron a denominarlo como hormigón de altas prestaciones (HAP).

El HAP se define como un hormigón diseñado para aportar un comportamiento optimizado para un conjunto de solicitaciones y condiciones de exposición acorde a los requerimientos de puesta en obra, vida en servicio y durabilidad [118].

La composición del HAP se caracteriza por incorporar cantidades de cemento elevadas (450-500 kg/m³) con una relación agua/cemento baja (< 0,4), adiciones reactivas (humo de sílice, escorias de alto horno o cenizas volantes) y aditivos superplastificantes. Las pastas confeccionadas bajo estas condiciones consiguen incrementar las prestaciones mecánicas y reducir notablemente la permeabilidad.

El aumento de la capacidad resistente de la pasta de cemento en el HAP permite agotar la capacidad resistente del árido. Esto requiere seleccionar los áridos tomando en consideración las características geométricas y mecánicas, como el tamaño máximo, la rugosidad y la superficie específica de las partículas, así como, también, la resistencia a la compresión y a la fragmentación. Cualquiera de estas propiedades puede limitar la capacidad resistente del HAP.

En la actualidad, los HAP se sitúan en un intervalo de resistencia a compresión comprendido entre 70 y 150 MPa [54]. Las superficies de rotura se caracterizan por presentar planos de corte que afectan al mortero y al árido por igual, reflejando la magnífica adherencia pasta-árido.

El HAP resulta ser económico en relación al HVC, a pesar de su elevado coste inicial, puesto que en construcción incrementa la vida en servicio de la estructura y reduce su deterioro, lo cual minimiza el coste global del proyecto. La incorporación de subproductos industriales en el HAP supondría aumentar los beneficios asociados al uso de este tipo de hormigones especiales.

Capítulo 3 Materiales y metodología experimental

3.1 Introducción

En este capítulo, se describen los materiales empleados en la fabricación de mezclas, así como, también, los procedimientos experimentales llevados a cabo inicialmente sobre los componentes de manera individual y, posteriormente, sobre las mezclas de mortero y hormigón, tanto en estado fresco como endurecido. Los resultados y el análisis se presentan en el Capítulo 4.

El presente trabajo experimental tiene como objetivo principal fabricar hormigones autocompactantes de altas prestaciones, empleando escorias siderúrgicas generadas en distintos procesos, partiendo del estudio pormenorizado de las fases químicas que las componen, de sus características físico-mecánicas y del comportamiento de morteros compuestos que incorporan las mismas como arena y/o conglomerante.

Para la confección de hormigones autocompactantes de elevada resistencia y baja permeabilidad, se han utilizado en el transcurso de la investigación, áridos naturales y subproductos industriales, clasificados en distintas fracciones granulométricas. Como punto de partida, se ha elegido un árido natural de reconocida competencia y naturaleza ofítica, que ha permitido compararlo con el árido de escoria de horno eléctrico de arco, caracterizado por su alta densidad, pero que requiere comprobar que sus propiedades mecánicas son adecuadas cuando se extrema el nivel de exigencia.

Además de la idoneidad resistente, es necesario calibrar la influencia de la incorporación de las escorias siderúrgicas en el comportamiento reológico del HAC. Para ello, se ha realizado un estudio con mezclas de morteros, que permite valorar la incidencia de la fracción fina de escoria de horno eléctrico en la fluidez de dichas mezclas.

Como se ha puesto de manifiesto en el Capítulo 2, en la fabricación de HAC se emplean adiciones cuya finalidad es aportar la cantidad de finos necesaria en las mezclas, fundamentalmente para incrementar la resistencia a la segregación y la capacidad de relleno. Teniendo esto en consideración, se han fabricado morteros autocompactantes con dos de las adiciones más empleadas en la fabricación de HAC: filler calizo y ceniza volante. Estos finos han servido de referencia para la comparación con la tercera adición empleada, la escoria de horno de cubilote, transformada en material fino como un posible proceso de valorización.

Tras caracterizar las fases de mortero y árido, se han diseñado y fabricado hormigones HAC con las adiciones y áridos disponibles. Una vez endurecidas las mezclas, se ha programado una amplia campaña experimental de ensayos, obteniéndose las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de las combinaciones propuestas.

3.2 *Materiales*

El comportamiento del esqueleto granular del hormigón depende de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de las partículas que lo componen. En el caso del HAC, se distingue una mayor sensibilidad, dadas las particulares exigencias de fluidez en estado fresco.

En el transcurso de la investigación, los áridos naturales empleados han sido: arena silíceo, arena de ofita y gravilla de ofita. En el caso de las escorias siderúrgicas, se ha utilizado arena y gravilla de escoria de horno eléctrico. Se ha descartado incorporar árido grueso de tamaño superior a 12 mm, para evitar problemas de bloqueo y segregación en el HAC.

3.2.1 Escoria de horno eléctrico de arco

La escoria de horno eléctrico de arco o escoria negra, se genera tras la fase de fusión del proceso de fabricación de aceros en el horno eléctrico de arco. Particularmente, las escorias empleadas en esta Tesis Doctoral proceden de la planta de la empresa Global Steel Wire, del grupo CELSA, ubicada en Santander, Figura 3.1.



Figura 3.1. Acería Global Steel Wire (izq.) y bobinas de cordones de pretensado (dcha.).

En la Figura 3.2 se puede apreciar el árido obtenido tras el proceso de separación mediante una planta móvil de machaqueo situada en la propia acería. El árido siderúrgico presenta color gris con tonos oscuros, textura muy rugosa y cavernosa en algunas partículas. Adicionalmente, se observan pequeñas incrustaciones de hierro que al oxidarse, se tornan en zonas de tonos marrones.



Figura 3.2. Aspecto de la grava de escoria de horno eléctrico de arco durante una visita a la acería.

En el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM), se han llevado a cabo estudios de investigación en los que se han elaborado hormigones convencionales utilizando como único árido escorias negras. A esto se suman las experiencias disponibles en la literatura científica con aplicaciones en la fabricación de morteros, hormigones estructurales y bases granulares para firmes de carreteras, que avalan la aptitud de este material para ser empleado en el sector de la construcción.

El primer paso para el empleo de las escorias de HEA consiste en analizar sus propiedades químicas, por ser indispensables para determinar su impacto ambiental, y su capacidad de valorización y posterior transformación en árido. El Decreto 104/2006 de la Comunidad Autónoma de Cantabria [5], cuando su aplicación permita la transferencia de componentes, exige realizar un test de lixiviados para obtener la concentración de los elementos químicos presentes en la escoria, que deben ser comparados con los límites fijados en el propio Decreto y determinar el contenido de cal libre y magnesia para evitar problemas de inestabilidad volumétrica y dimensional de las escorias cuando sean utilizadas en el hormigón.

Las propiedades geométricas, físicas y mecánicas de la escoria de HEA permiten determinar la aptitud del material para la confección de hormigón de acuerdo a la normativa vigente y son necesarias para el diseño de mezclas de hormigón. En el estudio experimental, se presta especial atención a la capacidad resistente de la escoria como árido grueso debido a los fines a los que se destinará, hormigones de alta resistencia.

Las escorias negras se recibieron en el LADICIM, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, en sacas de 1 m³ de capacidad distribuidas en las siguientes fracciones, Figura 3.3 a Figura 3.6:



Figura 3.3. Arena de escoria de horno eléctrico de arco ($0 < D < 6$ mm).



Figura 3.4. Gravilla de escoria de horno eléctrico de arco ($6 < D < 12$ mm).



Figura 3.5. Grava de escoria de horno eléctrico de arco ($12 < D < 20$ mm).



Figura 3.6. Grava de escoria de horno eléctrico de arco ($D > 25 \text{ mm}$).

Tras recibir el material se procedió con la caracterización completa del árido. A continuación se describen las actuaciones llevadas a cabo:

3.2.1.1 Caracterización química y mineralógica

El análisis de la escoria negra se ha realizado mediante distintas técnicas analíticas que han permitido establecer su composición química, mineralógica y su microestructura.

3.2.1.1.1 Fluorescencia de rayos X

La primera caracterización química de la escoria de HEA se ha definido mediante fluorescencia de rayos X (XRF) con el propósito de determinar la concentración de compuestos en óxidos que contiene el material. El resultado semicuantitativo obtenido se proporciona en porcentaje.

El ensayo lo ha practicado el servicio de caracterización de materiales de la Universidad de Cantabria (SERCAMAT). Para ello, se ha utilizado un espectrómetro marca Thermo modelo ARL-ADVANT-XP, Figura 3.7.

En primer lugar, la muestra se somete a un proceso de secado y molienda hasta reducirlo a polvo (< 0,063 mm). A continuación, se añade una capa de 6 micras de polipropileno en un portamuestras, se coloca encima de éste la muestra pulverulenta y se introduce en el equipo para proceder con el análisis.



Figura 3.7. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

En la Tabla 3.1, se recogen los resultados de la fluorescencia de rayos X de la escoria de HEA. Cabe mencionar que mediante esta técnica se determina la concentración de los compuestos cristalinos del material, sin detectar si están libres o combinados.

Tabla 3.1. Análisis de la escoria de horno eléctrico de arco mediante fluorescencia de rayos X.

Compuesto	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	Cr_2O_3	TiO_2	Resto
[% peso]	37,90	30,26	12,0	7,40	4,93	4,53	1,15	0,53	< 0,50

De los resultados obtenidos se comprueba que los componentes mayoritarios son óxidos de hierro, calcio, silicio y aluminio. En menor proporción aparecen óxidos de manganeso y magnesio. Finalmente, se han detectado concentraciones muy pequeñas de óxidos de cromo y titanio probablemente generados durante la inyección de oxígeno en el caldo.

3.2.1.1.2 Difracción de rayos X

La caracterización de la estructura de las escorias de HEA, mayoritariamente cristalina, se determinó mediante difracción de rayos X.

Los espectros de difracción de rayos X se han obtenido en el Departamento CITIMAC de la Universidad de Cantabria con un equipo comercial Bruker D2, Figura 3.8, provisto de un tubo de Cu que genera rayos X con longitud de onda de $\lambda = 1,5418 \cdot 10^{-10}$ m, a una potencia de trabajo de 30 kV/10 mA. Las muestras fueron previamente pulverizadas en un mortero de ágata y colocadas en un portamuestras convencional, Figura 3.9. El espectro fue recogido en ángulos 2θ entre $6-80^\circ$ ($\Delta 2\theta = 0,02^\circ$) a temperatura ambiente, con un tiempo de integración de 10 segundos por paso.

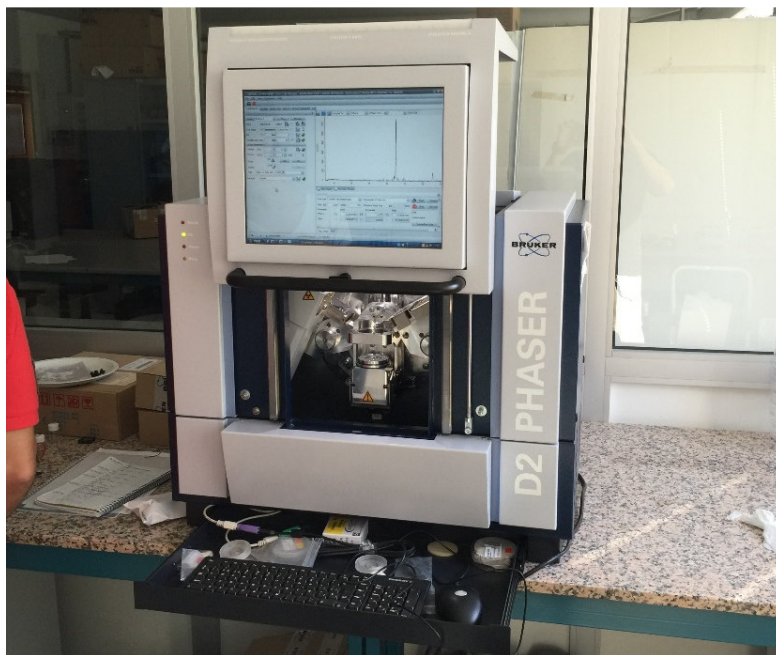


Figura 3.8. Difractómetro de rayos X empleado.

Tras obtener el difractograma, mediante la ley de Bragg se evalúa el ángulo y la intensidad de los picos y se identifica la composición mineralógica de la escoria. La interpretación del difractograma se ha realizado mediante inspección visual por comparación con los espectros de la tablas JPDS (simultáneamente posición e intensidades relativas de los picos), utilizando el programa EVA, suministrado por Bruker. Este programa permite hacer correcciones sencillas de los datos experimentales y estimar someramente el porcentaje de cada fase en la muestra.

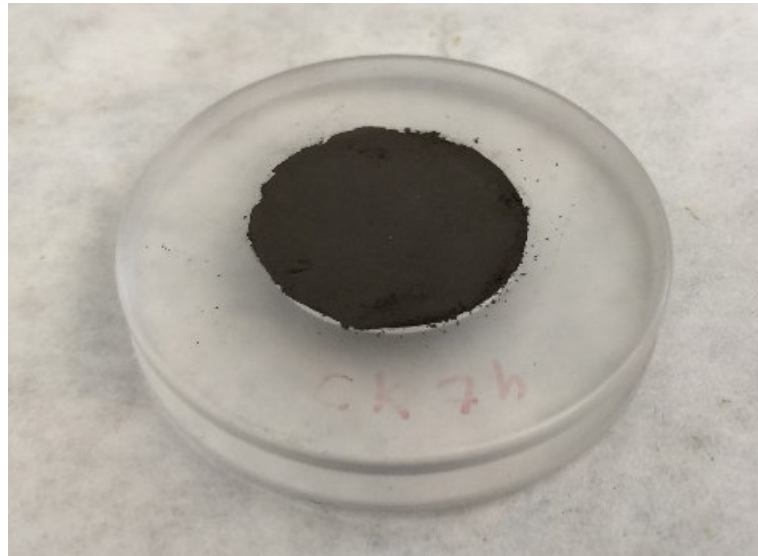


Figura 3.9. Muestra empleada para la difracción de rayos X.

Mediante esta técnica es difícil precisar el porcentaje de las fases detectadas, a no ser que se realicen refinamientos de tipo Rietveld, por lo que es más prudente calificar la presencia de los compuestos de manera semi-cuantitativa como: alta, media y baja.

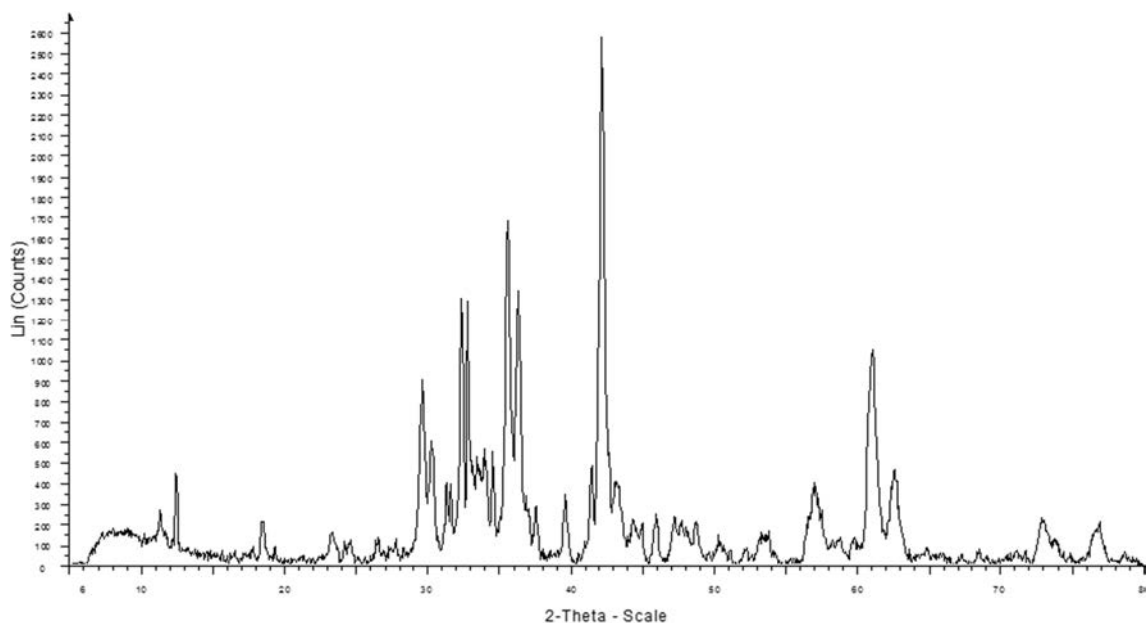


Figura 3.10. Difracción de rayos X de la escoria de horno eléctrico de arco.

En el difractograma de rayos X, Figura 3.10, se pueden apreciar los picos de los principales componentes detectados en la escoria analizada. En la Tabla 3.2, se resumen los compuestos presentes en la muestra de escoria.

Tabla 3.2. Compuestos detectados en la difracción de rayos X.

<i>Mineral</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Concentración</i>
<i>Wustita</i>	<i>FeO</i>	<i>Alta</i>
<i>Magnetita</i>	<i>Fe₃O₄</i>	<i>Alta</i>
<i>Larnita</i>	<i>Ca₂(SiO₄)</i>	<i>Media</i>
<i>Parawollastonita</i>	<i>CaSiO₃</i>	<i>Media</i>
<i>Óxido de Calcio Manganeso</i>	<i>Ca₃Mn₂O₇</i>	<i>Media</i>
<i>Nacrita</i>	<i>Al₂Si₂O₅(OH)₄</i>	<i>Baja</i>
<i>Alumino silicato cálcico hidratado</i>	<i>CaAl₂Si₇O₁₈·3.5H₂O</i>	<i>Baja</i>

Los resultados obtenidos en la difracción permiten separar los compuestos en dos grupos, los óxidos y los silicatos.

Los óxidos detectados se componen, mayoritariamente, por óxidos de hierro, en mayor proporción se encuentra la wustita, seguido por la magnetita. Adicionalmente, se ha detectado óxido de calcio-manganeso aunque en una proporción media.

En cuanto a los silicatos cálcicos, se detectó en proporción media Larnita, seguido de Parawollastonita. Finalmente, se detectó en menor proporción Metaheluandita que corresponde a un alumino silicato cálcico hidratado.

Cabe destacar que no se ha detectado cal libre. Su concentración es tan pequeña que se puede enmascarar con los picos de Larnita. Asimismo, la concentración de Portlandita que corresponde a la cal libre hidratada, es mínima.

El contenido de magnesia libre es muy pequeño; los picos de Periclusa y Brucita que corresponde a la Periclusa hidratada son de baja intensidad.

3.2.1.1.3 Espectroscopía por infrarrojos

Para contrastar la composición mineralógica obtenida mediante difracción de rayos X, se ha obtenido el espectro de infrarrojos empleando un equipo modelo Nicolet Nexus de la marca Thermo con un microscopio acoplado a la bancada, Figura 3.11. El ensayo se ha llevado a cabo en el servicio de caracterización de materiales de la Universidad de Cantabria (SERCAMAT).

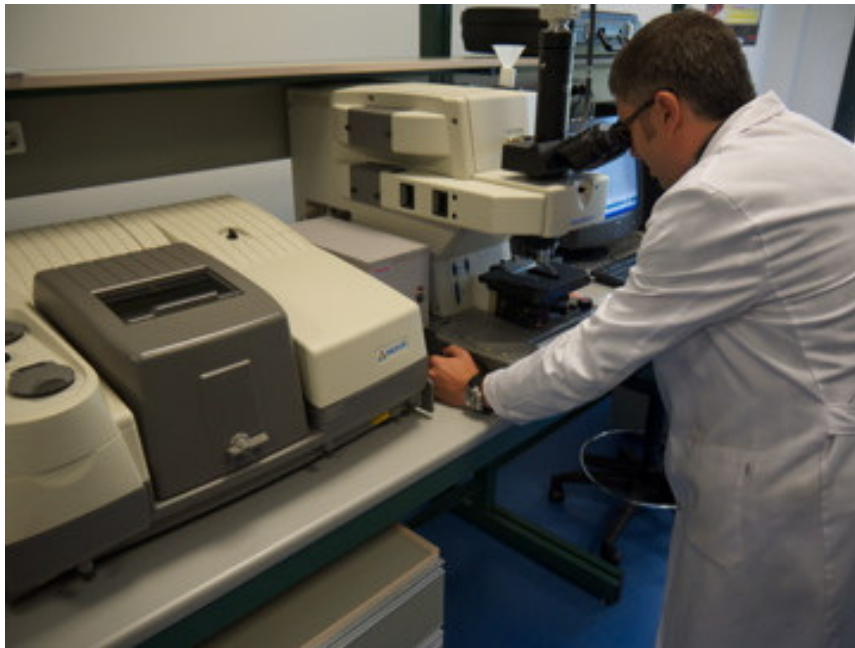


Figura 3.11. *Determinación del espectro de infrarrojos en el SERCAMAT.*

La identificación de los compuestos cristalinos presentes se ha realizado mediante la transformada de Fourier.

Una pequeña cantidad de muestra para ser analizada se combina en un mortero con bromuro de potasio en una relación 1:20. Posteriormente la mezcla se compacta en una prensa para formar una cápsula comprimida, Figura 3.12.



Figura 3.12. Preparación de la muestra para la espectroscopía mediante infrarrojos.

La interpretación del espectro obtenido para la identificación de los minerales, Figura 3.13, se realiza mediante la comparación con otros espectros IR de muestras puras.

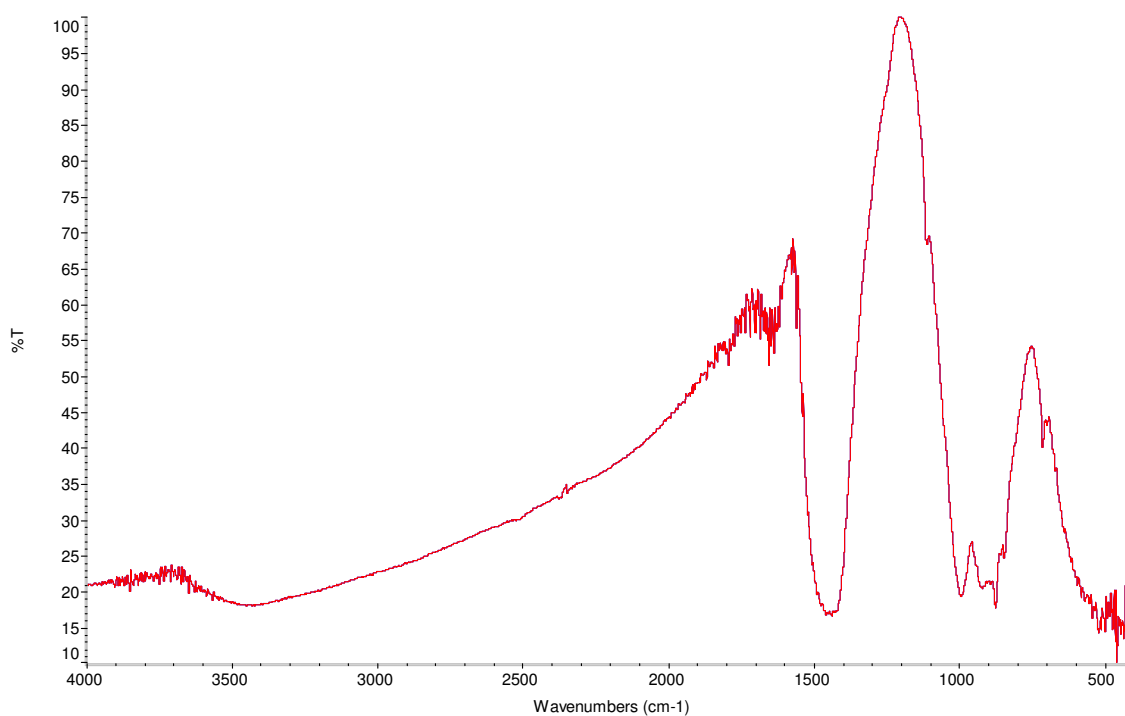


Figura 3.13. Espectro de absorción IR de la muestra de escoria de horno eléctrico de arco.

El espectro obtenido ha permitido detectar los siguientes compuestos:

- Óxidos de hierro (wustita, magnetita), picos en 2400 cm^{-1} , $1400\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ y $300\text{-}600\text{ cm}^{-1}$.
- Silicatos y aluminosilicatos, con bandas de vibración entre $800\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ y 500 cm^{-1} .
- Óxido de calcio por sus picos en las frecuencias situadas en torno a $1400\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ y en 910 cm^{-1} .

Estos resultados confirman los análisis realizados mediante las técnicas presentadas en los apartados anteriores.

3.2.1.1.4 Expansividad

El análisis de la expansividad potencial de la escoria de HEA se ha encargado a la empresa TRIAX mediante la estabilidad volumétrica de acuerdo al procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1744-1: Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico [119]. La posible existencia de cal libre y magnesia puede llegar a ocasionar fenómenos expansivos en el hormigón tras hidratarse, en el caso de la magnesia estos fenómenos ocurren diferidos en el tiempo, llegando a ocasionar la fisuración de los elementos de hormigón.

El ensayo consiste en someter una muestra de 4,5 kg de escoria con una distribución granulométrica específica a un envejecimiento acelerado. Para ello, se seca el material en una estufa a $105 \pm 5\text{ °C}$, hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, se compacta en un cilindro metálico con la base perforada. Debajo del cilindro se sitúa un depósito con agua que se calienta, mediante calefactores, hasta 100 °C para generar vapor de agua a presión atmosférica. La capa de escorias se coloca entre dos capas de filtro y se cubre con una capa plana de esferas de vidrio lubricadas. En la parte superior del cilindro se coloca una placa con un comparador en el centro que permite registrar el desplazamiento ocasionado por la hidratación acelerada de los productos expansivos presentes en la escoria como se puede apreciar en la Figura 3.14.



Figura 3.14. Equipo de ensayo empleado en la determinación de la expansividad de las escorias de horno eléctrico de arco.

A pesar de que el contenido total de magnesia de las escorias obtenido en la fluorescencia de rayos X es menor a 5%, las muestras se han sometido al vapor durante 168 horas a modo de comprobación.

El aumento de volumen se determina sobre dos probetas y el resultado se expresa en porcentaje respecto al volumen original. Los resultados obtenidos a 24 y 168 horas se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Expansividad de las escorias de horno eléctrico de arco.

<i>Tiempo transcurrido</i>	<i>Expansión [% volumen]</i>
<i>24 horas</i>	<i>0,16</i>
<i>168 horas</i>	<i>0,17</i>

3.2.1.1.5 Microscopía electrónica de barrido

Se han observado partículas de escorias de distintas fracciones mediante microscopía electrónica de barrido realizando microanálisis por energía dispersiva de rayos X (EDS) en distintas zonas representativas de las partículas elegidas aleatoriamente. Esta técnica permite obtener imágenes a escalas muy pequeñas de gran resolución y espectros de gran precisión.

El análisis se ha realizado empleando con un microscopio electrónico de barrido Zeiss, modelo EVO MA15, Figura 3.15. Los resultados que se presentan, se han obtenido mediante fluorescencia de rayos X por energía dispersiva que, en primer lugar, reconoce la concentración de los distintos elementos químicos del material y, mediante transformación estequiométrica, convierte el resultado en concentración de compuestos cristalinos.



Figura 3.15. Microscopio electrónico de barrido.

Se han realizado análisis superficiales sobre muestras de gravilla y arena. Para evitar la contaminación del interior de la cámara de vacío por el polvo adherido a la superficie de las partículas, éste fue eliminado con un lavado previo con agua.

Adicionalmente, se ha realizado un mapping del núcleo de una partícula de escoria de HEA obtenida del corte de una muestra de hormigón, Figura 3.18. El mapping permite identificar los elementos por regiones tras realizar un barrido de un área delimitada.

En la Figura 3.16 se presenta una micrografía de una partícula de gravilla, y en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

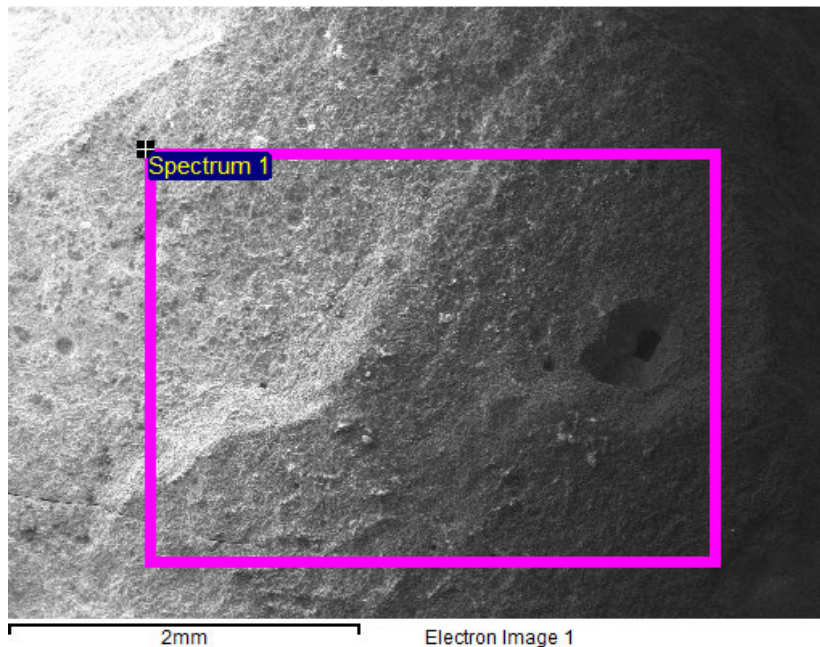


Figura 3.16. Micrografía de una partícula de gravilla de escoria de horno eléctrico de arco.

Tabla 3.4. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de gravilla de escoria de horno eléctrico de arco.

Elemento	O	Ca	Fe	Si	Al	Mg
[% peso]	32,38	31,94	22,16	7,19	4,03	2,30

Tabla 3.5. Compuestos obtenidos mediante estequiometría de óxidos tras el análisis EDS de una partícula de gravilla de escoria de horno eléctrico de arco.

Compuesto	CaO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
[% peso]	44,70	28,51	15,38	7,61	3,81

En la Figura 3.17 se presenta una micrografía de una partícula de arena, y en la Tabla 3.6 y Tabla 3.7, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

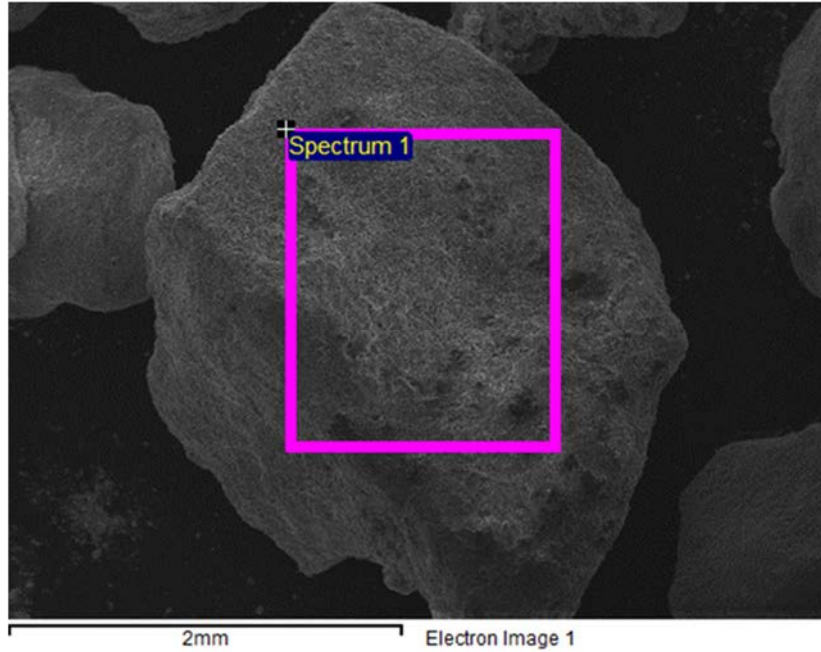


Figura 3.17. Micrografía de una partícula de arena de escoria de horno eléctrico de arco.

Tabla 3.6. Elementos detectados en el análisis EDS a mayor número de aumentos de una partícula de arena de escoria de horno eléctrico de arco.

Compuesto	O	Ca	Fe	Si	Al	Mg
[% peso]	33,17	39,97	13,92	8,38	2,98	1,58

Tabla 3.7. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de arena de escoria de horno eléctrico de arco.

Compuesto	CaO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
[% peso]	55,92	17,91	17,92	5,62	2,62

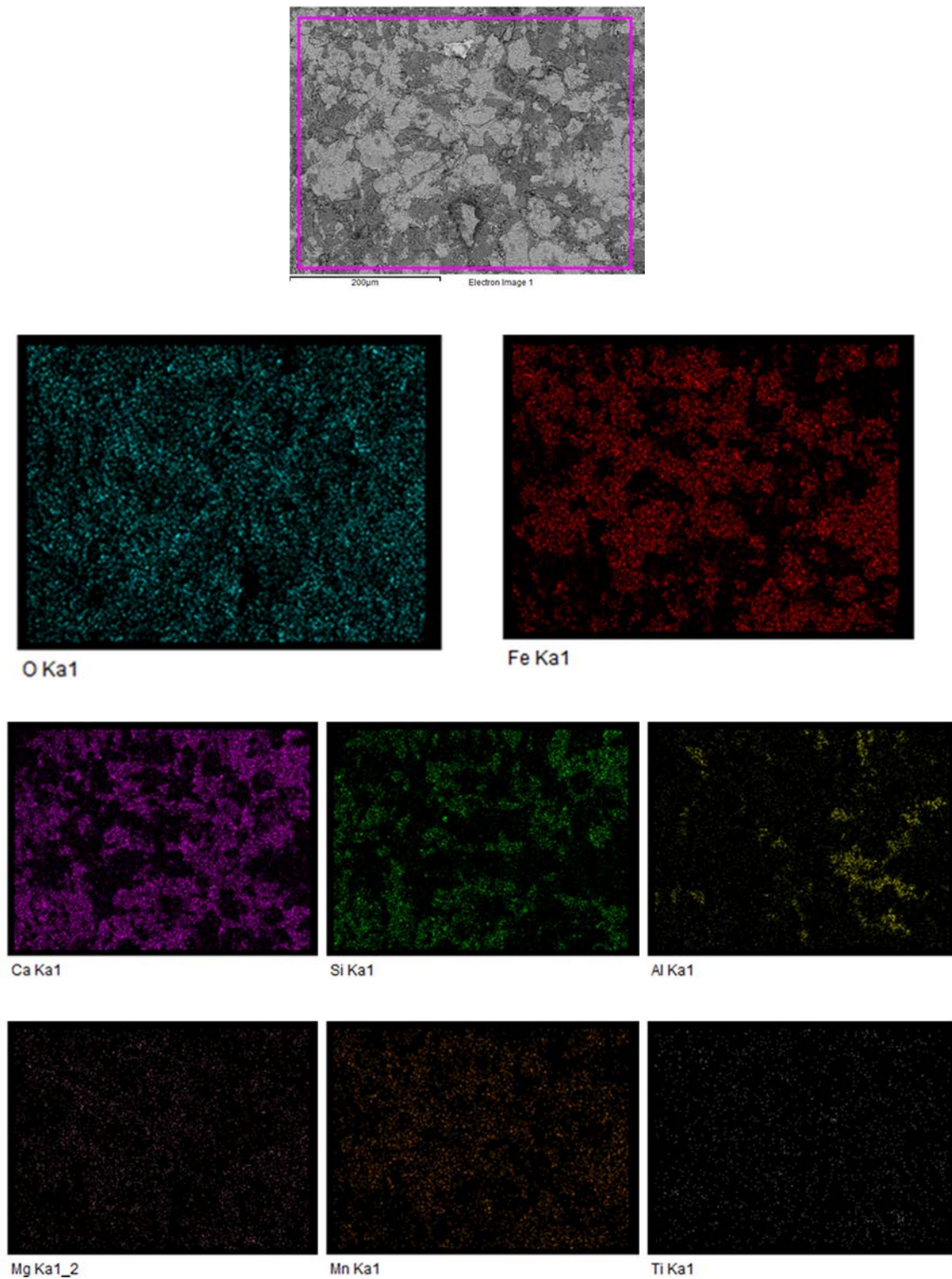


Figura 3.18. Resultado EDS de mapping realizado a la superficie de una partícula de gravilla de escoria de horno eléctrico de arco cortada transversalmente.

En la Figura 3.18 se aprecian, mayoritariamente, óxidos de hierro, seguidos de silicatos de calcio y aluminio. En menor proporción y distribuidos de manera uniforme, se observan óxidos de magnesio, manganeso y titanio.

3.2.1.1.6 Test de lixiviados

El ensayo de lixiviación se ha encargado a la empresa Soningo. El mismo, se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 12457-4: Caracterización de residuos. Lixiviación [120]. Para ello, se suministraron 2,5 kg de grava.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.8 y se comparan con los valores máximos admisibles para la valorización de escorias, incluidos en el Anexo I del Decreto 104/2006 de la Comunidad de Cantabria [5].

Tabla 3.8. Resultado del ensayo de lixiviación de las escorias de horno eléctrico de arco.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor límite</i>	<i>Resultado lixiviación</i>
<i>Humedad</i>	%	-	0,2
<i>pH</i>		-	11,44 (21,2 °C)
<i>Conductividad</i>	µS/cm	-	747 (20 °C)
<i>COD</i>	mg/kg m.s.	500	<50
<i>Cloruros</i>	mg/kg m.s.	800	<50
<i>Fenoles</i>	mg/kg m.s.	1	<1
<i>STD</i>	mg/kg m.s.	4.000	3.800
<i>Sulfatos</i>	mg/kg m.s.	1000	233
<i>Antimonio</i>	mg/kg m.s.	0,06	0,01
<i>Arsénico</i>	mg/kg m.s.	0,5	<0,02
<i>Bario</i>	mg/kg m.s.	20	2,71
<i>Cadmio</i>	mg/kg m.s.	0,04	0,01
<i>Cobre</i>	mg/kg m.s.	2	<0,17
<i>Cromo total</i>	mg/kg m.s.	0,5	<0,06
<i>Mercurio</i>	mg/kg m.s.	0,01	0,01
<i>Molibdeno</i>	mg/kg m.s.	0,5	0,21
<i>Níquel</i>	mg/kg m.s.	0,4	<0,08
<i>Plomo</i>	mg/kg m.s.	0,5	<0,12
<i>Zinc</i>	mg/kg m.s.	4	<0,55
<i>Selenio</i>	mg/kg m.s.	0,1	0,028

Los valores reflejados en la Tabla 3.8 validan la aptitud del material a ser empleado sin suponer un riesgo para el medio ambiente. Cabe destacar que el único valor que se encuentra en el límite del Decreto 104/2006 [5] es el contenido de mercurio.

3.2.1.2 Caracterización física

La densidad de la escoria de horno eléctrico es superior a la del árido natural, principalmente por la presencia de óxidos de hierro y de otros metales. Adicionalmente, las escorias negras, al ser más rugosas y porosas que el árido natural, Figura 3.19, absorben mayor cantidad de agua.

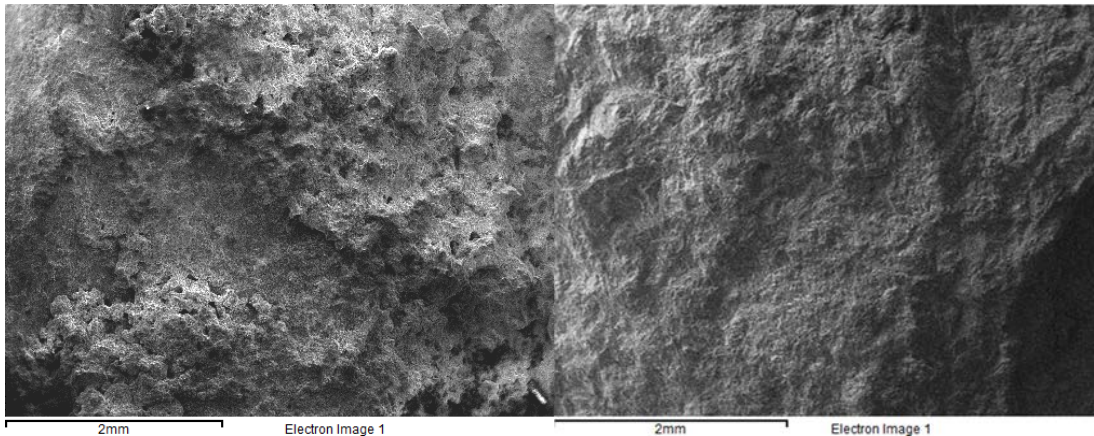


Figura 3.19. Comparación de la superficie de las partículas de gravilla de escoria y ofita.

3.2.1.2.1 Determinación de densidades reales, relativas y aparentes

La determinación de densidades, porosidad y absorción, se realiza mediante los procedimientos descritos en la norma UNE-EN 1097-3: Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad y UNE-EN 1097-6: Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua [121,122].

La caracterización de los áridos, se realizó en función del tipo de muestra a analizar, tras secado en estufa a 110 ± 5 °C hasta peso constante:

- Árido fino (arena):

De la fracción fina de árido, se determina la densidad real mediante técnicas de picnometría con ayuda de un volumenómetro de Le Chatelier.

En primer lugar, se llena parcialmente el volumenómetro con agua hasta un volumen inicial cualquiera de la primera escala (V_1) por debajo del ensanche esférico del matraz. A continuación, se obtiene la masa inicial de material fino a ensayar (M_1).



Figura 3.20. Aspecto del volumenómetro tras la incorporación del árido fino.

Posteriormente, se añade el árido fino en el matraz hasta que el nivel de agua se sitúa en cualquier valor de la segunda escala por encima del ensanche del cuello del matraz, Figura 3.20. Una vez introducido el árido en el picnómetro, se determina la masa de material restante en el recipiente (M_2) y se golpea la parte inferior del recipiente para asegurar la eliminación del aire atrapado entre las partículas. Finalmente, se determina el volumen alcanzado por el líquido (V_2).

La densidad real se obtiene por diferencia de las medidas obtenidas mediante la siguiente fórmula:

$$D_R = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

La densidad real empleada corresponde a la media de dos determinaciones y se presenta en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Densidad real de la arena de escoria de horno eléctrico de arco.

<i>Muestra</i>	<i>Dr [g/cm³]</i>
<i>Arena de escoria</i>	3,77

- Árido grueso (gravilla):

En el caso de la fracción gruesa, se determina la densidad aparente y relativa, porosidad y absorción mediante la saturación de los poros accesibles.

Tras el secado en estufa se registra el peso seco (P_s) de la muestra. A continuación, se introduce en una celda durante 24 horas con ayuda de una bomba de vacío, con la finalidad de extraer el aire de la celda y del interior de la porosidad abierta de las partículas de árido, Figura 3.21.



Figura 3.21. Celda de vacío para la saturación del árido.

Posteriormente, y aprovechando el vacío del recipiente, se añade agua con una manguera a la celda hasta que el nivel del agua se sitúa por encima de la muestra. La condición de vacío fomenta la eliminación de burbujas de aire en el líquido. El vacío se mantiene en la celda con las muestras sumergidas en agua durante otras 24 horas. Transcurrido este lapso de tiempo, se expone el interior de la celda a la presión atmosférica durante 24 horas. Tras finalizar el proceso de saturación, se seca la superficie de las partículas de la muestra con una bayeta hasta eliminar el brillo de las partículas de árido, e inmediatamente, se determina el peso para obtener el peso saturado con superficie seca (P_{SSS}).

El volumen aparente (V_a) de los áridos se determina empleando una balanza hidrostática al sumergir la muestra en agua, evitando en todo momento el contacto con las paredes del recipiente. Basado en el principio de Arquímedes y considerando que la densidad del agua es de $\gamma = 1 \text{ g/cm}^3$, la masa obtenida con la balanza hidrostática corresponde al volumen de agua desplazada por la muestra.

Con los valores registrados y las siguientes expresiones matemáticas extraídas de las normas, se obtienen los distintos valores para la fracción gruesa de áridos:

Volumen de la porosidad accesible, h_a (cm³).

$$h_a = \frac{P_{sss} - P_s}{\gamma} \quad (2)$$

Volumen relativo, V_r (cm³), que no considera los poros accesibles.

$$V_r = V_a - h_a \quad (3)$$

Densidad aparente, D_a (g/cm³), se determina con el volumen aparente.

$$D_a = \frac{P_s}{V_a} \quad (4)$$

Densidad relativa, D_r (g/cm³), se determina con el volumen relativo.

$$D_r = \frac{P_s}{V_r} \quad (5)$$

Las densidades aparentes y relativas presentadas en la Tabla 3.10 corresponden a la media de dos determinaciones.

Tabla 3.10. Densidades de la escoria de horno eléctrico de arco.

<i>Muestra</i>	<i>Densidad aparente [g/cm³]</i>	<i>Densidad relativa [g/cm³]</i>
<i>Gravilla de escoria</i>	3,65	3,85
<i>Grava de escoria</i>	3,69	3,85

Los resultados confirman que el árido de escoria de HEA es un árido de alta densidad que, al compararse con los áridos tradicionalmente empleados en la fabricación de hormigón, presenta una densidad un 30% superior.

3.2.1.2.2 Determinación del coeficiente de absorción de agua

El coeficiente de absorción de agua de los áridos siderúrgicos se ha obtenido a partir de las medidas realizadas para la determinación de las densidades. El coeficiente de absorción (A), se define como el cociente entre la masa de agua que absorbe el árido en condiciones de saturación y el peso seco. Los resultados se presentan como porcentaje en peso y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$A(\%) = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100 \tag{6}$$

La porosidad de las fracciones gruesas se han obtenido mediante la media de dos determinaciones y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Absorción de la escoria de horno eléctrico de arco.

<i>Muestra</i>	<i>Absorción de agua [% peso]</i>
<i>Gravilla de escoria</i>	<i>1,43</i>
<i>Grava de escoria</i>	<i>1,11</i>

Como se ha puesto de manifiesto, las escorias de horno eléctrico presentan una elevada densidad lo que puede resultar en valores de absorción bajos, no obstante, la demanda de agua absorbida es inferior al límite establecido por la EHE-08 [7].

3.2.1.2.3 Determinación de la porosidad accesible

Del mismo modo que se calcula el coeficiente de absorción de agua, la porosidad accesible de las fracciones gruesas de árido siderúrgico se obtiene con las medidas realizadas para la determinación de las densidades y lo recogido en la norma UNE-EN 1097-3:1999 [121].

La porosidad (P) del árido grueso, se define como el cociente entre el volumen de los poros accesibles y el volumen aparente de la muestra. Los resultados se presentan como porcentaje en volumen y se obtienen mediante la siguiente fórmula:

$$P(\%) = \frac{h_a}{V_a} \times 100 \quad (7)$$

Sustituyendo h_a según (2) y considerando la densidad del agua igual a 1 g/cm^3 se obtiene la siguiente expresión:

$$P(\%) = \frac{P_{sss} - P_s}{V_a} \times 100 \quad (8)$$

La porosidad se ha obtenido mediante dos determinaciones. Los resultados que se presentan en la Tabla 3.12 corresponden al valor medio.

Tabla 3.12. Porosidad de la escoria de horno eléctrico de arco.

<i>Muestra</i>	<i>Porosidad [% volumen]</i>
<i>Gravilla de escoria</i>	5,22
<i>Grava de escoria</i>	4,09

De los resultados obtenidos de porosidad y absorción se observa que, a medida que disminuye el tamaño máximo de la fracción, los valores de ambas propiedades aumentan.

3.2.1.3 Caracterización morfológica

El estudio de la geometría de las partículas de escorias de horno eléctrico, se inició con la observación de la forma, la textura y el color, características ya descritas en apartados anteriores.

Posteriormente sobre las fracciones de árido grueso se determinó el índice de lajas y, finalmente, se obtuvo la distribución granulométrica de las diferentes fracciones.

3.2.1.3.1 Determinación del índice de lajas

El índice de lajas, se determina siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 933-3: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas [123]. Este ensayo se ha realizado sobre la gravilla y la grava de escoria negra. Como punto de partida, se han secado las muestras en estufa a 110 ± 5 °C y, tras enfriarse, se han separado mediante tamizado en un conjunto de fracciones granulométricas d_i/D_i (tamaño mínimo/tamaño máximo), rechazando aquellas partículas cuyos tamaños sean menores de 4 mm.

Tras separar y determinar la masa de las fracciones granulométricas retenidas, se procede a cribar cada fracción de forma manual durante 1 minuto, empleando el tamiz de barras correspondiente a cada fracción, en cada caso, siendo la separación entre las barras igual a $D_i/2$, Figura 3.22. A continuación, se determina la masa de árido de cada fracción que pasa a través de dicho tamiz.

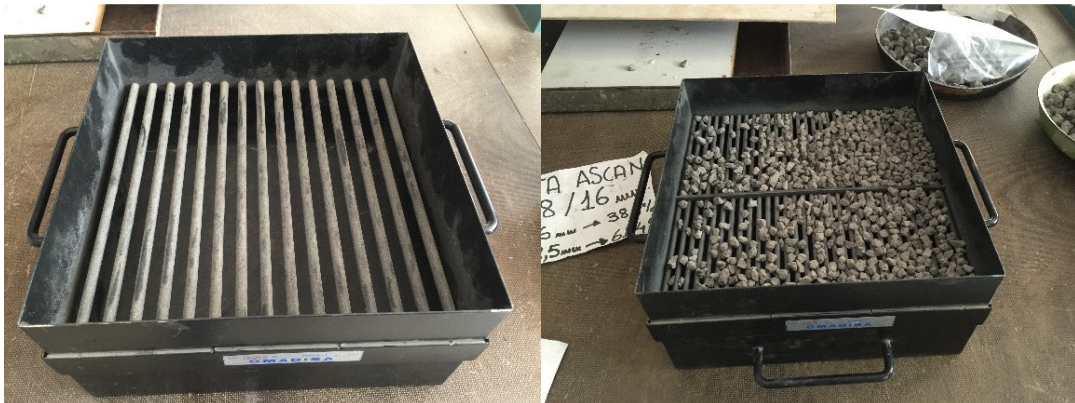


Figura 3.22. Tamices de barras empleados para la determinación del índice de lajas.

De esta forma, se calcula el índice de lajas (IL) para cada fracción granulométrica, definido en porcentaje como el cociente entre la masa de árido que pasa por el tamiz de barras correspondiente (M_2) y el peso inicial (M_1) de cada una de las fracciones:

$$IL = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (9)$$

Finalmente, se define el índice de lajas global (IL global). Los resultados se presentan en la Tabla 3.13, redondeando el valor obtenido al número entero más próximo.

Tabla 3.13. Índice de lajas de las escorias de horno eléctrico de arco.

Tamiz [mm]	IL [%]
16/20	3
12,5/16	1
10/12,5	2
8/10	1
6,3/8	1
5/6,3	2
4/5	3
IL Global [%]	2

3.2.1.3.2 Granulometría

La distribución granulométrica de los áridos, se realiza según lo establecido en la norma UNE-EN 933: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Parte 1: Método del tamizado y Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas [124,125].

En las citadas normas se establece la cantidad mínima necesaria de muestra, la cual depende del tamaño máximo del árido, así como, también, el procedimiento del ensayo. Siguiendo la metodología establecida en estos documentos, se procede, inicialmente, al cuarteo mediante rifles hasta conseguir una masa mínima de muestra de 2,6 kg para la fracción gruesa con tamaño máximo de árido de $D = 16$ mm. En el caso de la fracción fina, se obtuvo una muestra de masa mínima de 0,6 kg que corresponde a un tamaño máximo de árido de $D = 8$ mm.

Las muestras obtenidas, se introducen en una estufa a una temperatura de 110 ± 5 °C, Figura 3.23, hasta obtener masa constante. A continuación se determina el peso seco (P_1). Posteriormente, se lava la muestra con agua y se pasa por el tamiz de 0,063 mm. Después de secar nuevamente la muestra en estufa, se determina el peso seco tras el lavado (P_2), permitiendo determinar la masa de material fino removido ($P_1 - P_2$).



Figura 3.23. Muestras de áridos tras el secado en estufa a 110 ± 5 °C.

A continuación se realiza la distribución granulométrica con una tamizadora de vaivén, Figura 3.24, durante 2 minutos sobre cada una de las muestras, utilizando la serie de tamices UNE.



Figura 3.24. Tamizadora de vaivén para análisis granulométricos.

En la Figura 3.25 se presentan las curvas granulométricas de las tres fracciones de árido siderúrgico ensayadas y el huso granulométrico establecido por la EHE-08 [7] para la fracción fina.

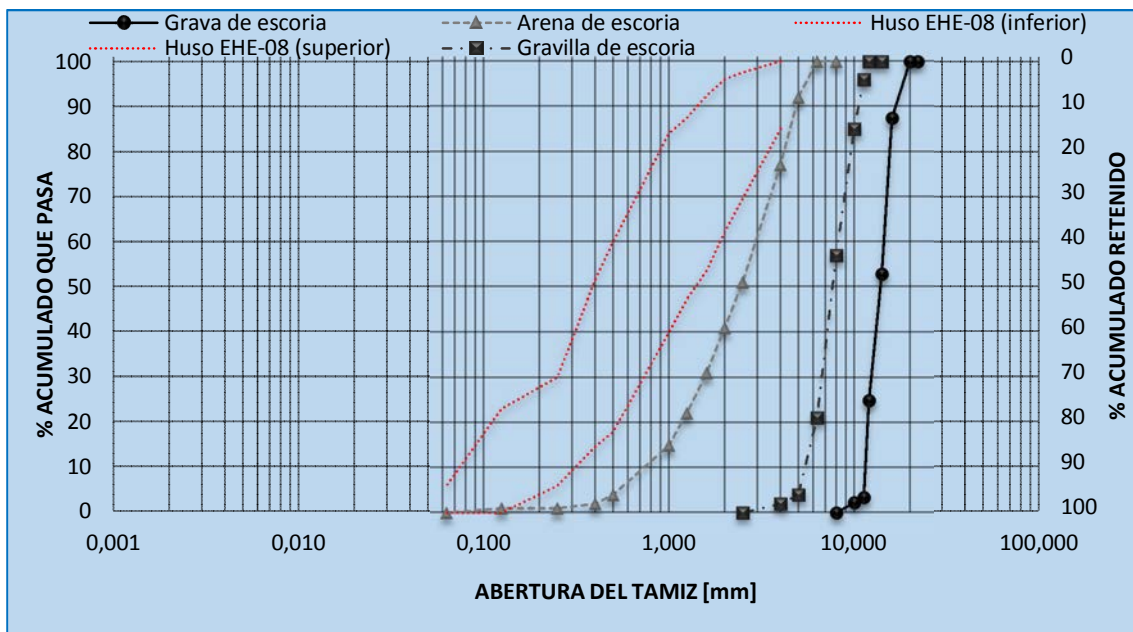


Figura 3.25. Curvas granulométricas de las tres fracciones de escoria de horno eléctrico de arco.

3.2.1.4 Propiedades mecánicas y tribológicas

Establecidas las diferencias de índole físico entre la escoria de horno eléctrico y el árido natural, se procede a contrastar el comportamiento mecánico y, por extensión, tribológico (resistencia al desgaste, a la abrasión, etc.) de ambos. Se pretende comprobar que las escorias siderúrgicas, a pesar de presentar mayor angulosidad y estructura porosa, se caracterizan por exhibir una capacidad mecánica comparable a la del árido natural de buena calidad.

3.2.1.4.1 Determinación del coeficiente de desgaste Los Ángeles

El ensayo se lleva a cabo de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 1097-2: Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación [126].

La fracción de árido a ensayar corresponde a 10/14, la cual se introduce previamente en la estufa hasta que su masa es constante. Se mezclan 3 kg de la fracción 10/12,5 y 2 kg de la fracción 12,5/14, resultando en una masa inicial de 5 kg.

La muestra se introduce en el tambor de la máquina de ensayo, Figura 3.26, junto con 12 bolas de acero de 46,8 mm de diámetro y una masa por unidad que oscila entre 390 y 445 gramos. Posteriormente, se acciona el motor de la máquina de Los Ángeles, proporcionando un giro uniforme a una frecuencia de rotación comprendida entre 30 y 33 rpm hasta que se alcanzan las 500 revoluciones. A continuación, se retira el material del tambor y se procede a cribar la muestra por un tamiz con una luz de 1,60 mm.

El material retenido por el tamiz de 1,60 mm, Figura 3.27, se lava y se introduce nuevamente en estufa a 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante, para determinar, finalmente, la masa con precisión de 5 g (M_f).



Figura 3.26. Máquina de ensayo Los Ángeles para la determinación de la friabilidad.



Figura 3.27. Fracción pasante y retenida por el tamiz 1,60 mm tras la realización del ensayo de desgaste Los Ángeles.

El coeficiente de desgaste de Los Ángeles (LA) corresponde al porcentaje de partículas de tamaño inferior a 1,60 mm generadas tras el ensayo, respecto a la masa inicial:

$$LA(\%) = \frac{5000 - M_f}{5000} \times 100 \quad (10)$$

El coeficiente de desgaste de Los Ángeles de la escoria de horno eléctrico se presenta en la Tabla 3.14, redondeando el valor obtenido al entero más próximo.

Tabla 3.14. Coeficiente de desgaste de Los Ángeles de la escoria de horno eléctrico de arco.

<i>Muestra</i>	<i>LA [%]</i>
<i>Grava de escoria (10/14 mm)</i>	<i>15</i>

3.2.1.4.2 Determinación del índice de machacabilidad

La resistencia del árido a ser fragmentado a compresión se ha realizado de acuerdo a las estipulaciones de la norma UNE-83112: Áridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad [127].

A pesar de que esta norma ha sido derogada en el año 2012, el índice de machacabilidad es un método que representa el comportamiento mecánico de los áridos frente a esfuerzos de compresión. Durante el ensayo las cargas se transmiten entre las partículas que están en contacto, confinadas en el interior de un cilindro metálico indeformable de dureza superior a los 578 HB.

La norma establece que la fracción de árido a ser ensayada en el cilindro grande (volumen 2642 cm³) corresponde al tamaño 10/14 mm. El procedimiento se inicia tras el secado de la muestra, después se llena el cilindro compactando el material granular hasta que el émbolo enrasa con el borde del mismo, Figura 3.28. Posteriormente, se vacía el molde en una bandeja y se determina la masa inicial (m_{mi}). A continuación, se introduce de nuevo la muestra en el recipiente y se coloca el émbolo en la cara abierta del cilindro.



Figura 3.28. Representación esquemática del ensayo de determinación del índice de machacabilidad del árido (izq.) y aspecto del material compactado en el interior del cilindro (dcha.).

Se coloca el útil en la prensa con la muestra y se somete el conjunto a una rampa de carga a compresión, a una velocidad de 40 kN/min hasta los 400 kN, Figura 3.29.



Figura 3.29. Detalle de la ejecución del ensayo (izq.) y de los equipos empleados en el LADICIM (dcha.).

Tras la descarga, se retira el émbolo y se extrae la muestra compactada del interior del cilindro con la ayuda de la prensa, Figura 3.30. A continuación se criba la muestra extraída por el tamiz de 2,5 mm de abertura con la finalidad de separar el material disgregado de los finos generados durante el ensayo. Finalmente, se determina la masa de la muestra retenida en el tamiz (m_{nf}).



Figura 3.30. Aspecto de la fracción de grava de escoria tras el ensayo.

El índice de machacabilidad de la fracción d/D ($M_{d/D}$), se obtiene calculando el cociente del material fino que pasa por el tamiz correspondiente entre la masa inicial de la muestra. El valor se expresa en porcentaje y se determina mediante la siguiente fórmula:

$$M_{n,d/D} = \frac{m_{ni} - m_{nf}}{m_{ni}} \times 100 \quad (11)$$

Con la finalidad de complementar los resultados del ensayo normalizado, se ha registrado la deformación del material, mediante la adquisición de la fuerza y el desplazamiento del actuador de la máquina de ensayo, permitiendo obtener la curva tensión-deformación.

Por último, con el propósito de evaluar el comportamiento del árido en las condiciones de amasado, se han realizado ensayos del árido siderúrgico sin ser previamente cribado de acuerdo a las fracciones establecidas en la norma, Figura 3.31. Del mismo modo que en los ensayos normalizados se determinó la curva tensión deformación.



Figura 3.31. Aspecto de la muestra de escoria sin cribar antes y después del ensayo.

Los índices de machacabilidad obtenidos y las deformaciones máximas del conjunto de partículas, se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Índice de machacabilidad y acortamiento de las fracciones de escoria de horno eléctrico.

<i>Muestra</i>	<i>IM [%]</i>	<i>Acortamiento del material [%]</i>
<i>Grava de escoria cribada (10/14 mm)</i>	18	26,1
<i>Gravilla de escoria sin cribar (6/12 mm)</i>	12	19,1

En la Figura 3.32 se presentan las curvas de tensión-deformación obtenidas para cada caso.

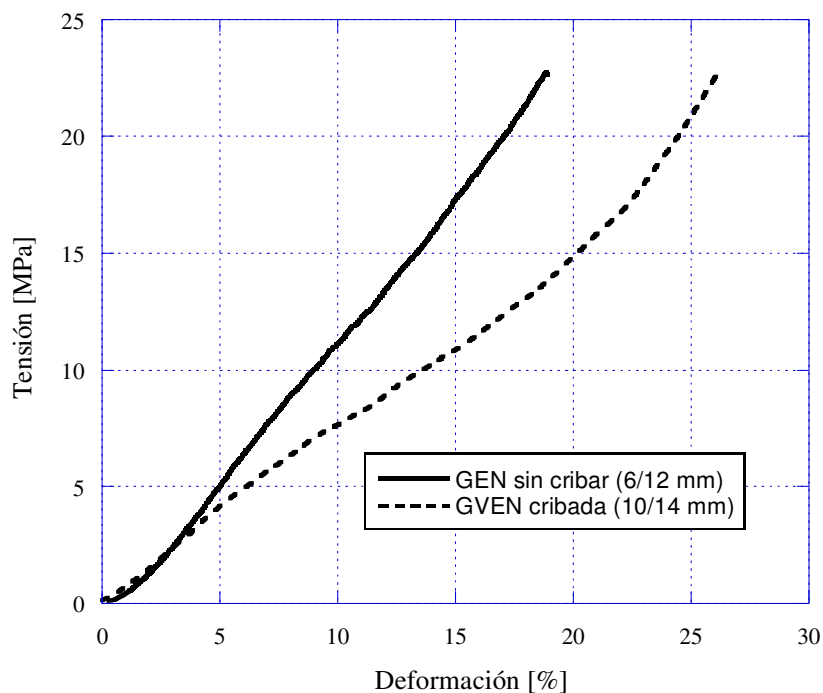


Figura 3.32. Curvas tensión-deformación de las fracciones de escorias de horno eléctrico de arco.

3.2.2 Escoria de cubilote

La escoria de cubilote, se genera en la fase de fusión del proceso de fabricación de fundición dúctil. Las escorias empleadas en esta Tesis Doctoral proceden de un cubilote de aire caliente de la planta Saint Gobain Pam ubicada en Santander, Figura 3.33.



Figura 3.33. Planta Saint Gobain Pam canalizaciones.

En la Figura 3.34 se muestra el aspecto de la escoria tras el proceso de enfriamiento. A diferencia de la escoria de horno eléctrico, estos subproductos no se valorizan y son transportados directamente al vertedero. La capa de escoria depositada en una bandeja al salir del cubilote sufre un enfriamiento rápido al aire que la vitrifica y, el posterior volteo, fractura la placa solidificada en múltiples partículas de gran tamaño y poco espesor. Presenta un color negro oscuro y brillante, siendo la textura en la superficie superior de la placa ligeramente rugosa debido a la presencia de burbujas atrapadas tras el rápido proceso de vitrificación.



Figura 3.34. Aspecto de la escoria de cubilote vitrificada.

El uso de las escorias de cubilote en la fabricación de HAC ha surgido con el propósito de transformar este residuo en un material de construcción tras un proceso de valorización. En el año 2007 el LADICIM y el SERCAMAT de la Universidad de Cantabria analizaron el comportamiento de la escoria de cubilote generada en la planta Saint Gobain Pam en la fabricación de morteros con resultados positivos. Uno de los aspectos más relevantes del estudio fue la actividad puzolánica de la escoria. Como se ha indicado en el Capítulo 2 y a pesar de la elevada producción a nivel mundial de fundición dúctil, prácticamente no existen experiencias en la bibliografía científica relacionadas con este material.

Para iniciar el estudio, se han determinado sus propiedades químicas por ser indispensables para proceder con su valorización y posterior transformación. De acuerdo con el Decreto 104/2006 de la Comunidad Autónoma de Cantabria [5], se realizó el test de lixiviados con el fin de obtener la concentración de los elementos químicos presentes en la escoria.

3.2.2.1 Valorización de la escoria

El proceso de valorización de la escoria se realizó en las instalaciones del LADICIM mediante la trituración en húmedo de la escoria vitrificada en un molino de bolas industrial para convertirla en filler. En cada molienda, se alimentó el molino con 80 kg de escoria de cubilote con una carga de bolas de alúmina, Figura 3.35.



Figura 3.35. Molino de bolas empleado en la valorización de la escoria de cubilote.

Para garantizar la molienda de toda la carga, previamente se trituró la escoria en una machacadora de mandíbulas, Figura 3.36, reduciendo el tamaño máximo de la misma a partículas de 10 mm. La molienda hasta polvo fino, se realizó a una frecuencia de rotación de 45 revoluciones por minuto hasta obtener un tamaño máximo de partícula de 100 micras. La duración de la molienda fue de 8 horas. Para comprobar el tamaño alcanzado, se realizaron observaciones en el SEM tras distintos tiempos en el molino, Figura 3.37.



Figura 3.36. Machacadora empleada antes de realizar la molienda de la escoria de cubilote.

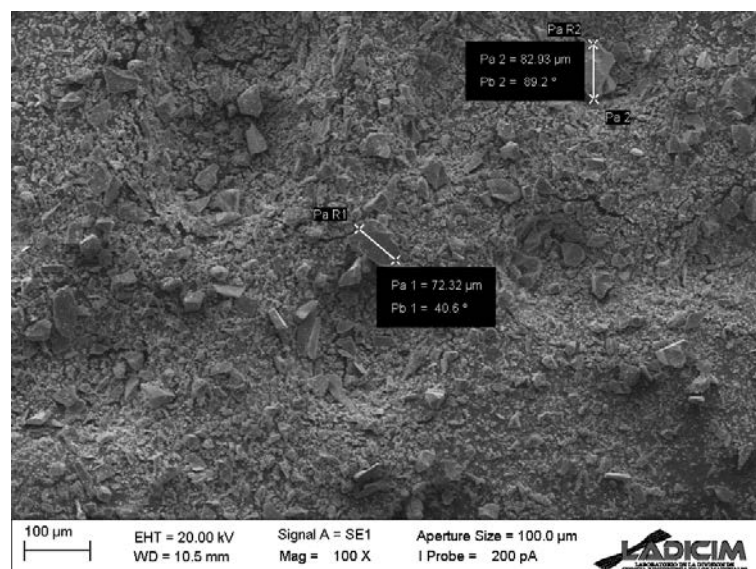


Figura 3.37. Comprobación del tamaño máximo de las partículas de escoria de cubilote en el SEM.

Tras la molienda, se retira el material molido y se deposita en un recipiente de plástico, Figura 3.38.



Figura 3.38. Aspecto del material extraído tras la molienda.

El líquido con las partículas de escoria en suspensión se deja en reposo en el recipiente, hasta que decanta el material en el fondo del mismo, Figura 3.39.



Figura 3.39. Detalle de la escoria decantada en el fondo del recipiente.

Posteriormente, se retira el agua y se vierte la pasta depositada en el fondo en bandejas metálicas para proceder a secarla en una estufa ventilada a 110 ± 5 °C hasta obtener masa constante, Figura 3.40.



Figura 3.40. Aspecto del material antes y después del secado en estufa.

El color grisáceo hace que el aspecto del material valorizado sea semejante al de un cemento, Figura 3.41. La finalidad del proceso descrito es aprovechar el actual residuo tras el proceso de molienda como adición en la fabricación de morteros y hormigones, especialmente autocompactantes debido a la cantidad adicional de finos que éstos demandan.



Figura 3.41. Aspecto de la escoria de cubilote molida.

Antes de su empleo se procedió al estudio del material molido en tres etapas. Inicialmente, se determinaron las propiedades químicas, mineralógicas, morfológicas y físicas del polvo. Posteriormente, se realizaron estudios del comportamiento mecánico de morteros normalizados fabricados con distintos porcentajes de sustitución de escoria por cemento.

Finalmente, se realizaron morteros con las arenas a ser empleadas en las dosificaciones de HAC y el aditivo superplastificante con el propósito de comparar el comportamiento reológico y mecánico de las mezclas de morteros fluidos, así como también, la compatibilidad del filler de escoria con el aditivo.

3.2.2.2 Caracterización física

3.2.2.2.1 Densidad real de la escoria de fundición

El tamaño de las partículas de la escoria valorizada y su baja porosidad permiten considerar el volumen relativo del sólido como volumen real. La densidad real de la escoria se ha determinado siguiendo las indicaciones de la norma de cementos UNE 80103:2013: Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real. [128], con la salvedad de que se ha utilizado agua como agente dispersante.

Para obtener la densidad real de la escoria se han realizado dos determinaciones de acuerdo al procedimiento y la fórmula (1) descritos en el apartado 3.2.1.2.1. En la Tabla 3.16 se presenta la densidad real de la escoria de cubilote valorizada.

Tabla 3.16. Densidad real de la escoria de cubilote.

<i>Muestra</i>	<i>Dr [g/cm³]</i>
<i>Escoria de cubilote valorizada</i>	2,89

3.2.2.2.2 Superficie específica Blaine

Tras determinar la densidad, se procede a obtener la finura de la escoria mediante un permeabilímetro Blaine, Figura 3.42, siguiendo las especificaciones recogidas en la norma UNE-EN 196-6:2010: Métodos de ensayo de cementos. Parte 6: Determinación de la finura [129].

El ensayo está basado en la resistencia que ofrece una capa compactada de material pulverulento al paso de aire a presión atmosférica, en condiciones de temperatura de laboratorio. El vacío se genera mediante una columna de aceite en el interior del tubo del permeabilímetro Blaine, que se compensa con la permeabilidad de la muestra. La velocidad de desplazamiento de la columna de aceite permite determinar la superficie específica Blaine

Para obtener la finura de la escoria, se deben añadir $1,93 \text{ cm}^3$ de muestra, que es el volumen de la capa de material compactado a introducir en la celda de permeabilidad. Una vez determinada la densidad de la escoria, se pesa la cantidad correspondiente a dicho volumen.



Figura 3.42. Permeabilímetro Blaine, celda y filtros empleados.

Tras colocar la escoria en la celda entre dos papeles de filtro para evitar pérdidas de material, se cierra herméticamente el sistema y se hace vacío para llevar la columna de aceite por encima de la marca superior del tubo del equipo. A continuación, se abre el sistema, para que el aire comience a fluir a través del polvo a una velocidad que está vinculada a la velocidad de bajada de la columna de aceite. En el instante que el nivel superior de la columna de aceite se sitúa en la marca superior del tubo se comienza a registrar el tiempo con un cronómetro. En cuanto el nivel de la columna de aceite alcanza la segunda marca del tubo, se detiene el cronómetro y se registra el tiempo transcurrido.

El cálculo de la superficie específica Blaine se realiza empleando la fórmula (12) con la constante de calibración del aparato k ($k = 26,17$) y la media de tres determinaciones del tiempo transcurrido entre marcas.

$$S_{Blaine} = 524,2 k \frac{\sqrt{t}}{\rho} \quad (12)$$

En la Tabla 3.17, se presenta la superficie específica de la escoria de cubilote empleando para el cálculo, la media de tres determinaciones.

Tabla 3.17. Superficie específica de la escoria de cubilote.

<i>Muestra</i>	<i>Superficie específica [cm²/g]</i>
<i>Escoria de cubilote valorizada</i>	4294

3.2.2.3 Caracterización química y mineralógica

3.2.2.3.1 Fluorescencia de rayos X

El SERCAMAT ha realizado la caracterización química semicuantitativa del porcentaje en peso de los óxidos presentes en la escoria mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X, tal y como se presentó en el apartado 3.2.1.1.1. Los resultados se presentan en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Análisis de la escoria de cubilote mediante fluorescencia de rayos X.

<i>Compuesto</i>	<i>SiO₂</i>	<i>CaO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Resto</i>
<i>[% peso]</i>	43,56	29,97	13,64	6,34	2,80	2,10	0,51	< 0,50

De los resultados obtenidos se comprueba que los componentes mayoritarios son óxidos de silicio, calcio y aluminio. En menor proporción aparecen óxidos de hierro, manganeso y magnesio. Finalmente, se han detectado concentraciones muy pequeñas de óxidos de titanio, cromo, bario potasio y azufre.

3.2.2.3.2 Difracción de rayos X

La composición cristalina de la escoria se determinó mediante difracción de rayos X, empleando el método descrito en el apartado 3.2.1.1.2. La difracción de la escoria de cubilote se presenta en la Figura 3.43.

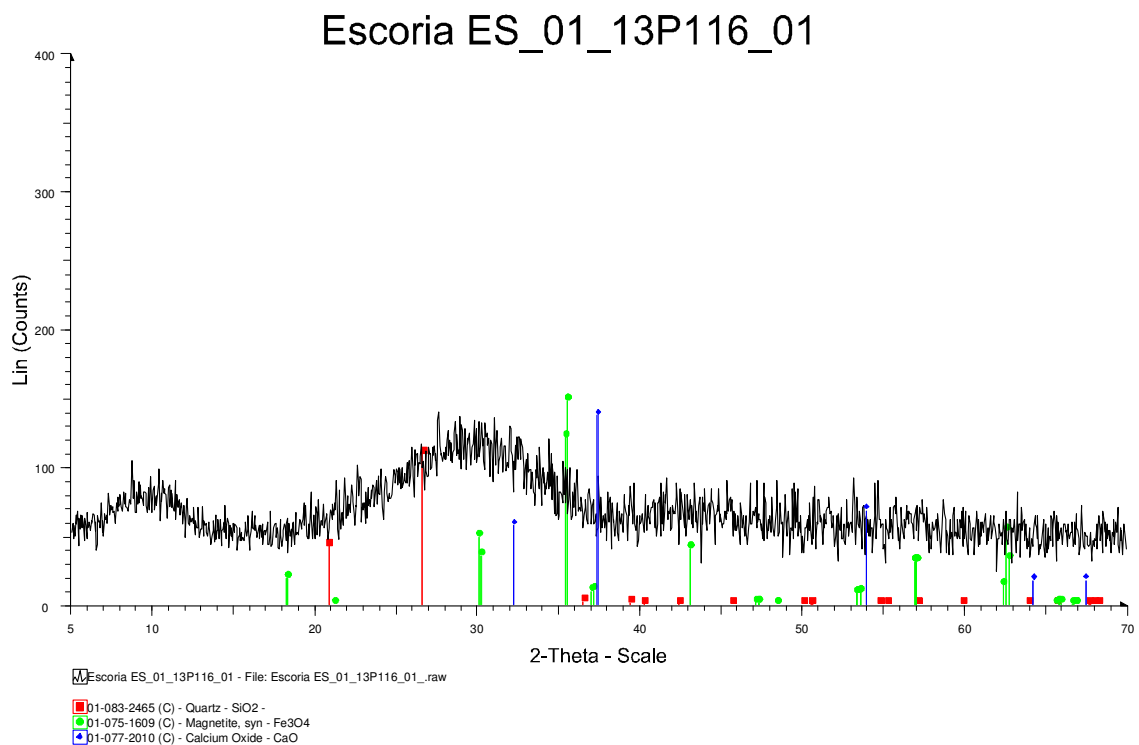


Figura 3.43. Difractograma de la muestra de escoria de cubilote.

La estructura amorfa de la escoria de cubilote impide que se detecten picos de difracción. Este resultado no deja de ser interesante, basado en que su composición mayoritaria corresponde a óxido de sílice que, al estar en estado amorfo, es un indicador de la posible reactividad del material.

3.2.2.3.3 Espectroscopía por infrarrojos

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.2.1.1.3 y debido a los resultados obtenidos en la difracción de rayos X, se determinó la presencia de los compuestos presentes en la escoria de cubilote mediante la espectroscopía por infrarrojos. El espectro obtenido se presenta en la Figura 3.44.

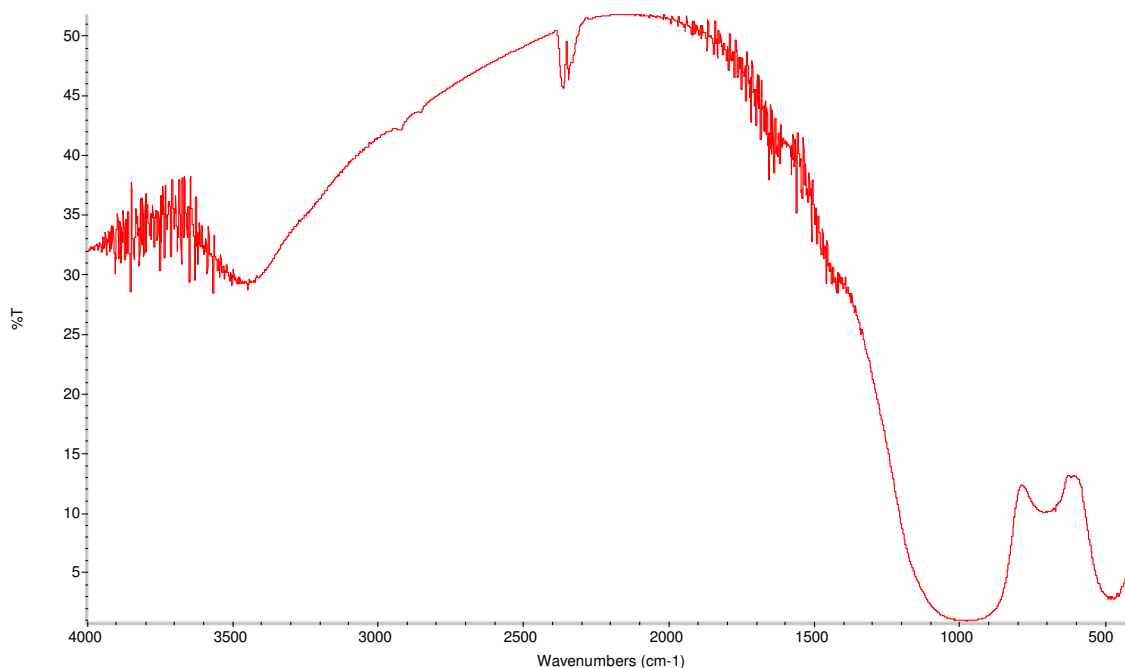


Figura 3.44. Espectro IR de la escoria de cubilote.

El espectro obtenido ha permitido detectar los siguientes compuestos:

- Principalmente silicatos y aluminosilicatos, con bandas de vibración entre 800-1100 cm^{-1} y 500 cm^{-1} .
- Óxido de calcio, por sus picos en las frecuencias situadas en torno a 1400-1500 cm^{-1} y en 910 cm^{-1} .
- Óxidos de hierro, picos en 2400 cm^{-1} , 1400-1500 cm^{-1} y 300-600 cm^{-1} .

3.2.2.3.4 Microscopía electrónica de barrido

Se ha obtenido la composición química de la escoria vitrificada antes y después de su valorización mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) con el microscopio electrónico de barrido descrito en el apartado 3.2.1.1.5.

Adicionalmente, se pudo apreciar la morfología de las partículas tras la molienda. Para ello, se colocaron sobre un portamuestras metálico, siendo adheridas a éste con una cinta conductora de carbono. Esta sistemática permitió definir el tiempo óptimo de molienda.

En la Figura 3.45 se presenta la micrografía de una partícula de escoria de cubilote, y en la Tabla 3.19 y Tabla 3.20, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

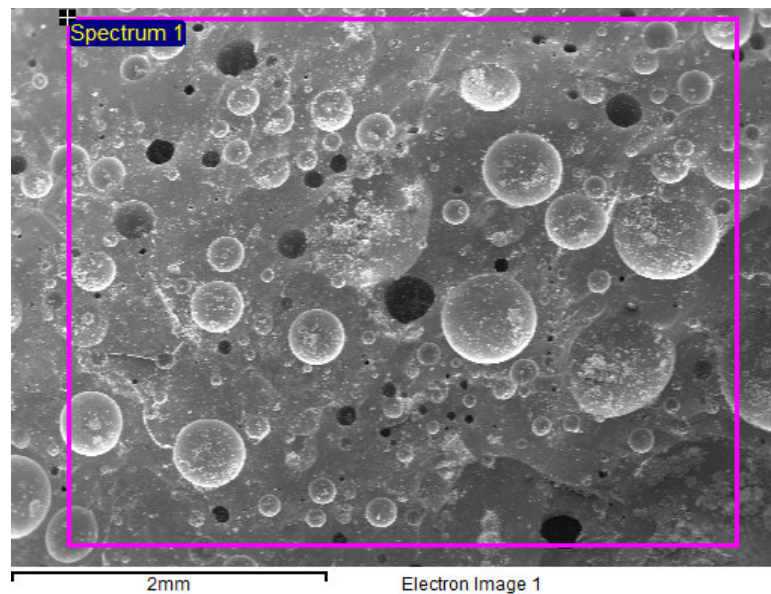


Figura 3.45. Micrografía de una partícula de escoria de cubilote vitrificada.

Tabla 3.19. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de escoria de cubilote.

Elemento	O	Si	Ca	Fe	Al	Mn	Mg
[% en peso]	41,13	20,77	20,71	7,07	5,03	2,42	2,36

Tabla 3.20. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de la escoria de cubilote.

Compuesto	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO
[% en peso]	44,93	28,98	10,45	9,10	3,92	3,13

En la Figura 3.46 se presenta una micrografía de la escoria de cubilote valorizada, y en la Tabla 3.21 y Tabla 3.22, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

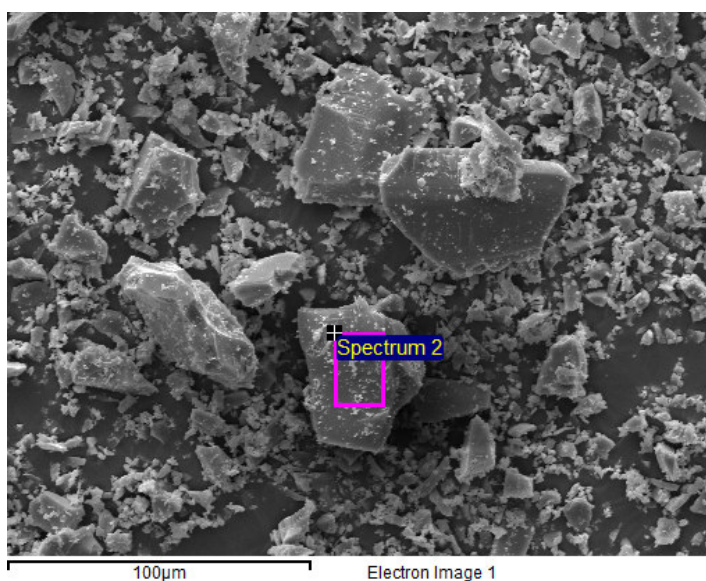


Figura 3.46. Micrografía de la escoria de cubilote tras el proceso de valorización.

Tabla 3.21. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de escoria de cubilote valorizada.

Elemento	O	Si	Ca	Al	Fe	Mn
[% en peso]	44,28	26,81	16,85	5,88	3,98	2,20

Tabla 3.22. *Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de la escoria de cubilote valorizada.*

<i>Compuesto</i>	<i>SiO₂</i>	<i>CaO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>
<i>(% en peso)</i>	57,35	23,58	11,11	5,16	2,84

El alto contenido de dióxido de silicio en estado amorfo es un indicador del posible carácter puzolánico del material. En caso de que el residuo tras su valorización pueda ser activado en las mezclas, aportaría un incremento en el comportamiento mecánico de los hormigones, lo cual sería un añadido al uso de este material, siempre y cuando, no interfiera en la durabilidad del hormigón endurecido.

3.2.2.3.5 *Test de lixiviados*

El análisis de los lixiviados de la escoria de cubilote lo ha realizado la empresa Soningeo de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 12457-4 [120]. Para ello, se suministraron 2 kg de muestra sin estar sometida a un tratamiento previo.

Del mismo modo que con la escoria de horno eléctrico, los resultados obtenidos se han comparado con los límites definidos en el Anexo I del Decreto 104/2006 de la Comunidad de Cantabria [5]. Los resultados se recogen en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Resultado del ensayo de lixiviación de las escorias de cubilote.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor límite</i>	<i>Resultado lixiviación</i>
Humedad	%	-	0,1
pH		-	10,41 (21,6 °C)
Conductividad	μS/cm	-	72,8 (20 °C)
COD	mg/kg m.s.	500	<50
Cloruros	mg/kg m.s.	800	<50
Fenoles	mg/kg m.s.	1	<1
STD	mg/kg m.s.	4.000	480
Sulfatos	mg/kg m.s.	1000	60,4
Antimonio	mg/kg m.s.	0,06	<0,01
Arsénico	mg/kg m.s.	0,5	<0,02
Bario	mg/kg m.s.	20	<0,10
Cadmio	mg/kg m.s.	0,04	<0,01
Cobre	mg/kg m.s.	2	<0,17
Cromo total	mg/kg m.s.	0,5	<0,06
Mercurio	mg/kg m.s.	0,01	<0,002
Molibdeno	mg/kg m.s.	0,5	<0,20
Níquel	mg/kg m.s.	0,4	<0,08
Plomo	mg/kg m.s.	0,5	<0,12
Zinc	mg/kg m.s.	4	<0,55
Selenio	mg/kg m.s.	0,1	< 0,10

Al igual que la escoria de horno eléctrico, la escoria de cubilote es un material que no supone ningún riesgo medioambiental, incluso la concentración de los elementos peligrosos detectados en el test de lixiviados son significativamente inferiores al compararse con la escoria de horno eléctrico.

3.2.3 Áridos naturales

En el transcurso de la investigación, se han empleado áridos naturales para la fabricación hormigones autocompactantes, que han servido de referencia para contrastar el comportamiento manifestado por los diseños conteniendo escorias. En particular, se ha analizado la adición de arena natural como complemento del hormigón con escoria de horno eléctrico debido a la escasez de finos aportados por la fracción fina de la misma.

El árido natural seleccionado para la fabricación de hormigones autocompactantes de alta resistencia ha sido la ofita, debido a su buen comportamiento mecánico. Este material es de reconocida aplicación en la fabricación de mezclas bituminosas y tratamientos superficiales para carreteras o autovías y otras zonas pavimentadas, así como para balasto en vías de ferrocarril, por su elevada resistencia al desgaste. La ofita procede de la empresa Ofitas de San Felices ubicada en Haro, La Rioja y ha sido suministrada en sacas de 1 m³, distribuidas en las siguientes fracciones, Figura 3.47 a Figura 3.50:



Figura 3.47. Arena de ofita ($0 < D < 6$ mm).



Figura 3.48. Gravilla de ofita ($6 < D < 12$ mm).



Figura 3.49. Grava de ofita lavada ($12 < D < 20$ mm).

Cabe destacar que la gravilla de ofita, Figura 3.48, presentaba filler adherido a la superficie al ser removido en la cantera durante días con precipitaciones el cual se determinó mediante lavado. Como se ha indicado al inicio del capítulo, la grava de ofita, Figura 3.50, se ha descartado en la fabricación de HAC para evitar problemas de bloqueo. Sin embargo, se ha caracterizado para comparar las propiedades de un material de origen natural muy resistente con la escoria de horno eléctrico.

Para aportar partículas comprendidas entre los 0 y 2 mm a las mezclas, se optó por emplear una arena comercial de naturaleza silíceas, Figura 3.50. Dicha arena fue suministrada en una saca de 1 m³.



Figura 3.50. Arena de sílice ($0 < D < 2 \text{ mm}$).

El análisis de los áridos naturales, se ha realizado mediante la caracterización química, física y dimensional de las partículas. Las actuaciones llevadas a cabo, se presentan a continuación:

3.2.3.1 Caracterización química

La caracterización química se ha realizado mediante microscopía electrónica de barrido, en el apartado 3.2.1.1.5. En la Figura 3.51 se presenta una micrografía de una partícula de gravilla de ofita, y en la Tabla 3.24 y Tabla 3.25, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

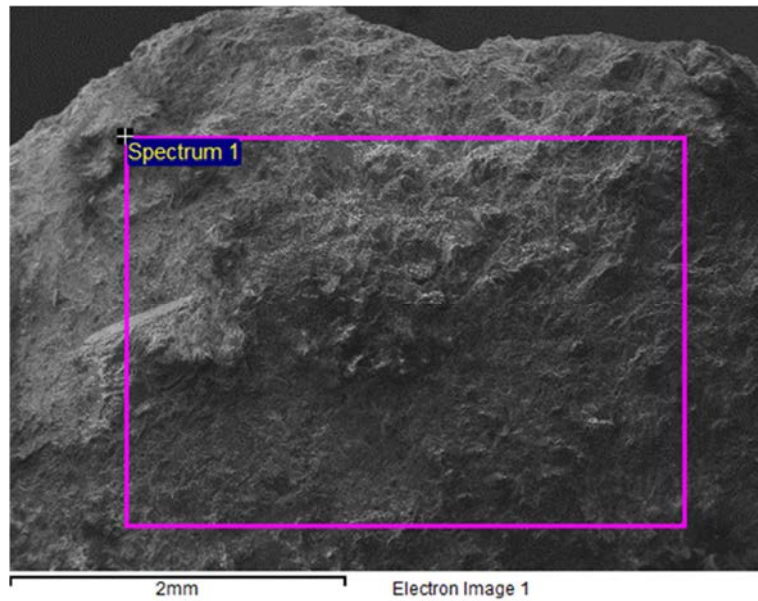


Figura 3.51. Micrografía de una partícula de gravilla de ofita.

Tabla 3.24. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de gravilla de ofita.

Elemento	O	Si	Fe	Ca	Mg	Al	Na
[% peso]	42,99	21,71	10,64	7,94	7,46	7,20	2,05

Tabla 3.25. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de gravilla de ofita.

Compuesto	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
[% peso]	46,45	13,69	13,61	12,38	11,11	2,77

En la Figura 3.52 se presenta una micrografía de las partículas de arena de ofita, y en la Tabla 3.26 y Tabla 3.27, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

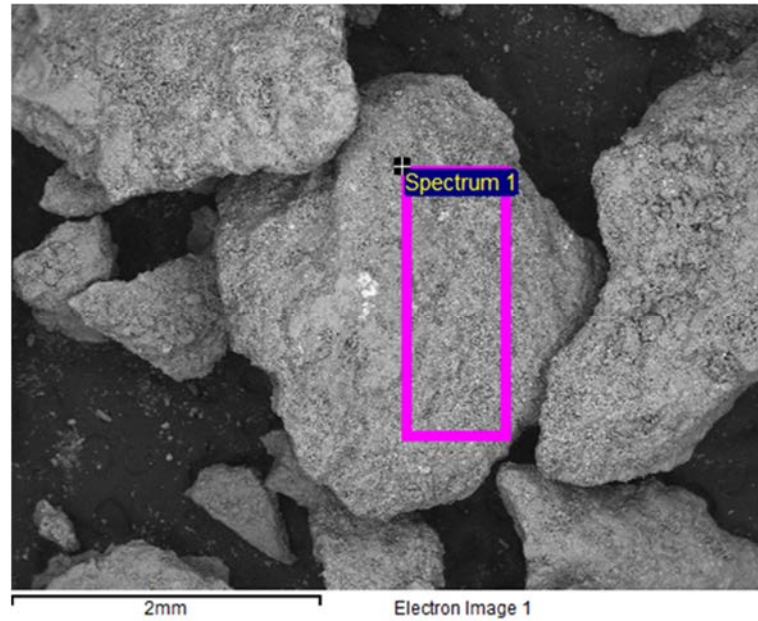


Figura 3.52. Micrografía de las partículas de arena de ofita.

Tabla 3.26. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de la arena de ofita.

Elemento	O	Si	Fe	Al	Ca	Mg	Na	K
[% peso]	42,67	21,91	12,61	7,94	6,37	5,52	1,71	1,52

Tabla 3.27. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de la arena de ofita.

Compuesto	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
[% peso]	46,88	16,22	15,01	9,15	8,92	2,30	1,52

En la Figura 3.53 se presenta una micrografía de la arena de sílice, y en la Tabla 3.28 y Tabla 3.29, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

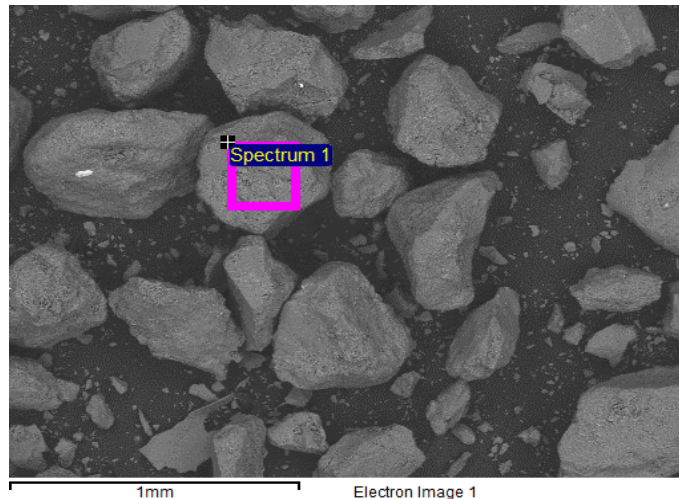


Figura 3.53. Micrografía las partículas de arena de sílice.

Tabla 3.28. Análisis por EDS de una partícula de arena de sílice.

<i>Elemento</i>	<i>O</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>
<i>[% peso]</i>	53,01	44,87	2,12

Tabla 3.29. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de la arena de sílice.

<i>Compuesto</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>
<i>[% peso]</i>	96,00	4,00

3.2.3.2 Caracterización física

La determinación de las densidades reales relativas, aparentes y saturadas de los áridos naturales se llevó a cabo según lo descrito en el apartado 3.2.1.2.1. En la Tabla 3.30, se recogen las densidades de la grava y la gravilla de la ofita, mientras que, en la Tabla 3.31, se presentan las densidades reales de las arenas naturales. Los valores reflejados en las tablas provienen de la media de dos determinaciones.

Tabla 3.30. Densidades de la grava y la gravilla de ofita.

<i>Muestra</i>	<i>Densidad aparente [g/cm³]</i>	<i>Densidad relativa [g/cm³]</i>
Gravilla de ofita	2,72	2,81
Grava de ofita	2,77	2,85

Tabla 3.31. Densidad real de las arenas de ofita y sílice.

<i>Muestra</i>	<i>Dr [g/cm³]</i>
Arena de sílice	2,61
Arena de ofita	2,89

Asimismo, el coeficiente de absorción y la porosidad accesible del árido natural grueso se obtuvieron siguiendo los procedimientos descritos en los apartados 3.2.1.2.2 y 3.2.1.2.3 y se presentan en la Tabla 3.32 y Tabla 3.33.

Tabla 3.32. Coeficiente de absorción de la ofita.

<i>Muestra</i>	<i>Absorción de agua [% peso]</i>
Gravilla de ofita	1,11
Grava de ofita	1,04

Tabla 3.33. Determinación de la porosidad accesible.

<i>Muestra</i>	<i>Porosidad [% volumen]</i>
Gravilla de ofita	3,02
Grava de ofita	2,89

La distribución granulométrica de los áridos naturales, obtenida según las pautas presentadas en el apartado 3.2.1.3.2, se muestra en la Figura 3.54.

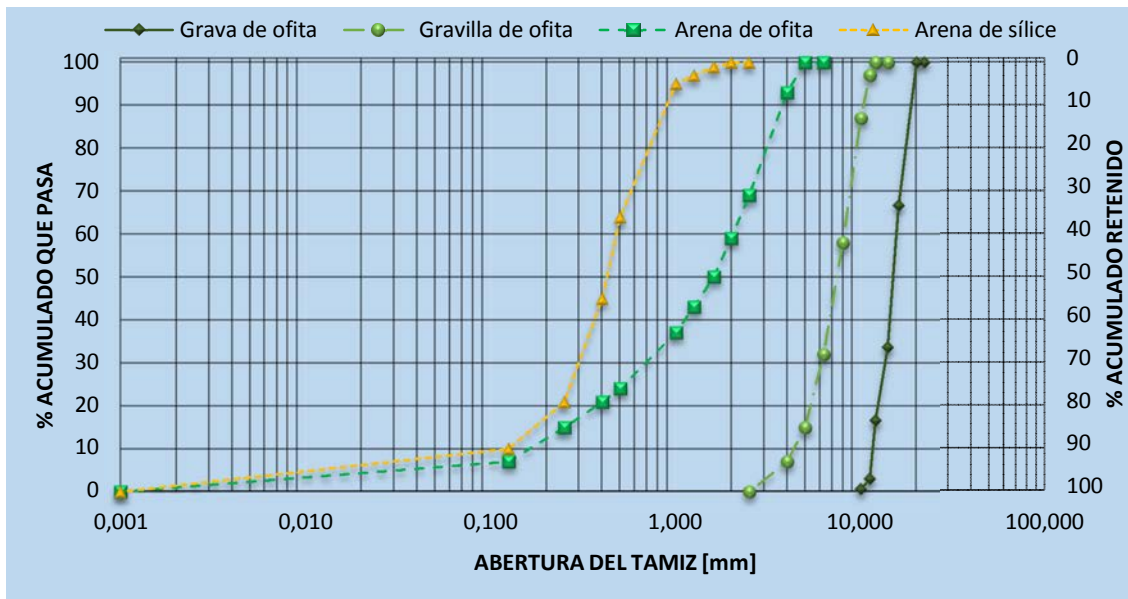


Figura 3.54. Curvas granulométricas de los áridos naturales.

El contenido de filler adherido en la superficie de las partículas de gravilla en peso resultó en 1,3%.

3.2.3.3 Caracterización mecánica

El desgaste de los Ángeles de las partículas de árido empleado ha sido proporcionado por la cantera de Ofitas de San Felices y se presenta en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34. Coeficiente de desgaste de Los Ángeles de la ofita.

Muestra	LA [%]
Grava de ofita (10/14 mm)	15

El Índice de Machacabilidad de la ofita se ha obtenido del mismo modo y sobre las mismas fracciones comentadas en la caracterización de la escoria de horno eléctrico, apartado 3.2.1.4.2. En la Figura 3.55, se presenta el aspecto de la muestra de gravilla antes y después de someterse a los esfuerzos de compresión del ensayo de machacabilidad.



Figura 3.55. Aspecto de la muestra de gravilla de ofita (sin cribar) antes y después del ensayo de machacabilidad y su extracción del recipiente (dcha.).

En la Tabla 3.35 se muestran los resultados obtenidos para las fracciones de ofita sometidas a los esfuerzos de compresión.

Tabla 3.35. Índice de machacabilidad y acortamiento de las fracciones de ofita.

<i>Muestra</i>	<i>IM [%]</i>	<i>Acortamiento del material [%]</i>
Grava cribada (10-14 mm)	15	20,4
Gravilla sin cribar (6-12 mm)	13	21,2

Finalmente, en la Figura 3.56, se presentan las graficas de comportamiento de las fracciones de ofita durante la ejecución del ensayo de machacabilidad.

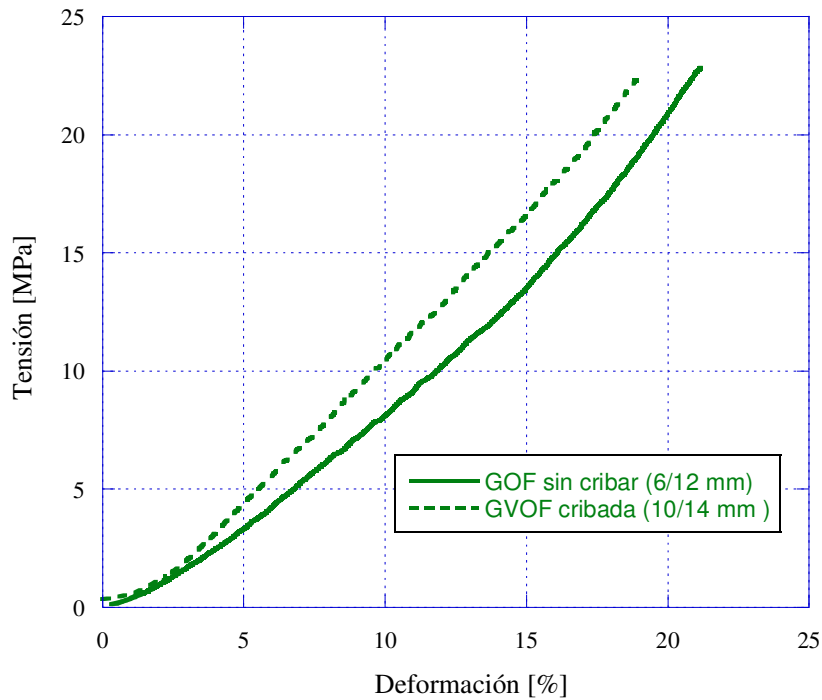


Figura 3.56. Curva tensión-deformación de las fracciones de ofita.

3.2.4 Adiciones

Las adiciones seleccionadas en la presente Tesis son dos de las más empleadas en la fabricación de HAC y en los cementos tipo portland con adiciones, el filler calizo y la ceniza volante. La elección va a permitir comparar el comportamiento de este tipo de adiciones con el filler de escoria de cubilote obtenido en el LADICIM, en mezclas de morteros y hormigones autocompactantes.

El filler calizo empleado, Figura 3.57, procede de la cantera de Peñas Negras ubicada en Escobedo, Cantabria y ha sido facilitada por el Laboratorio del Grupo de Caminos de Santander en bolsas de 25 litros.



Figura 3.57. Aspecto del filler calizo.

La ceniza volante, Figura 3.58, ha sido suministrada por la empresa Solvay, a pesar de no estar incluida en su lista de productos y materiales comerciales, es un residuo que se genera en la planta de Torrelavega, Cantabria. Este material es adquirido en su totalidad por la Cementos Alfa ubicada en Mataporquera, Cantabria. La empresa facilitó el análisis químico de este material, el cual corresponde a cenizas tipo V, Tabla 3.36.



Figura 3.58. Aspecto de las cenizas volantes.

Tabla 3.36. Caracterización química de las cenizas volantes.

Compuesto*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
[% peso]	55,00	20,40	7,00	6,10	4,00	2,60	2,00	1,2	0,90

*Los compuestos no incluidos se sitúan por debajo del 0,5%.

Como complemento a los resultados obtenidos sobre las cenizas volantes, en la Figura 3.59 se presenta la difracción de rayos X de esta adición, realizado de acuerdo con el apartado 3.2.1.1.2.

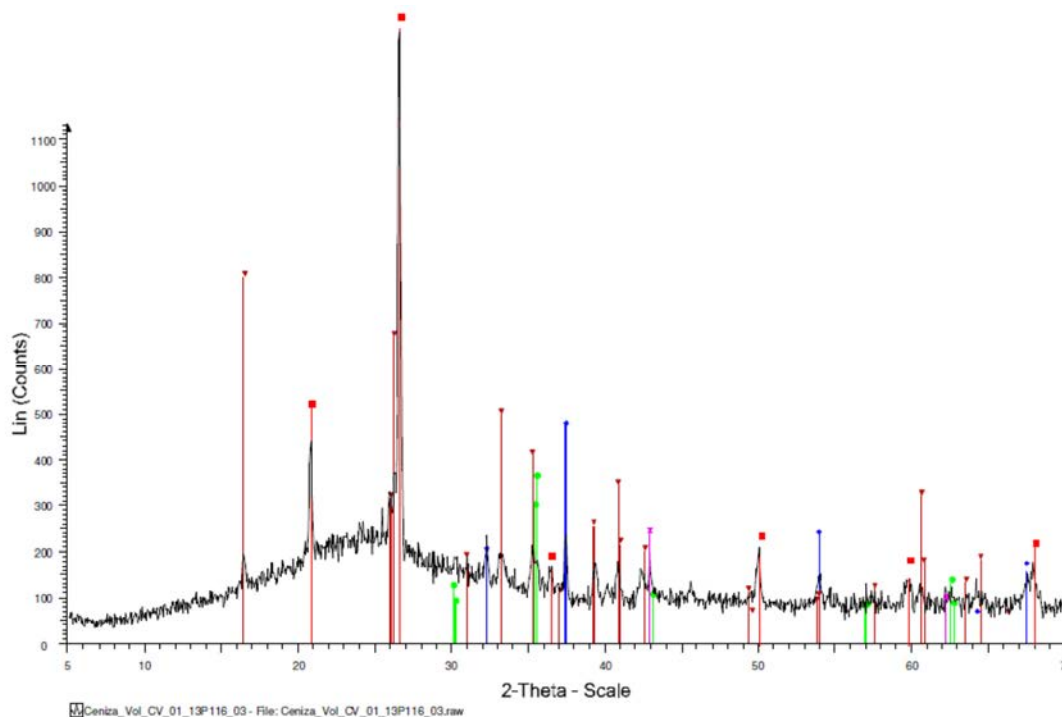


Figura 3.59. Difracción de rayos X de las cenizas volantes.

3.2.4.1 Caracterización de las adiciones

Del mismo modo que se procedió con el filler de escoria, la caracterización llevada a cabo sobre las adiciones se realizó en varias etapas. En la primera se determinó la densidad real, Tabla 3.37, superficie específica Blaine, Tabla 3.38, y se analizaron en el microscopio electrónico de barrido, Figura 3.60 y Figura 3.61.

Tabla 3.37. Determinación de la densidad real, descrita en el apartado 3.2.1.2.1.

<i>Muestra</i>	<i>Dr [g/cm³]</i>
<i>Filler calizo</i>	2,65
<i>Ceniza volante</i>	2,13

Tabla 3.38. Determinación de la finura Blaine, descrita en el apartado 3.2.2.2.2.

Muestra	Finura [cm ² /g]
Filler calizo	2741
Ceniza volante	4003

A continuación se presentan las observaciones y análisis realizados sobre las adiciones mediante microscopía electrónica de barrido, según se ha relatado en el apartado 3.2.1.1.2.

En la Figura 3.60 se presenta la micrografía del filler calizo, y en la Tabla 3.39 y Tabla 3.40 los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

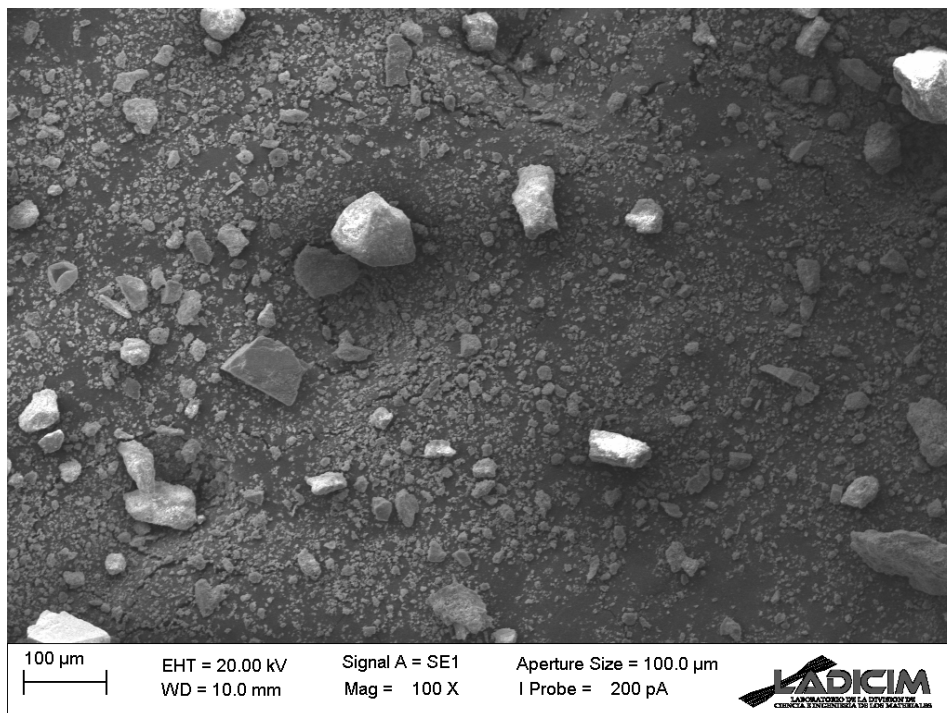


Figura 3.60. Micrografía de las partículas filler calizo.

Tabla 3.39. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de filler calizo.

Elementos	O	Ca	C
[% peso]	54,11	35,62	10,26

Tabla 3.40. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de filler calizo.

Compuesto	CaCO ₃
[% peso]	100,00

En la Figura 3.61, se presenta la micrografía de las cenizas volantes, y en la Tabla 3.41 y Tabla 3.42, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

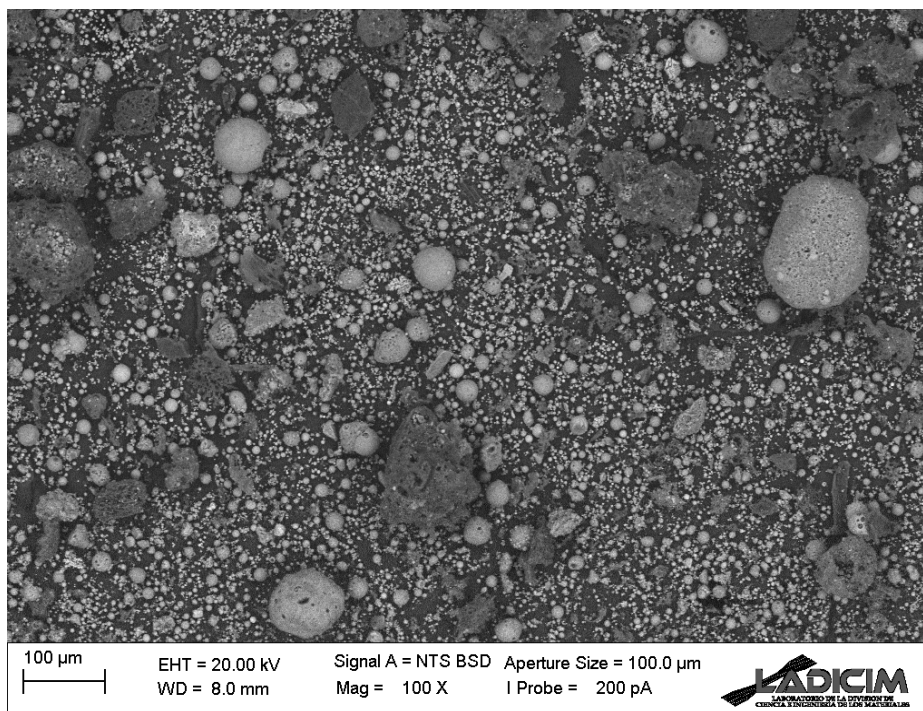


Figura 3.61. Micrografía de las partículas de cenizas volantes

Tabla 3.41. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de ceniza volante.

Elemento	O	Si	Al	K	Fe	Na	Ca	Mg
[% peso]	47,02	28,27	11,15	2,21	3,76	1,29	4,75	1,56

Tabla 3.42. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de ceniza volante.

<i>Elemento</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>
<i>[% peso]</i>	60,47	21,06	4,83	6,65	2,59	2,67	1,74

En la segunda etapa de la caracterización, se han fabricado morteros autonivelantes con las adiciones presentadas en este apartado junto con la escoria de cubilote valorizada con el propósito de evaluar la influencia de estas partículas en las propiedades reológicas y mecánicas en las pastas de mortero en estado fresco y endurecido.

3.2.5 Cemento

En el estudio experimental, se ha empleado cemento portland tipo CEM I 52,5 R, Figura 3.62, que corresponde a la mayor clase resistente de acuerdo a la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 [59]. La sigla R significa que es un cemento de fraguado acelerado que proporciona alta resistencia inicial. Proviene de la planta de Cementos Lemoa ubicada en Lemoa, Vizcaya y ha sido proporcionado por la empresa de prefabricados Rocacero situada en Polanco, Cantabria en sacos de 25 kg.



Figura 3.62. Aspecto del cemento portland tipo I 52,5 R.

3.2.5.1 Determinación de la densidad real

La densidad del cemento se determinó de acuerdo al método descrito en el apartado 3.2.2.2.1, empleando propanol como agente dispersante. El valor medio de dos determinaciones, se presenta en la Tabla 3.43.

Tabla 3.43. Densidad real del cemento empleado.

Muestra	Densidad [g/cm ³]
CEM I 52,5 R	3,11

3.2.5.2 Determinación de la finura Blaine

Tal y como se describe en el apartado 3.2.2.2.2 se determinó la superficie específica del cemento, el resultado se recoge en la Tabla 3.44.

Tabla 3.44. Finura Blaine del cemento.

Muestra	Finura [cm ² /g]
CEM I 52,5 R	4957

3.2.5.3 Fluorescencia de rayos X

La composición química del cemento se determinó mediante fluorescencia de rayos x, de acuerdo al apartado 3.2.1.1.1. En la Tabla 3.45 se presentan los resultados del análisis.

Tabla 3.45. Caracterización química del cemento.

Compuesto*	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂
[% peso]	66,60	17,81	4,79	4,49	3,38	1,30	0,78	0,20

*Los compuestos no incluidos se sitúan por debajo del 0,2%.

3.2.5.4 Microscopía electrónica de barrido

La caracterización en el microscopio electrónico de barrido se realizó, inicialmente, sobre el cemento de acuerdo al apartado 3.2.1.1.1. En la Figura 3.63 se presenta una micrografía del cemento a gran número de aumentos, y en la Tabla 3.46 y Tabla 3.47, los resultados de los análisis realizados mediante EDS en elementos y compuestos.

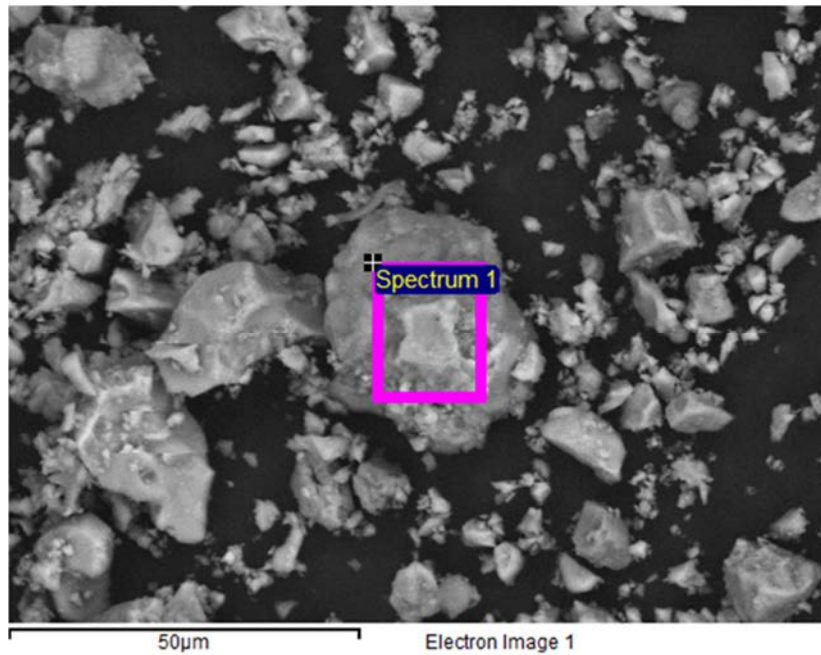


Figura 3.63. Micrografía de las partículas de cemento.

Tabla 3.46. Elementos detectados en el análisis EDS de una partícula de cemento.

Elemento	O	Ca	Si	Fe	S	Al	K	Mg
[% peso]	36,30	42,40	8,43	4,34	3,34	2,99	1,26	0,95

Tabla 3.47. Compuestos obtenidos mediante estequiometría tras el análisis EDS de una partícula de cemento.

Compuesto	CaO	SiO ₂	SO ₃	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O
[% peso]	59,32	18,03	8,33	5,58	5,64	1,57	1,52

3.2.5.5 Caracterización mecánica del cemento

Las resistencias mecánicas del cemento se han llevado a cabo de acuerdo a las indicaciones de la norma UNE-EN 196-1: Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas [130]. Esta propiedad se obtiene de la rotura de las semiprobetas resultantes del ensayo de flexotracción de probetas prismáticas normalizadas, elaboradas con la arena y la dosificación estipulada en la citada norma. Para su elaboración, los moldes se han compactado en mesa vibratoria. Transcurridas 24 horas de la fabricación, se desmoldaron las probetas y fueron sumergidas en agua a 20 °C hasta el momento de la ejecución de los ensayos mecánicos.

Los ensayos del mortero endurecido con 28 días de edad, se realizaron en una máquina servohidráulica de ensayos estáticos con una célula de carga de 250 kN de capacidad, marca INSTRON y modelo 8803. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 3.48.

Tabla 3.48. Propiedades mecánicas del cemento Lemona.

CEM I 52,5 R	Resistencia a 28 días [MPa]
Flexotracción	4,44
Compresión	55,33

3.2.6 Aditivos

Al inicio de la investigación, para obtener altas prestaciones mecánicas, además de alcanzar la mayor fluidez de las pastas, se emplearon los aditivos Glenium de la marca BASF que permiten reducir al máximo la relación agua/cemento y aportar el escurrimiento adecuado de las mezclas. Al fabricar hormigón autocompactante dosificado con escorias de horno eléctrico, se observó que también era necesario incrementar la viscosidad de la mezcla debido a la segregación del árido. Para evitar el uso de más productos en las dosificaciones, como, por ejemplo, los aditivos moduladores de la viscosidad, se propuso realizar pruebas con otros aditivos. Antes de iniciar las amasadas, la planta de prefabricados Rocacero sugirió el uso del aditivo Fluid Premia fabricado por la empresa Chryso.

Para la selección del aditivo, se tuvieron en cuenta dos aspectos: proporcionar la resistencia mecánica deseada y la fluidez requerida por un HAC. Para ello, se han realizado pruebas con el Master Glenium de BASF y el Fluid Premia de Chryso proporcionados por la planta de prefabricados Rocacero en bidones de 25 l, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.64.



Figura 3.64. Aditivos superplastificantes de última generación, Master Glenium (izda.) y Fluid Premia (dcha.).

Se fabricaron morteros normalizados, añadiendo un 2% de aditivo respecto del contenido de cemento en peso de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Posteriormente, se procedió a realizar el ensayo de consistencia del mortero fresco en la mesa de sacudidas de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-3: Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas) [131], para cada aditivo, Figura 3.65 y Figura 3.66.



Figura 3.65. Ensayo de la mesa de sacudidas de mortero con el aditivo Master Glenium.



Figura 3.66. Ensayo de la mesa de sacudidas de mortero con el aditivo Fluid Premia.

En primer lugar, se observó que el diámetro del mortero con el aditivo Fluid Premia fue de 11,5 centímetros, mientras que el aditivo Master Glenium resultó en 13 centímetros. Este pequeño incremento en la fluidez en estado fresco, se magnifica, significativamente, en morteros autonivelantes, como se puede apreciar en la Figura 3.67.

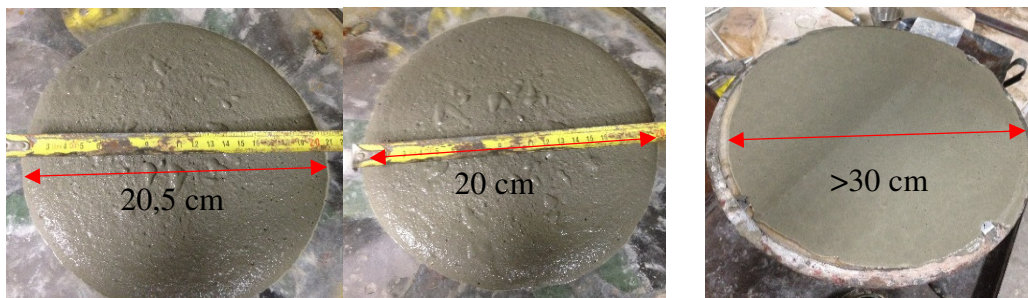


Figura 3.67. Pruebas de aditivos con morteros autonivelantes.

Como se ha puesto de manifiesto, la resistencia mecánica del mortero era un aspecto fundamental para la selección del aditivo. Para ello, se fabricaron probetas prismáticas con los dos aditivos evaluados, Figura 3.68 y Figura 3.69.



Figura 3.68. Morteros frescos para la fabricación de probetas prismáticas.

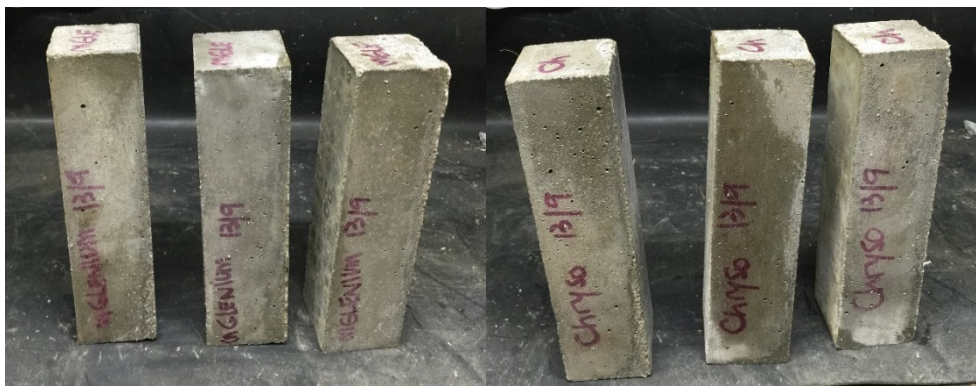


Figura 3.69. Morteros endurecidos empleados en la selección del aditivo.

A continuación, en la Tabla 3.49, se recogen las propiedades mecánicas obtenidas durante el proceso de selección del aditivo.

Tabla 3.49. Propiedades mecánicas a los 28 días de los morteros fabricados con los aditivos Master Glenium y Fluid Premia.

Aditivo	Flexotracción [MPa]	Compresión [MPa]
Master Glenium	6,44	62,57
Fluid Premia	5,83	62,57

Basado en los resultados de resistencia y en el incremento de la viscosidad, el aditivo seleccionado para la fabricación de hormigones autocompactantes fue el Fluid Premia de Chryso.

3.2.6.1 Punto de saturación del aditivo

Una vez elegido el aditivo se determinó si el porcentaje de aditivo seleccionado superaba o no el punto de saturación del mismo mediante el cono de Marsh, Figura 3.70.



Figura 3.70. Cono de Marsh empleado para determinar el punto de saturación del aditivo.

Este ensayo permite estudiar la fluidez de pastas y morteros. Es un procedimiento rápido y sencillo para obtener, de forma empírica, el punto de saturación de aditivos superplastificantes. Adicionalmente, permite evaluar la pérdida de fluidez con el tiempo.

El procedimiento consiste en llenar el cono con un litro de pasta a través de una rejilla para filtrar los grumos, y medir el tiempo que tarda en fluir a través del vértice del cono, una cantidad de 200 ml. Las pastas se fabricaron en la amasadora de mortero.

Los ensayos llevados a cabo se realizaron sobre pastas de cemento con distintos porcentajes de aditivo 0,5%, 1%, 1,5%, 2% y 2,5% respecto del peso de cemento. Las pastas se dosificaron partiendo de 1500 g de cemento y una relación agua/cemento de 0,38, amasadas durante tres minutos. Esta relación agua/cemento permitió obtener pastas fluidas para el menor porcentaje evaluado.

Como complemento a los resultados, se registraron los tiempos de flujo de 500, 750 y 1000 ml.

En la Figura 3.71, se presentan los tiempos registrados para distinto volumen y proporciones de aditivo.

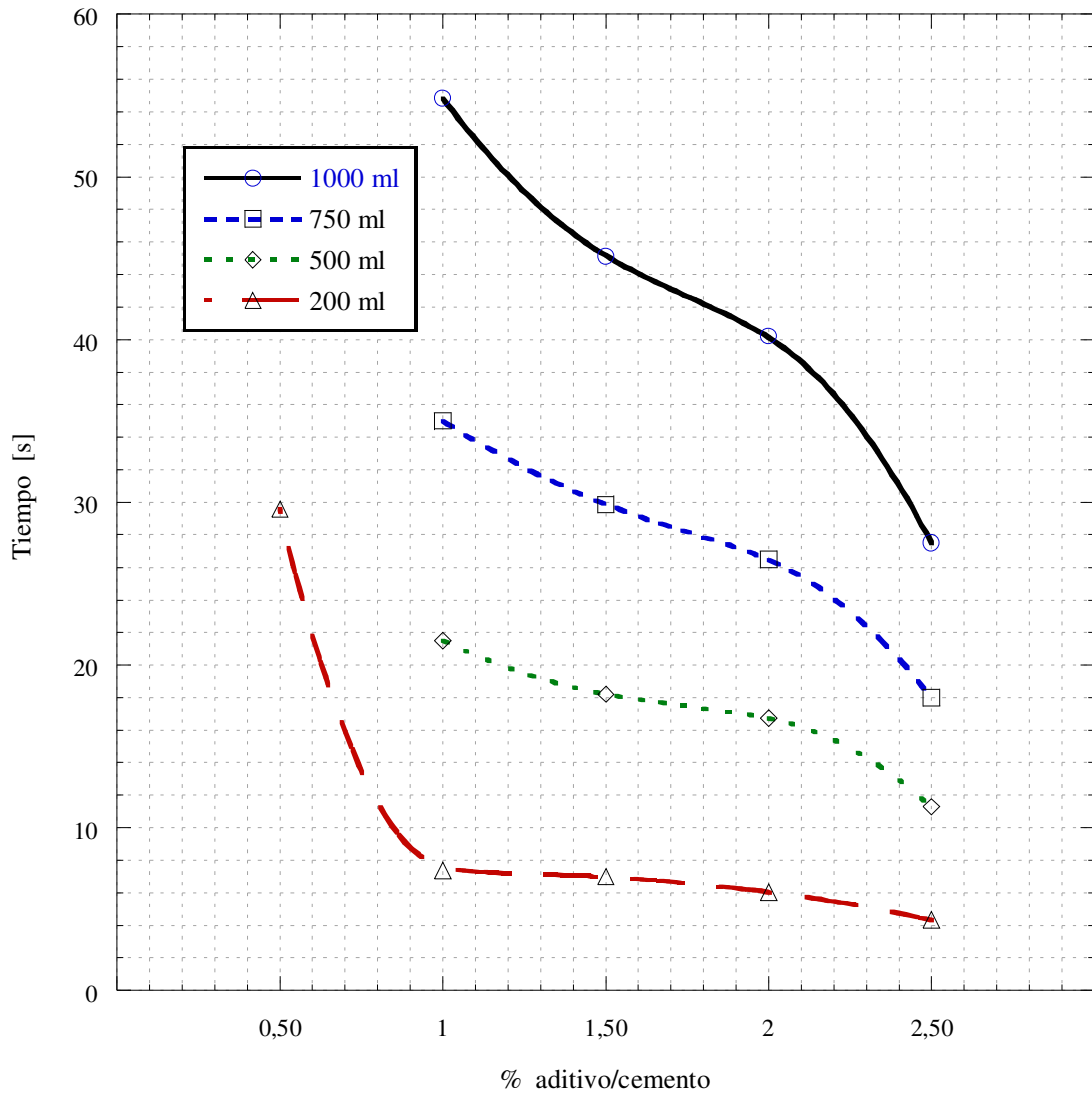


Figura 3.71. Resultados experimentales para evaluar el punto de saturación del aditivo.

Los resultados del flujo de 200 ml reflejan que el punto de saturación del aditivo se sitúa en torno a 1%, mientras que, el flujo de cantidades superiores presenta un cambio significativo de la pendiente de las curvas en el 2%, que refleja una disminución importante de la viscosidad.

3.2.7 Agua

El agua empleada en la fabricación de pastas, morteros y hormigones ha sido agua potable suministrada por el Ayuntamiento de Santander, cuya gestión es responsabilidad de la empresa Aqualia. El agua es apta para consumo humano tras ser tratada para eliminar cualquier tipo de impureza de acuerdo al R.D. 140/2003 del 7 de febrero de 2003.

3.3 Morteros

Del mismo modo que se caracterizaron los aditivos superplastificantes y el cemento, se fabricaron morteros con la dosificación normalizada según las proporciones que especifica la norma UNE-EN 196-1: Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas [130]. Se realizaron amasadas con distintos porcentajes de sustitución en peso de escoria de cubilote valorizada por cemento, con la finalidad de comprobar la reactividad de la escoria, así como, también, posibles efectos indeseados. En esta ocasión se utilizó la arena de sílice disponible para la fabricación de hormigón autocompactante.

Se prepararon cuatro dosificaciones con porcentajes de sustitución del 0%, 10%, 20% y 30%. Se realizaron tres amasadas para cada porcentaje de sustitución con la finalidad de evaluar la evolución de las propiedades mecánicas.

Al igual que en las pruebas de aditivos, se determinó la consistencia de las muestras en la mesa de sacudidas según la norma UNE-EN 1015-3 [131] para cada una de las mezclas, Figura 3.72 a Figura 3.75.

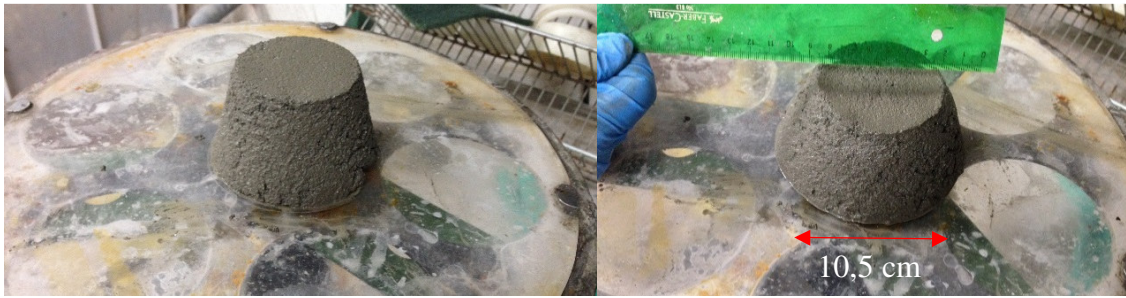


Figura 3.72. Consistencia del mortero fresco sin sustitución antes y después de 15 sacudidas.



Figura 3.73. Consistencia del mortero fresco con un 10% de sustitución de cemento por escoria antes y después de 15 sacudidas.



Figura 3.74. Consistencia del mortero fresco con un 20% de sustitución de cemento por escoria antes y después de 15 sacudidas.



Figura 3.75. Consistencia del mortero fresco con un 30% de sustitución de cemento por escoria antes y después de 15 sacudidas.

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo en una máquina servohidráulica Instron de 250 kN de capacidad máxima en control de posición a una velocidad de 0,05 mm/s para los ensayos de flexión y a 0,1 mm/s para los ensayos de compresión, Figura 3.76.



Figura 3.76. Ensayos de compresión de morteros con escoria de cubilote.

En la Figura 3.77, se presentan los resultados de los ensayos de flexotracción de los morteros tras 7, 28, 60 y 90 días de curado, con el objetivo de evaluar la evolución de las resistencias para los distintos porcentajes de sustitución.

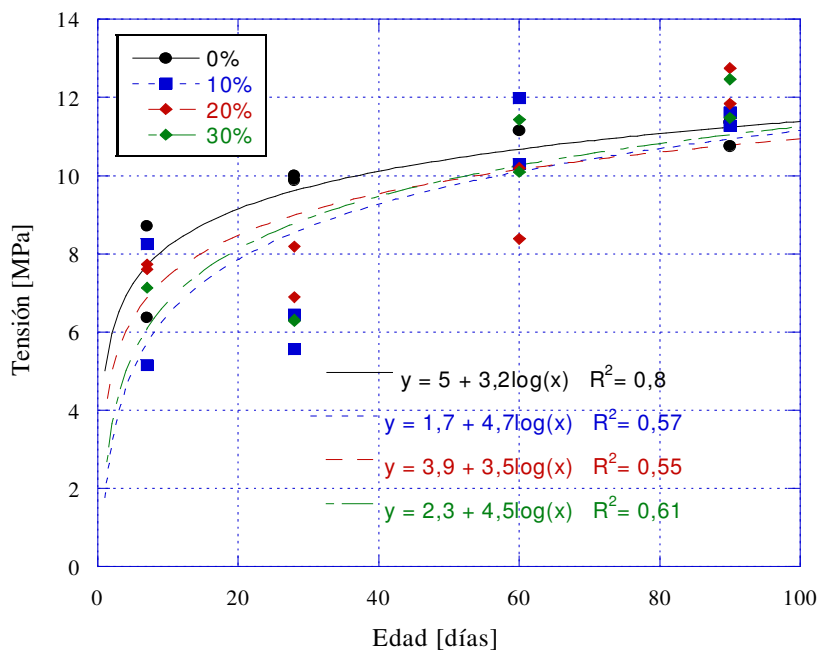


Figura 3.77. Comportamiento a flexotracción de los morteros con distintos porcentajes de sustitución de cemento por escoria de cubilote.

En la Figura 3.78, se presentan los resultados de los ensayos de compresión de los morteros tras 7, 28, 60 y 90 días de curado.

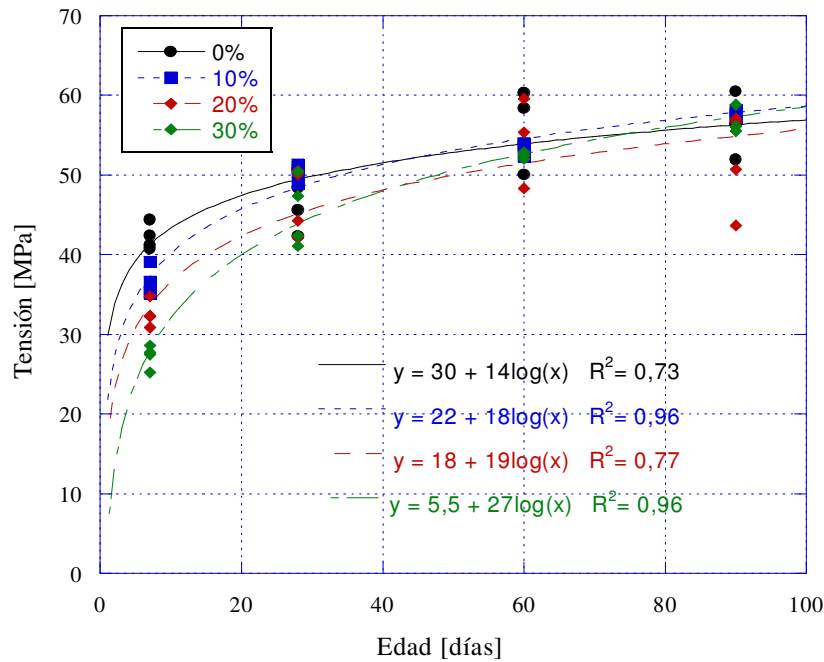


Figura 3.78. Comportamiento a compresión de los morteros con distintos porcentajes de sustitución de cemento por escoria de cubilote.

Como se esperaba todos los morteros ven incrementada su resistencia a la flexotracción y a la compresión con la edad. Se observa que, a edades avanzadas, las resistencias de los morteros, con los cuatro distintos porcentajes de sustitución, tienden a converger. Este efecto tiene lugar como consecuencia de la reacción puzolánica de la escoria de cubilote, lo cual es un valor añadido al uso de este tipo de residuo.

En la siguiente fase, se comparó la influencia de las tres adiciones estudiadas. Para ello, se realizaron amasadas de morteros manteniendo constantes las proporciones de todos los materiales con la finalidad de evaluar el efecto de dichas adiciones sobre la fluidez del mortero en estado fresco y en el comportamiento mecánico del mortero endurecido.

Las mezclas se fabricaron con la dosificación que se presenta en la Tabla 3.50.

Tabla 3.50. Dosificación de morteros con adiciones.

<i>Material</i>	<i>Peso [g]</i>
<i>Cem I 52,5 R</i>	450
<i>Arena de sílice</i>	390
<i>Arena de ofita</i>	435
<i>Adición</i>	200
<i>Aditivo Glenium</i>	9

Para evaluar el comportamiento en estado fresco de las mezclas, se determinó, en cada caso, el escurrimiento del mortero en estado fresco tras el llenado del cono empleado para el ensayo en la mesa de sacudidas, Figura 3.79.

El llenado del cono hasta el enrase se realizó sin compactación externa y, posteriormente, se mantuvo la mezcla durante 20 segundos en reposo. A continuación se levantó el cono en sentido vertical, permitiendo el escurrimiento del mortero por su propio peso. Finalmente, se determinaron dos diámetros perpendiculares entre sí de la torta de mortero escurrido.



Figura 3.79. Ensayo de escurrimiento empleando el cono de la mesa de sacudidas.

Debido al elevado contenido de adición empleado, se obtuvieron morteros con fluidez moderada, por lo tanto, tras determinar el escurrimiento del mortero, se sometieron las mezclas a 15 golpes en la mesa de sacudidas, a razón de un golpe por segundo. Los resultados de la caracterización en estado fresco se recogen en la Tabla 3.51.

El mortero con filler calizo se consideró como el mortero patrón, de manera tal, que se realizaron amasadas consecutivas de los morteros fabricados con el resto de adiciones ajustando la relación agua/cemento hasta obtener la misma consistencia.

Tabla 3.51. Comportamiento en estado fresco de los morteros con adiciones.

Adición	a/c	Escorrimento [mm]		Escorrimento tras 15 golpes [mm]	
		Ø1	Ø2	Ø1	Ø2
<i>Filler calizo</i>	0,43	15	16	19	19
<i>Cenizas volantes</i>	0,47	15	17	21	22
<i>Escoria de cubilote</i>	0,40	14	16	19	21

De la Figura 3.80 a la Figura 3.82, se presenta el aspecto de los morteros tras haber sido sometidos a 15 golpes en la mesa de sacudidas.



Figura 3.80. Mortero fabricado con filler calizo.



Figura 3.81. Mortero fabricado con cenizas volantes.



Figura 3.82. Mortero fabricado con escoria de cubilote.

Se fabricaron nueve probetas prismáticas por dosificación y se ensayaron tres de cada una de ellas a 7, 28 y 60 días. El llenado de las probetas se realizó sin compactación mecánica y con ayuda de una espátula.

Los resultados obtenidos para los ensayos de flexotracción se presentan en la Figura 3.83 y para los ensayos de compresión en la Figura 3.84.

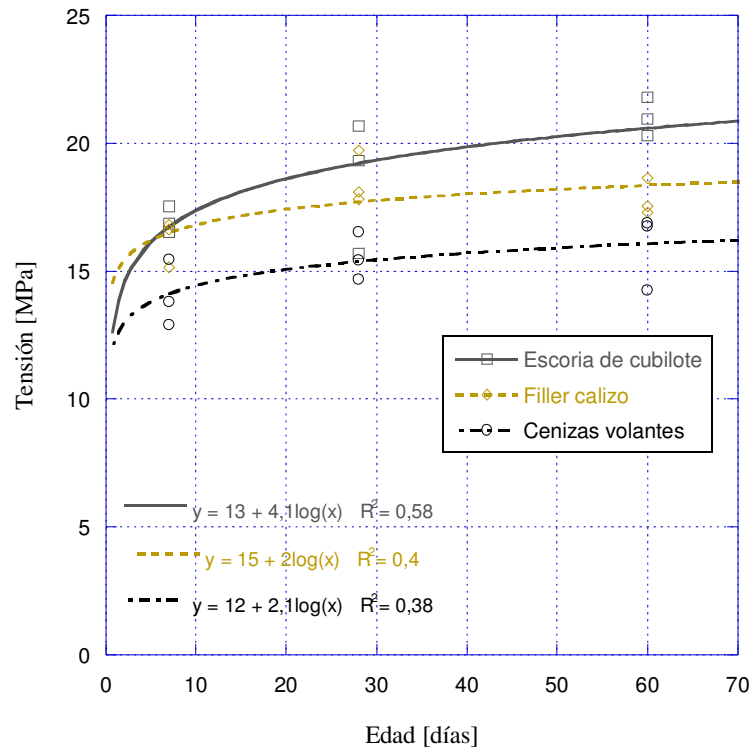


Figura 3.83. Comportamiento a flexotracción de los morteros con adiciones.

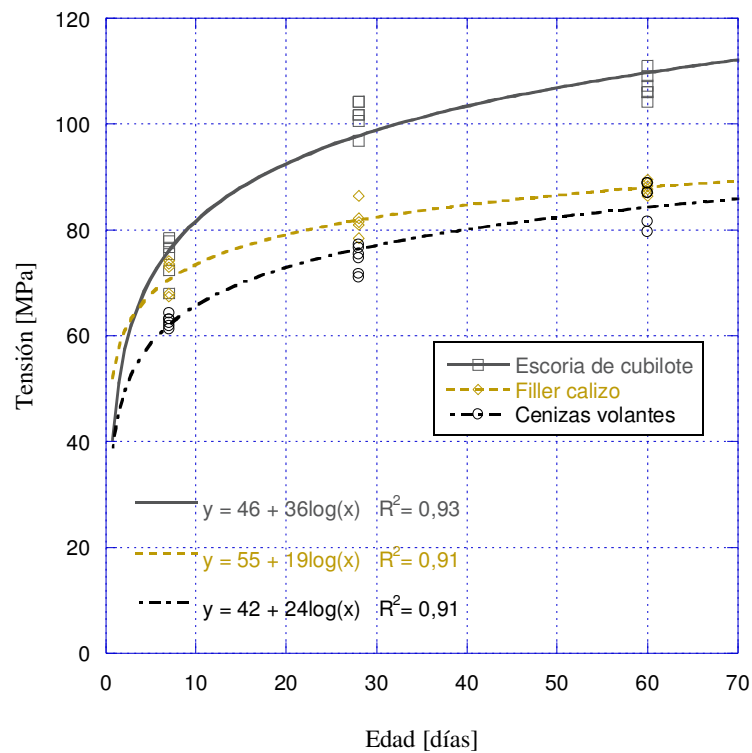


Figura 3.84. Comportamiento a compresión de los morteros con adiciones.

Las pruebas en estado endurecido reflejan el carácter reactivo de la escoria de cubilote, proporcionando un mortero de resistencia muy superior al resto de adiciones.

3.4 Hormigones

El objetivo de la Tesis es diseñar un hormigón autocompactante de altas prestaciones, empleando el mayor contenido posible de subproductos siderúrgicos. Las dosificaciones sobre las que se apoya este estudio, toman como base de partida las propuestas recogidas en la literatura científica y las experiencias previas con hormigones convencionales con este tipo de árido llevadas a cabo por el grupo LADICIM.

El uso de escorias de horno eléctrico en el hormigón reduce, notablemente, la trabajabilidad, lo cual dificulta el amasado, colocación y compactación del hormigón debido a la morfología rugosa y cavernosa de las partículas. Por otro lado, la falta de finos en la arena de escoria impide la fabricación de hormigón exclusivamente con escorias, agua y cemento, siendo indispensable añadir arena natural e incluso filler.

Los métodos convencionales de dosificación con las tres fracciones de árido de escoria de horno eléctrico y una arena natural proporcionan mezclas con un asiento del cono de Abrams válido para hormigones bombeables, Figura 3.85, demandando incrementar el contenido de arena, agua y la incorporación de un aditivo superplastificante para alcanzar consistencias fluidas. Esto puede traer como consecuencia la disminución de las propiedades mecánicas y de durabilidad.



Figura 3.85. *Hormigones convencionales con escorias de horno eléctrico.*

La facilidad en la colocación y la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad, son algunas de las ventajas del hormigón autocompactante. El uso de esta tecnología incorporando escorias de horno eléctrico y de cubilote puede motivar el incremento del uso de este tipo de escorias valorizadas.

3.4.1 Método de dosificación

Para la dosificación del hormigón autocompactante de control, se tomó como referencia parte de la metodología planteada por P. Dinakar et al. [132], siendo un método de diseño basado en la resistencia a compresión.

El primer paso para el diseño de las mezclas de hormigón autocompactante fue la selección de los materiales. Para la fracción gruesa se propuso emplear, por separado, ofita (GOF) y escoria de horno eléctrico (GEN), limitando su porcentaje de presencia para evitar problemas de bloqueo y segregación. Para la fracción fina se contó (por separado), con arena de ofita (AO) y arena de escoria de horno eléctrico (AEN), mezcladas con arena de sílice (ASI). En cuanto a las adiciones, se incorporaron, por separado, filler calizo (FC), cenizas volantes (CV) y escoria de cubilote finamente molida (FE).

Las mezclas propuestas y las dosificaciones, tanto en peso como en volumen, se presentan en el Capítulo 4.

Los ajustes realizados en la fase de diseño del hormigón autocompactantes se realizaron siguiendo el esquema de la Figura 3.86.

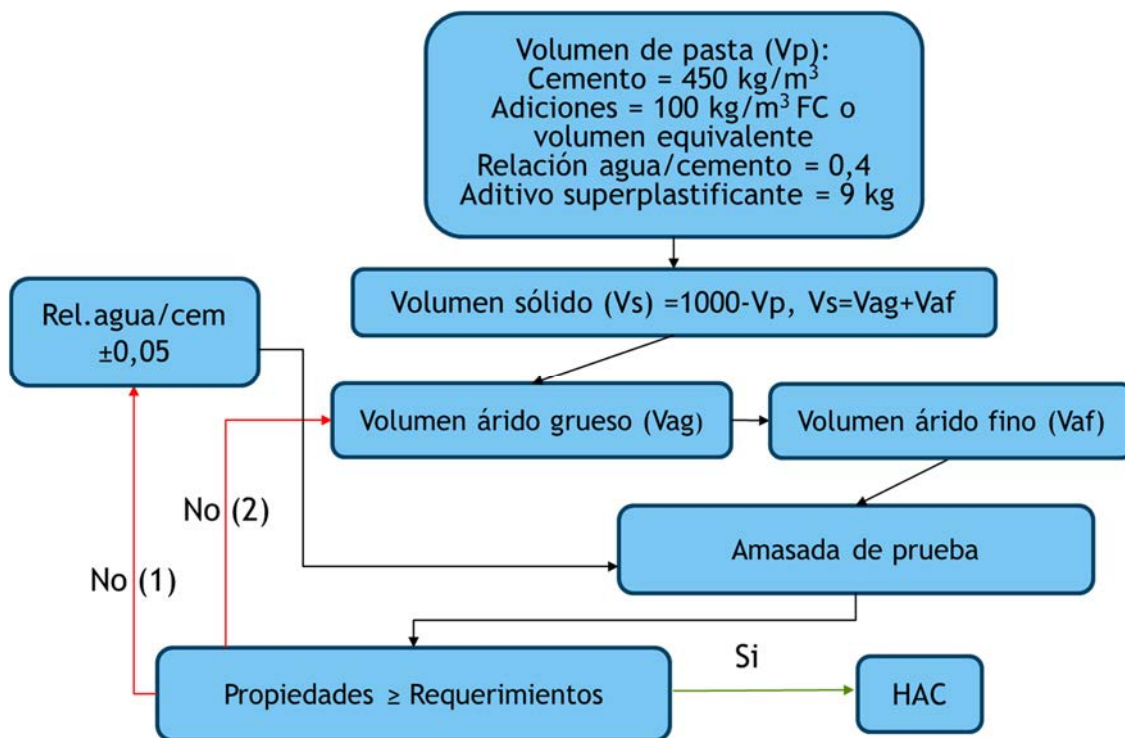


Figura 3.86. Esquema de diseño del hormigón autocompactante.

Dado que uno de los objetivos de la Tesis es fabricar hormigones de altas prestaciones con resistencia característica de 100 MPa a los 90 días, se fijó la cantidad de cemento Portland tipo I 52,5 R en 450 kg/m³, mientras que el aditivo superplastificante Fluid Premia en 2% en peso del contenido de cemento.

Entre las recomendaciones existentes para la fabricación de hormigón autocompactante sugeridas por la EHE-08 y EFNARC [7,43], figura que, el contenido de finos compuesto por cemento, adiciones y fillers, no debe superar los 600 kg/m³; por ello, se fijó la cantidad de filler calizo en 100 kg/m³, resultando en 550 kg/m³, sin considerar el contenido de fillers aportados por la fracción fina de áridos.

Con base en las pruebas de morteros, las cantidades del resto de adiciones se definieron tomando como referencia el volumen de 100 kg/m³ de filler calizo, con el propósito de añadir el mismo volumen de estos componentes en las mezclas y evaluar la influencia de las distintas adiciones en el comportamiento del hormigón.

Como se ha manifestado anteriormente, la capacidad resistente del hormigón era uno de los principales objetivos, por lo que se procuró añadir la menor cantidad de agua posible,

sin que esto afectara la fluidez del hormigón. Basándose en ensayos con morteros y amasadas de prueba, la relación agua/cemento se fijó, inicialmente, en 0,4. Esta proporción se modificaba ligeramente ($\pm 0,05$) si, tras el amasado, la mezcla exhibía fluidez insuficiente o indicios de segregación.

Tras definir las cantidades de los componentes de la pasta de hormigón por metro cúbico (cemento, adición, aditivo y agua), se procedió a definir la distribución de los áridos en el volumen restante.

Con el fin de optimizar el empleo de los subproductos, se propuso maximizar el contenido de árido grueso (gravilla) en la mezclas, siempre comprobando que ello no implicaba mayores riesgos de segregación o bloqueo. Así, este porcentaje se fijó, inicialmente, en el 50% del volumen de áridos, acorde con lo máximo establecido en las recomendaciones de diseño [133]. El resto de volumen de áridos se distribuyó entre la combinación de arenas.

Los requerimiento en estado fresco, se presentan en el apartados 3.4.2 tras la descripción de los métodos de caracterización normalizados y los rangos de clasificación establecidos en la normativa en vigor [50].

3.4.1.1 Fabricación del hormigón HAC

La elaboración de los hormigones autocompactantes, se realizó de manera análoga a la de fabricación de hormigones convencionales, a excepción del tiempo de amasado que se incrementó notablemente para garantizar la completa distribución del aditivo en la mezcla.



Figura 3.87. Amasadora empleada en la confección de hormigón.

El mezclado del hormigón se realizó en una hormigonera de tambor giratorio con una cuba de 120 l de capacidad, Figura 3.87. Todas las amasadas fueron de 30 l, siguiendo el protocolo descrito a continuación:

En primer lugar, se comprueba el correcto funcionamiento de todos los equipos necesarios para realizar la amasada. Se procede al pesaje de cada uno de los componentes en el siguiente orden: áridos, adición, cemento, agua y aditivo.

Tras ello, se procede a mezclar el aditivo superplastificante con una pequeña cantidad del agua de amasado. En este proceso, el volumen de agua necesario se sitúa en torno a cinco veces el volumen del aditivo y tiene como objetivo dispersar adecuadamente este último, dada la alta viscosidad del mismo.

Antes de introducir los materiales en la hormigonera, el interior de ésta se humedece con agua y se deja escurriendo para no alterar la relación agua/cemento de la dosificación. Se añaden, seguidamente, los áridos de mayor a menor tamaño: gravilla y arena. El llenado, se completa con el cemento y la adición. En este momento, se realiza un registro de la temperatura y la humedad ambiental.

Se pone en marcha la hormigonera, el cronómetro y comienza a añadirse el agua de amasado. El proceso de vertido del agua de amasado debe tener una duración de,

aproximadamente, 20 segundos. Tras un minuto de haber añadido el agua se incorpora el aditivo disuelto.

Se amasa durante 12 minutos sin interrupciones. Llegado a este punto, se detiene el giro y se analiza la consistencia del hormigón, observando la capacidad de nivelación en el interior de la hormigonera, sin ocurrir el bloqueo de la mezcla en las palas, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.88.



Figura 3.88. *Consistencia esperada tras el amasado del hormigón.*

3.4.2 Caracterización del hormigón en estado fresco

El grado de autocompactibilidad del hormigón depende, primordialmente, de tres aspectos: la capacidad de flujo, la capacidad de paso y la estabilidad (tanto dinámica como estática). La caracterización de estas propiedades se realiza mediante ensayos normalizados distintos a los de un hormigón convencional.

En la norma UNE-EN 206-9 [50] se recogen rangos recomendados para garantizar la autocompactibilidad y se tipifican los hormigones autocompactantes basados en los resultados de los ensayos de caracterización en estado fresco.

Una vez finalizado el proceso de amasado, se procedió a evaluar este comportamiento. Para ello, se han seguido las indicaciones de las normas correspondientes. Los ensayos realizados, que se describen a continuación, fueron tres: escurrimiento, el método de la caja en L y el del embudo en V.

3.4.2.1 Ensayo de escurrimiento

El ensayo de escurrimiento, se ha realizado de acuerdo a las estipulaciones recogidas en la norma UNE-EN 12350-8: Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento [134]. La finalidad de este ensayo es evaluar la capacidad de flujo del hormigón, así como, también, su estabilidad.

Para la ejecución del ensayo, se utilizó el molde cónico del ensayo de asentamiento (cono de Abrams, UNE-EN 12350-2: Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento [135] y una placa de acero metálica de 900 x 900 mm, en el centro de la cual se encuentran grabados tres círculos concéntricos de 210, 300 y 500 mm de diámetro y una cruz cuyas líneas son paralelas a los bordes de la bandeja.

El ensayo se realiza de la siguiente manera: Tras comprobar la horizontalidad de la placa de acero, se humedece con una bayeta la superficie del interior del cono y la de la placa. Se coloca el cono haciendo coincidir la base con el círculo de 210 mm. Se llena el cono con 5,5 litros de hormigón fresco en una sola operación hasta enrasar, sin ningún método de compactación externo. Se mantiene en reposo durante 30 segundos mientras se retira

el hormigón caído sobre la placa. A continuación, se levanta el cono verticalmente en un solo movimiento. Una vez que el hormigón ha dejado de fluir, se determina el diámetro de mayor longitud (d_1) y el perpendicular a éste (d_2), Figura 3.89, ambos redondeados a los 10 mm más próximos. El ensayo se considera válido siempre y cuando la diferencia entre d_1 y d_2 sea inferior a 50 mm, de lo contrario se debe repetir la prueba.



Figura 3.89. Determinación del escurrimiento del hormigón.

El resultado del ensayo SF (slump flow) se obtiene calculando la media de los diámetros redondeada a los 10 mm más próximos.

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (13)$$

El círculo de 500 mm de diámetro sirve de referencia para determinar el tiempo que tarda el hormigón, una vez que ha comenzado a fluir, en alcanzar dicho círculo. Este parámetro se define como t_{500} y permite evaluar la viscosidad relativa del hormigón, así como, también, la velocidad de flujo.

Según norma UNE-EN 206-9 [50], los rangos admisibles para este ensayo se sitúan entre 550 y 850 mm para el escurrimiento (SF) y el t_{500} debe ser menor o igual a 8 segundos.

Basados en el SF, la norma UNE-EN 206-9 [50] y EFNARC [43] clasifican al hormigón según recoge la Tabla 3.52.

Tabla 3.52. Clasificación del hormigón HAC según el escurrimiento.

Clase		Ecurrimiento [mm]
UNE-EN	EFNARC	
AC-E1	SF1	$550 \leq SF \leq 650$
AC-E2	SF2	$650 \leq SF \leq 750$
AC-E3	SF3	$750 \leq SF \leq 850$

Mientras que, según el t_{500} , la viscosidad del hormigón se puede clasificar de acuerdo a la Tabla 3.53:

Tabla 3.53. Clasificación del hormigón según la viscosidad.

Clase		Tiempo [s]
UNE-EN	EFNARC	
AC-V1	VS2*	$5 \leq t_{500} \leq 8$
AC-V2		$2 \leq t_{500} \leq 5$
AC-V3	VS1	$t_{500} \leq 2$

* No existe límite superior.

Como parte de los requerimientos en estado fresco, se espera que los hormigones presenten un escurrimiento de clase AC-E2 (SF2) y una viscosidad de clase AC-V1 (VF2).

3.4.2.2 Método de la caja en L

El ensayo de la caja en L se ha ajustado a las estipulaciones de la norma UNE-EN 12350-10: Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L [136]. La finalidad de este ensayo es evaluar la capacidad de paso del hormigón autocompactante a través de las armaduras, así como, también, su estabilidad.

Para la realización de este ensayo, se emplea un molde denominado caja en “L”, cuyas dimensiones se presentan en la Figura 3.90. En la parte inferior del tramo vertical, el molde dispone de una compuerta deslizante y, por delante de ésta, dos o tres barras lisas de acero de 12 mm de diámetro.

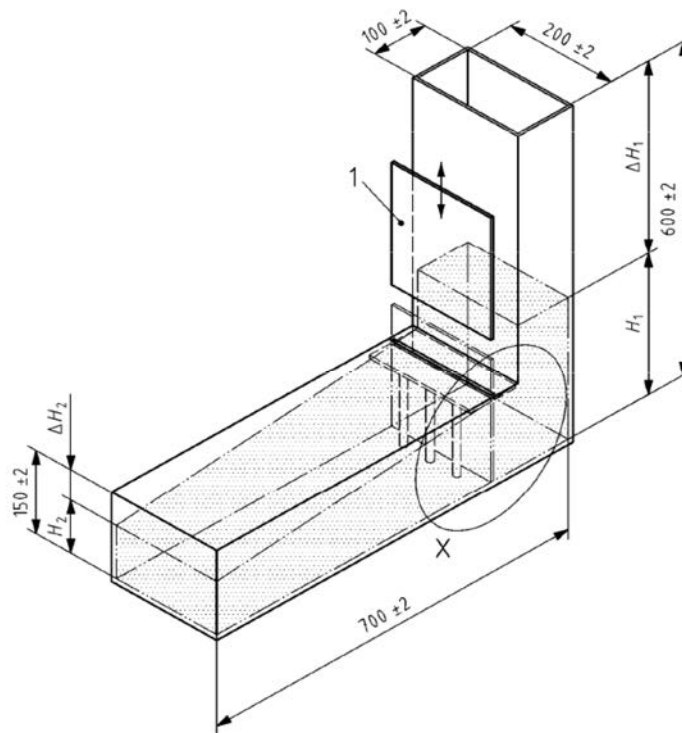


Figura 3.90. Dimensiones de la caja en L en mm [136].

La metodología del ensayo parte de colocar el molde sobre una superficie lisa, humedecer su interior y cerrar la compuerta. El procedimiento indica rellenar el compartimiento vertical del molde con 12 l de hormigón fresco hasta el enrase del tramo vertical en una sola operación, sin aplicar ningún método de compactación. A continuación, se mantiene en reposo el hormigón durante 60 segundos.

Transcurrido este tiempo, se abre la compuerta, permitiendo el flujo del hormigón hacia el tramo horizontal. Un vez que ha cesado el flujo del hormigón, se mide la altura del hormigón en el tramo vertical H_1 y al final del tramo horizontal H_2 , Figura 3.90. Dichas alturas se calculan mediante tres mediciones y se redondean al milímetro más próximo.

El resultado del ensayo PL (passing ability), se determina calculando el cociente de las alturas redondeado a la centésima más próxima.

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (14)$$

Según la norma UNE-EN 206-9 [50], cuando el tamaño máximo de árido es igual o inferior a 20 mm, se debe realizar el ensayo de la caja en L con tres barras, resultando como mínimo en 0,8 permitiendo clasificarlo como AC-RB2. En cambio, EFNARC [43] clasifica dicha capacidad de paso como PA2.

3.4.2.3 Ensayo del embudo en V

El ensayo del embudo en V se ha realizado de acuerdo a las estipulaciones recogidas en la norma UNE-EN 12350-9: Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V [137]. La finalidad del ensayo del embudo en V es evaluar la viscosidad, la capacidad de paso del hormigón por espacios confinados, así como, también, la capacidad de relleno de los moldes.

Para la ejecución del ensayo se emplea un molde de acero con forma de “V” cuyas dimensiones se presentan en la Figura 3.91. El molde dispone de una compuerta abatible en la zona inferior del embudo identificada con el número 1.

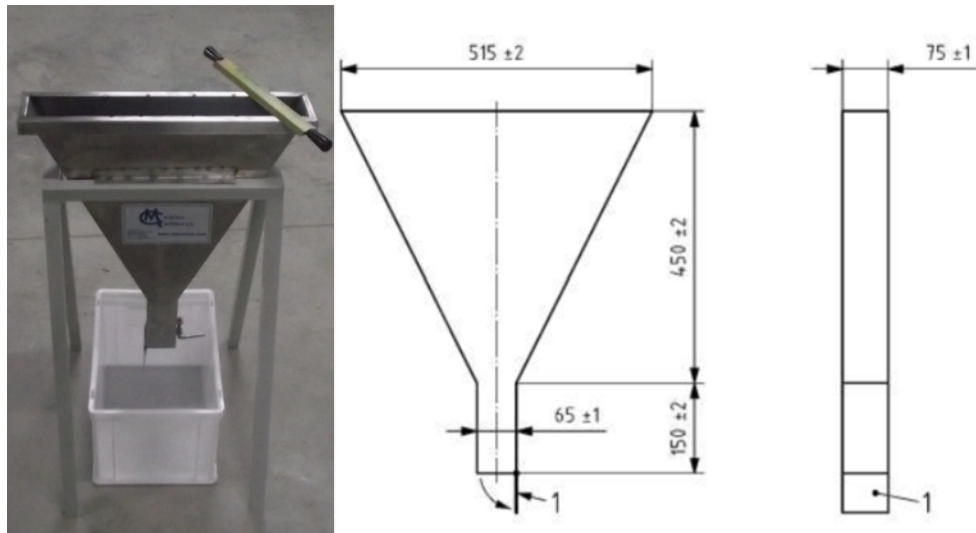


Figura 3.91. Embudo en V con cotas en mm [137].

La metodología del ensayo consiste en humedecer el interior del embudo y la compuerta para, tras cerrar esta última, proceder a llenar el molde con 10,5 litros de hormigón fresco hasta enrasarlo con la parte superior del embudo, en una sola operación sin aplicar ningún método de compactación. Se mantiene en reposo durante 10 segundos y, a continuación, se abre la compuerta inferior permitiendo vaciar el hormigón hacia el exterior. El resultado del ensayo es el tiempo, t_v , que tarda en fluir el hormigón a través del molde desde que se abre la compuerta hasta que se puede ver verticalmente a través del embudo.

Según la norma UNE-EN 206-9 [50], los rangos admisibles del t_v se sitúan entre 4 y 20 segundos. Adicionalmente, se presenta la clasificación de la viscosidad del hormigón de acuerdo a los valores de t_v obtenidos, en la Tabla 3.54.

Tabla 3.54. Clasificación de la viscosidad del hormigón autocompactante según EHE-08.

Clase	Tiempo [s]
AC-V1	$10 \leq t_v \leq 20$
AC-V2	$6 \leq t_v \leq 10$
AC-V3	$4 \leq t_v \leq 6$

Mientras que EFNARC [43] clasifica la viscosidad del hormigón según los valores de t_v obtenidos, de acuerdo a la Tabla 3.55

Tabla 3.55. Clasificación de la viscosidad del hormigón autocompactante según EFNARC.

<i>Clase</i>	<i>Tiempo [s]</i>
VF1	$t_v \leq 8$
VF2	$9 \leq t_v \leq 25$

Para los hormigones diseñados no se establecieron requerimientos del tiempo en el embudo en V por el elevado contenido de árido grueso en las dosificaciones, sin embargo, era indispensable que no ocurriera el bloqueo en su interior durante la ejecución del ensayo.

3.4.3 Hormigón en estado endurecido

En este apartado, se describen los ensayos realizados sobre los hormigones en estado endurecido. El apartado está dividido según las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad que han sido determinadas.

3.4.3.1 Probetas

Para la ejecución de los ensayos, se fabricaron cuatro tipos de probetas, si bien, en todos los casos, el llenado de los moldes se realizó en una sola operación. Posteriormente, se enrasaron y se dejaron en reposo durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se desmoldaron y se introdujeron en una cámara de humedad en condiciones de curado controladas de 20 ± 2 °C y 99% de humedad relativa, tal y como establece la norma UNE-EN 12390-2: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia [138].

Los cuatro tipos de probetas fabricadas en cada dosificación corresponden a:

- Probetas cúbicas de 100 mm de arista, Figura 3.92.



Figura 3.92. Aspecto de las probetas cúbicas.

- Probetas cilíndricas normalizadas 300 mm de alto x 150 mm de diámetro, Figura 3.93.



Figura 3.93. Aspecto de las probetas cilíndricas fabricadas.

- Probetas prismáticas de 300 mm de longitud y sección de 50 mm x 50 mm, Figura 3.94.

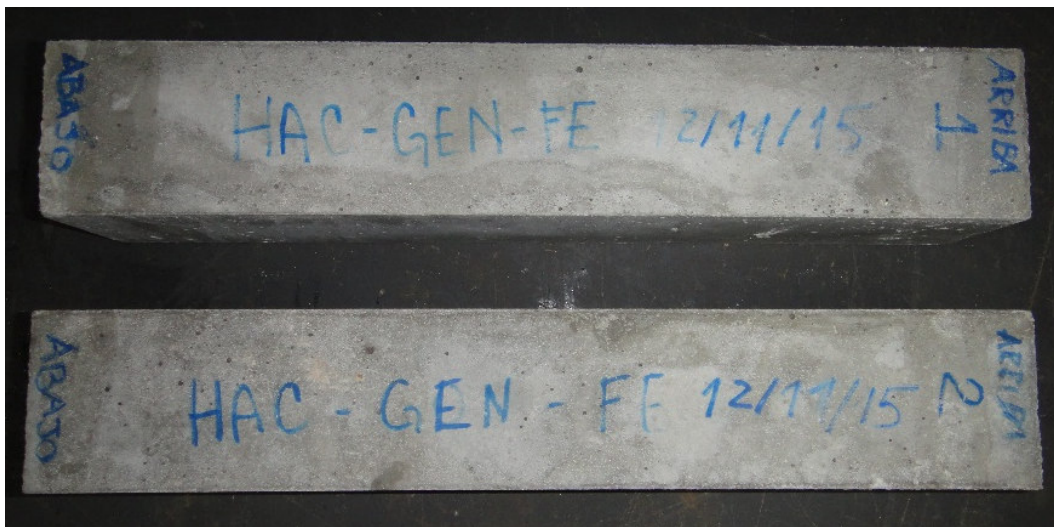


Figura 3.94. Aspecto de las probetas prismáticas fabricadas.

- Probetas cónicas, empleando como molde el cono del ensayo de consistencia según el método de Abrams, Figura 3.95.



Figura 3.95. Aspecto de las probetas cónicas fabricadas.

3.4.3.2 Propiedades físicas

A los 28 días de edad, se realizaron las determinaciones de la densidad, porosidad y absorción del hormigón endurecido. Se utilizaron submuestras obtenidas a partir de probetas cilíndricas normalizadas.

El despiece de las probetas cilíndricas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura se realiza mediante una cortadora con una sierra de disco de diamante en húmedo, obteniéndose así, dos muestras de, aproximadamente, 90 mm de altura y una tercera de 100 mm de altura que corresponde, en todos los casos, al tercio medio de la probeta, Figura 3.96. Previamente, se realiza un corte de unos 10 mm de espesor en los extremos superior e inferior, Figura 3.97.

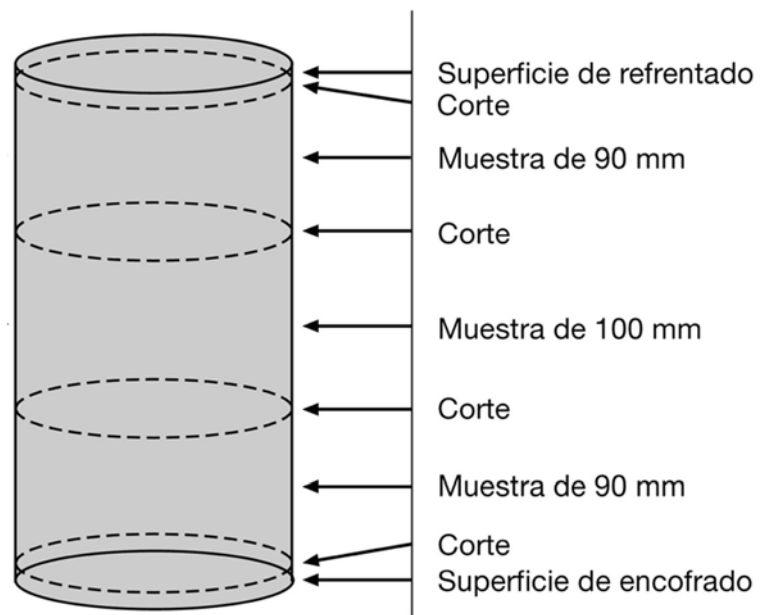


Figura 3.96. Esquema de corte de las probetas cilíndricas normalizadas.

Tras el corte se han determinado las densidades relativas, aparentes y saturadas, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 12390-7:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido [139]. Adicionalmente, se han determinado la porosidad accesible y el coeficiente de absorción, de acuerdo a las formulaciones descritas en la norma UNE 83980: Durabilidad del Hormigón. Métodos de ensayo: Determinación de la absorción, densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón [140].



Figura 3.97. Aspecto del despiece de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón.

Para obtener la densidad del hormigón, en primer lugar se determina el volumen aparente, mediante la balanza hidrostática con las muestras en condiciones de saturación. Los tercios de probeta se introducen en una celda de vacío durante 24 horas para extraer el aire, en las siguientes 24 horas se llenan los poros con agua mediante la sobrepresión creada por el vacío y en las últimas 24 horas en la celda, se mantienen sumergidas en agua a presión atmosférica.

Finalizada la saturación de las muestras, se secan superficialmente para determinar el peso de la muestra saturada con superficie seca (P_{SSS}). A continuación, se sumergen en agua para determinar, según el Principio de Arquímedes, el volumen aparente de las mismas (V_a). Para ello se han introducido las muestras en un cesto de plástico, dentro de un recipiente lleno de agua, Figura 3.98, dispuesto sobre una báscula tarada con el cesto sumergido, antes de realizar cada determinación.



Figura 3.98. Medios empleados para la determinación de la densidad.

Por último, se determina el peso seco (P_s) de las muestras, tras introducirlas en una estufa ventilada a 110 ± 5 °C hasta obtener peso constante, Figura 3.99.



Figura 3.99. Aspecto de las submuestras obtenidas en su paso por la estufa de secado.

El resto de propiedades: porosidad accesible (h_a), volumen relativo (V_r), densidad aparente (D_a), densidad relativa (D_r), coeficiente de absorción ($A\%$) y porosidad ($P\%$), se determinan de acuerdo a la formulación propuesta en (2), (3), (4), (5), (6) y (8), respectivamente.

Adicionalmente, por ser frecuente en muestras porosas, se ha determinado la densidad en condiciones de saturación con la superficie seca, D_s , a partir de la siguiente fórmula:

$$D_s = \frac{P_{sss}}{V_a} \quad (15)$$

3.4.3.3 Propiedades mecánicas

3.4.3.3.1 Determinación de la resistencia a compresión uniaxial

La determinación de la resistencia a compresión uniaxial de las probetas cúbicas de hormigón, se ha realizado siguiendo las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN 12390-3:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas [141].

Tras la fabricación de las probetas (ver apartado 3.4.3.1), éstas fueron almacenadas, hasta el momento del ensayo, en la cámara de humedad bajo condiciones óptimas de curado. Con la finalidad de evaluar la evolución del comportamiento a compresión de los hormigones autocompactantes, los ensayos de determinación de la resistencia a compresión tuvieron lugar, primeramente a las 24 horas (tras ser desmoldadas), seguido de 3, 7, 28, 90, 180 días y, finalmente, a los 365 días de edad.

Para este ensayo, se decidió fabricar probetas cúbicas de 100 mm de lado primordialmente por no disponer del equipo de ensayo con la capacidad necesaria para romper las probetas cilíndricas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto. Además, el uso de este tipo de probetas tiene asociadas dos ventajas: la primera es, que no es necesario realizar el refrentado por tener caras paralelas en contacto con el molde y, en segundo lugar, que la cantidad de material para fabricar una probeta pasa de 5,8 l a 1 l. La elección de probetas cúbicas de 100 mm de lado fue posible debido al tamaño máximo de árido empleado en la dosificación.

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron en una máquina servohidráulica de 1500 kN de capacidad, marca Suzpecar, modelo MUE-150.

La resistencia a compresión del hormigón de probetas cúbicas, f_c , expresada en unidades del sistema internacional, se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$f_c = \frac{F}{S} = \frac{F}{L^2} \quad (16)$$

Donde:

F : Carga máxima, expresada en N, resistida por la probeta.

S : Superficie de aplicación de la carga en mm^2 .

L : Lado, en mm, de la probeta: 100 mm ($S=10.000 \text{ mm}^2$).

f_c : Resistencia a compresión expresada en MPa.

En la Figura 3.100, se muestra el aspecto que presenta la fractura de una probeta cúbica tras el ensayo de determinación de la resistencia a compresión.



Figura 3.100. Aspecto de la rotura de una probeta cúbica tras el ensayo de compresión.

El artículo 86.3.2 de la EHE-08 [7] establece que a los resultados de resistencia a compresión de probetas cúbicas hay que aplicarles un factor de corrección para obtener valores equivalentes a los de las probetas cilíndricas normalizadas. Dicho factor será de 0,9 cuando $f_c < 60 \text{ MPa}$, en cambio se aplicará 0,95 cuando $60 \leq f_c \leq 80 \text{ MPa}$ o 1 cuando $f_c > 80 \text{ MPa}$.

3.4.3.3.2 Determinación del módulo secante de elasticidad

Como complemento a los ensayos de caracterización mecánica, se ha obtenido el módulo de elasticidad de los hormigones a 7, 28, 90, 180 y 365 días de edad. Para ello, se ha partido de las indicaciones establecidas en la norma UNE 12390-13: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión [142].

El módulo de elasticidad secante, se determina sobre probetas cilíndricas normalizadas, calculando la pendiente de la curva tensión-deformación del primer y último ciclo tras la aplicación de tres continuados de carga y descarga, que permiten identificar el módulo secante inicial y el módulo secante estabilizado, respectivamente. El punto de partida de cada ensayo requiere otros tres ciclos de precarga, partiendo de 0,5 MPa hasta cualquier valor comprendido entre $0,10 f_c$ y $0,15 f_c$, para comprobar la correcta lectura de la deformación.

Una vez realizada la precarga, los ciclos de carga y descarga deben partir del valor de tensión mínimo establecido para la precarga (en este caso $0,15 f_c$) y el punto de tensión máxima correspondiente a $1/3$ de la resistencia a compresión del hormigón. Durante el ensayo, la tensión se aplica a una velocidad de 0,7 MPa/s.

A fin de adquirir un registro continuo del acortamiento experimentado por el hormigón a medida que se aplica la carga, las probetas fueron instrumentadas utilizando dos galgas extensométricas de 120 mm de longitud, modelo PL-120-11-1 de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd.

El proceso de colocación de las bandas extensométricas, se inicia delimitando la zona donde se colocan las galgas con la ayuda de un láser autoalineante. Se marcan dos líneas diametralmente opuestas y perpendiculares a la base de la probeta que servirán de guías para la posterior colocación de las galgas, Figura 3.101.

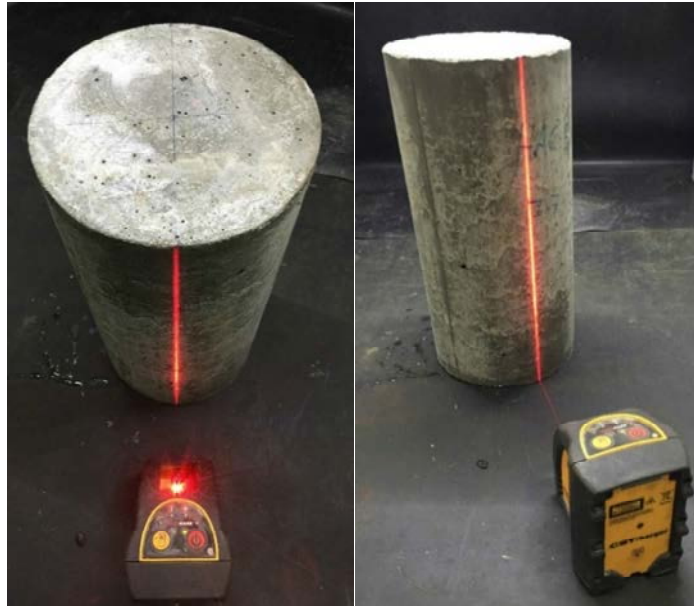


Figura 3.101. Marcado de las probetas para la fijación de las galgas extensométricas.

Tras realizar las marcas, se procede a refrentar la probeta en la cara superior o abierta del molde con una capa de azufre, Figura 3.102.



Figura 3.102. Refrentado de probetas cilíndricas normalizadas.

Posteriormente, se procede a realizar la adhesión de las galgas mezclando los dos componentes del adhesivo (Drug A y B), Figura 3.103, en una relación que el fabricante establece en 9/1, removiendo hasta que la combinación adquiere un color homogéneo.



Figura 3.103. Pegamento bicomponente empleado en la colocación de galgas extensométricas.

A continuación, se esparce el pegamento por la superficie de la probeta siguiendo la guía marcada anteriormente y, por último, se fija la galga con ayuda de cinta adhesiva hasta que endurece el pegamento bicomponente, Figura 3.104.



Figura 3.104. Aspecto de las galgas extensométricas adheridas a la probeta de ensayo.

Una vez terminado el proceso de preparación de las probetas, se procede a su colocación en la máquina de ensayo y a la conexión, de los cables al módulo de alimentación y a la toma de datos, Figura 3.105.



Figura 3.105. Fotografía de la probeta instrumentada en la prensa.

Finalmente, por medio de una tarjeta de adquisición de datos, se registran los valores de deformación que proporcionan las galgas, así como de la fuerza aplicada por el actuador por medio de la célula de carga de la máquina de ensayo.

3.4.3.3 Determinación de la resistencia atracción indirecta

En la determinación de la resistencia a tracción indirecta (método brasileño) de las probetas de hormigón, se han seguido las premisas establecidas en la norma UNE-EN 12390-6: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas [143], a excepción de las bandas de apoyo.

El ensayo de tracción indirecta consiste en comprimir la probeta, en este caso cilíndrica, sobre dos generatrices opuestas. Los esfuerzos de compresión se traducen en tracciones indirectas, a partir de un plano diametral paralelo al eje de aplicación de las cargas y perpendicular a las tracciones inducidas, Figura 3.106.

Para la realización de los ensayos, se utilizó una prensa servohidráulica universal de 1500 kN de carga máxima. Todas las probetas se cargaron aplicando una tensión creciente a velocidad constante de 0,05 MPa/s, hasta alcanzar la rotura.

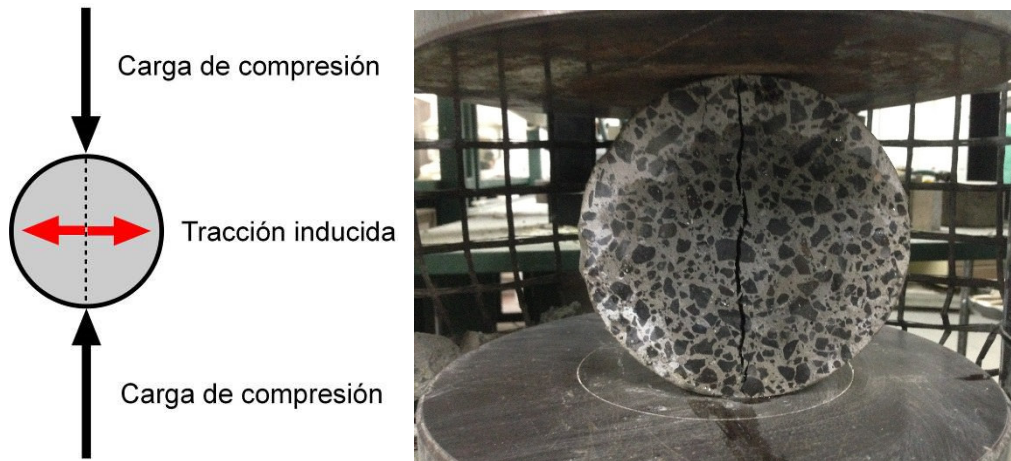


Figura 3.106. Esquema de fuerzas (izq.) y tercio de probeta cilíndrica normalizada ensayada (dcha.) a tracción indirecta.

Según establece la norma en su introducción “el efecto del tamaño del cilindro sobre la resistencia a tracción medida no es significativo”, por lo tanto, se optó por emplear las submuestras obtenidas tras el despiece por corte de las probetas (apartado 3.4.3.2) considerando que los resultados son similares a los que se obtienen con la probeta completa.

Una vez realizado el ensayo, registrada la carga de rotura y tras haber caracterizado geoméricamente la probeta, la resistencia a tracción indirecta se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (17)$$

Donde:

F: Carga máxima, expresada en N, resistida por la probeta.

L: Longitud de la línea de aplicación de la carga en mm.

D: Diámetro en mm, de la probeta: 150 mm.

f_{ct}: Resistencia a tracción indirecta expresada en MPa.

3.4.3.3.4 Resistencia a la abrasión por desgaste

Para la realización del ensayo, se han seguido las indicaciones del anexo G de la norma UNE-EN 1338: Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo [144]. Dicho ensayo se lleva a cabo desgastando la superficie de las probetas con un material abrasivo, siendo el requerido para este tipo de ensayos el corindón (alúmina blanca fundida) con un grano F80 de acuerdo con la norma FEPA 42 F: 1984.

Para la realización de este ensayo, se utilizaron las submuestras resultantes del ensayo de tracción indirecta descrito en el apartado anterior. Previamente se recortaron a una altura de 7 cm para facilitar su disposición en el equipo de abrasión.

Tras el corte, se procedió al secado de las muestras a 110 ± 5 °C. Durante el enfriamiento hasta temperatura ambiente, se aplica una capa de pintura negra sobre la superficie a ensayar con el propósito de obtener las medidas de la huella con mayor precisión, Figura 3.107.



Figura 3.107. Detalle de una probeta pintada antes de someterse al proceso abrasivo.

El equipo de abrasión empleado, Figura 3.108, consta de un disco ancho giratorio de abrasión, una tolva con una válvula de control para regular la salida de la arena abrasiva, una tolva guía de flujo, un carro portaprobetas, un contrapeso y un contador del número de vueltas. Durante la ejecución de los ensayos, se ha colocado el equipo descrito en el interior de una caja de metacrilato con un aspirador para captar el polvo en suspensión.



Figura 3.108. Equipo utilizado para los ensayos de abrasión por desgaste.

El procedimiento de ensayo consiste en rellenar la tolva de alimentación con el material abrasivo con un contenido de humedad máximo del 1%. Se coloca la probeta sobre el carro portaprobetas de manera que la huella producida esté a 15 mm como mínimo de cualquier borde de la probeta. Se sitúa el colector del material abrasivo debajo del disco giratorio. Se pone la probeta en contacto con el disco giratorio de abrasión con la ayuda del contrapeso, se abre la válvula de control y, simultáneamente, se pone en marcha el motor, de manera que el disco giratorio de abrasión alcance 75 revoluciones en 60 ± 3 segundos. Se comprueba visualmente la regularidad del flujo de material abrasivo durante el ensayo. Tras 75 revoluciones, se detiene el disco y el flujo de abrasivo. Se ha realizado un ensayo en cada cara de las probetas.

Con un lápiz se trazan los límites longitudinales externos de la huella con ayuda de una regla; a continuación, se dibuja una línea (AB) en mitad de la huella, perpendicular a la línea central de la huella. Se coloca un calibre digital de puntas cuadradas en los puntos A y B en el borde interior de los límites longitudinales de la huella, se realiza la medición y registro de la dimensión, redondeando a $\pm 0,1$ mm, Figura 3.109.



Figura 3.109. Medición de la huella de desgaste con el calibre.

Se repite la medida a 10 ± 1 mm desde los extremos de la huella para obtener tres lecturas. El resultado del ensayo corresponde a la huella de mayor tamaño redondeado al 0,5 mm más cercano.

3.4.3.4 Durabilidad

La durabilidad del hormigón endurecido, se ha evaluado mediante ensayos de retracción, permeabilidad al agua y al oxígeno, resistencia a ciclos de humedad-sequedad, a ciclos de hielo-deshielo y ensayos de carbonatación acelerada. Finalmente, durante 10 meses, se han expuesto a la intemperie y al agua de mar, probetas troncocónicas con barras de acero embebidas con la finalidad de evaluar la protección que brindan los hormigones al acero y la penetración máxima del ion cloruro durante el tiempo de exposición.

3.4.3.4.1 Retracción del hormigón

La determinación de la retracción del hormigón, se realizó de acuerdo a las indicaciones de la norma UNE 83-318: Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud [145]. Para ello, se han empleado por dosificación dos probetas prismáticas de 50 mm de lado y 300 mm de longitud.

Tras 24 horas de curado de las probetas, se retiran de los moldes y se fijan los tetones de medida en sus extremos. En todo momento, las probetas permanecieron en condiciones óptimas de curado en el interior de la cámara climática.

Para la determinación de las variaciones longitudinales de las probetas, se ha empleado un bastidor que dispone de un comparador analógico en la parte superior con una resolución de 0,01 mm, Figura 3.110. Antes de cada medida, se realiza la calibración de la lectura con una barra metálica referencia de 300 mm de longitud. Tanto la barra de calibración como las probetas se identificaron de manera tal que pudieran colocarse en el dispositivo durante las mediciones con la misma orientación.



Figura 3.110. Probetas y equipo empleado para la determinación de la retracción.

Las mediciones se realizaron desde el desmoldado hasta los 130 días de edad. Finalmente, se determinó el cambio de longitud con la siguiente expresión:

$$\varepsilon_d = \frac{100 \times (l_f - l_0)}{l_0} \quad (18)$$

Donde:

ε_d es el porcentaje de cambio de longitud.

l_f es la longitud de la probeta en cada determinación.

l_0 es la longitud inicial de la probeta a la retirada de su molde.

3.4.3.4.2 Ensayo de carbonatación acelerada

El ensayo de carbonatación acelerada, se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Burgos. Siguiendo el mismo procedimiento descrito por F. Fiol [146], las muestras se introducen en una cámara estanca sellada con incorporación de CO₂ mediante un caudalímetro y sistema de purga de aire. La cámara se alimenta con una botella de CO₂ de 20 kg, Figura 3.111.



Figura 3.111. Aspecto de la cámara empleada para el ensayo de carbonatación acelerada.

Las condiciones ambientales en el interior de la cámara durante la ejecución del ensayo se registran con un termómetro-higrómetro, mientras que, la concentración de CO₂, con un medidor de gases, *Figura 3.112*.



Figura 3.112. Equipos medición empleado para condiciones ambientales y la concentración de CO₂.

Para la ejecución del ensayo se emplearon las submuestras obtenidas tras el despiece por corte de las probetas (apartado 3.4.3.2), realizando un corte longitudinal a cada tercio de probeta cilíndrica con la finalidad de evaluar la profundidad de carbonatación a 7, 28, y 90 días de exposición continuada. Las muestras descansan en el interior de la cámara sobre unos separadores de PVC para garantizar que el gas penetra por toda la superficie de las mismas, *Figura 3.113*.



Figura 3.113. Aspecto de las probetas en el interior de la cámara.

La concentración de CO₂ inicial en la cámara, fijada en 30% del volumen de la cámara, requiere 45 l de gas incorporado durante 3 minutos con un caudal de 15 l/min. Cada semana, se ventila el interior de la cámara y se renueva el aire y el CO₂. La evaluación de las muestras de cada dosificación, a excepción del HAC-GOF-CV, se ha practicado tras 7, 28 y 90 días de exposición.

Finalizado el tiempo de exposición de la submuestras, primeramente se realiza una inspección visual para detectar signos evidentes de degradación en superficie. A continuación, se procede a romper las probetas a flexión, Figura 3.114, aplicando una carga de compresión, hasta rotura, a lo largo de una generatriz.



Figura 3.114. *Rotura de las probetas tras la carbonatación acelerada.*

Una vez obtenida la superficie de análisis, se aplica, mediante un pulverizador, la solución de fenolftaleína al 1% y alcohol etílico al 70% en ambas caras de rotura de acuerdo a lo establecido por la norma UNE 112011: Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio [147]. Tras ello, se comprueba cómo la pasta de cemento con un pH mayor de 9 hace que el virador cambie de color.

Finalmente, se determina la máxima profundidad del frente de carbonatación, con un calibre partiendo desde la superficie expuesta hacia el interior. El resultado se expresa con una precisión de 0,5 mm.

3.4.3.4.3 Permeabilidad al oxígeno

La permeabilidad al oxígeno del hormigón se ha obtenido de acuerdo a lo establecido en las normas UNE 83966:2008: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad y UNE 83981:2008: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido [148,149].

El ensayo se ha llevado a cabo sobre las submuestras obtenidas tras el despiece por corte de las probetas cilíndricas normalizadas (apartado 3.4.3.2). Esto permite evaluar si existe alguna diferencia de la microestructura de la red capilar del hormigón según la posición en altura de cada submuestra.

El ensayo consiste en aplicar una presión constante de oxígeno extrapuro sobre una de las caras de la probeta de modo que el gas atraviesa toda su longitud y fluye por la cara opuesta, permitiendo obtener el caudal de gas a la salida. Antes de la realización de los ensayos, las muestras se introducen en una estufa ventilada a 110 ± 5 °C para la eliminación de cualquier resto de humedad.

Con la finalidad de evitar el escape lateral de oxígeno a través de ella, se sella la superficie lateral de la submuestra con una fina capa de silicona, que, a su vez, favorece la estanqueidad radial entre la goma de caucho del dispositivo de ensayo y la probeta.

El dispositivo experimental utilizado para la realización del ensayo de permeabilidad al oxígeno sobre las muestras de hormigón, Figura 3.115, consta de dos celdas cilíndricas metálicas provistas de un mecanizado interior de geometría troncocónica, en las que encaja una junta de caucho que alberga a la muestra a ensayar.

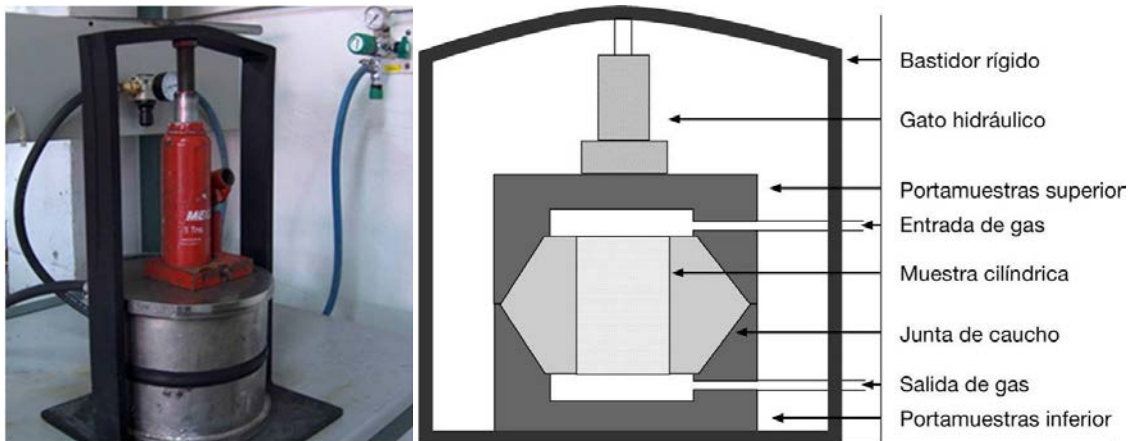


Figura 3.115. Aspecto real (izq.) y esquema (dcha.) del dispositivo experimental para la realización de ensayos de permeabilidad al oxígeno sobre probetas cilíndricas de hormigón.

El correcto sellado del dispositivo, se realiza al comprimir con un gato hidráulico las dos celdas enfrentadas, colocadas en un bastidor diseñado al efecto. Una salida/entrada lateral en las celdas permite introducir la presión de gas en la cara superior de la probeta y determinar el flujo de oxígeno en la cara inferior, mediante la utilización de un caudalímetro digital conectado a la salida [150], Figura 3.116.



Figura 3.116. Caudalímetro digital empleado para determinar el flujo de oxígeno a la salida de la muestra.

La entrada de gases al dispositivo se controla con un manómetro-regulador capaz de ajustar la presión de oxígeno aplicada con una precisión del 0,6% dentro del rango de presiones utilizadas en el ensayo (1 a 2 bares).

El coeficiente de permeabilidad a gases del material, conocido el caudal a la salida, se deduce a partir de la ecuación de Darcy (19). En la fórmula obtenida de estudios experimentales sobre las características del flujo de gases, se despeja el coeficiente de permeabilidad K , resultando en la fórmula (20).

$$Q = K \frac{P_2 - P_1}{L \eta} A \quad (19)$$

$$K = \frac{2 P_1 R L \eta}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (20)$$

Donde:

Q : Gasto, descarga o caudal [m^3/s].

K : Coeficiente de permeabilidad [m^2].

η : Viscosidad del gas utilizado [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$].

L : Longitud de la muestra [m].

R : Caudal de gas a la salida de la muestra [m^3/s].

A : Área de la sección transversal de la muestra [m^2].

P_1 : Presión absoluta a la salida de la muestra [N/m^2].

P_2 : Presión absoluta a la entrada de la muestra [N/m^2].

La viscosidad del oxígeno en condiciones normales de presión y temperatura es igual a $2,02 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ y, la presión a la salida es la presión atmosférica (1 bar), con lo que, sustituyendo en la fórmula (20) y expresando la medida de presión en bares:

$$K = \frac{4,04 \times 10^{-10} R L}{A(P_2^2 - 1)} \quad (21)$$

3.4.3.4.4 Ensayo de penetración de agua bajo presión

Tras determinar el coeficiente de permeabilidad al oxígeno, las muestras se sometieron al ensayo de penetración de agua bajo presión. El ensayo se llevó a cabo tal y como establece la norma UNE-EN 12390-8:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión [151].

El ensayo consiste en someter a una de las caras de las probetas de hormigón al contacto con una masa de agua empujada por aire comprimido a una presión de 5 bares, lo cual equivale a mantener una columna de agua de 50 m de altura sobre las probetas, durante 72 horas. Transcurrido este tiempo, se retiran las probetas de los bancos de ensayo y se procede a romper las muestras mediante el método brasileño, lo que permite observar las dos caras de fractura y medir la profundidad de penetración del agua. El registro de la carga de rotura de las probetas, como ya se ha indicado repetidamente, proporciona, también un valor indirecto de la resistencia a tracción del hormigón ensayado.

El dispositivo experimental utilizado consta de una celda cilíndrica de metacrilato que alberga el agua, sellada en los extremos con dos anillos de goma para asegurar la estanqueidad durante la ejecución del ensayo. Encima de la celda, se coloca una placa polimérica con una perforación por donde se introduce el agua y se suministra el aire a presión, Figura 3.117. El sistema de alimentación de aire cuenta con un manómetro-regulador que permite, en todo momento, ajustar la presión del gas.

Las muestras se colocan en dos bancadas de cuatro puestos donde se realiza el montaje simultáneo de ocho probetas con todos los elementos mencionados. Las bancadas disponen de tornillos en la parte superior, que permiten, mediante apriete contra la placa polimérica, fijar el conjunto y garantizar la estanqueidad.

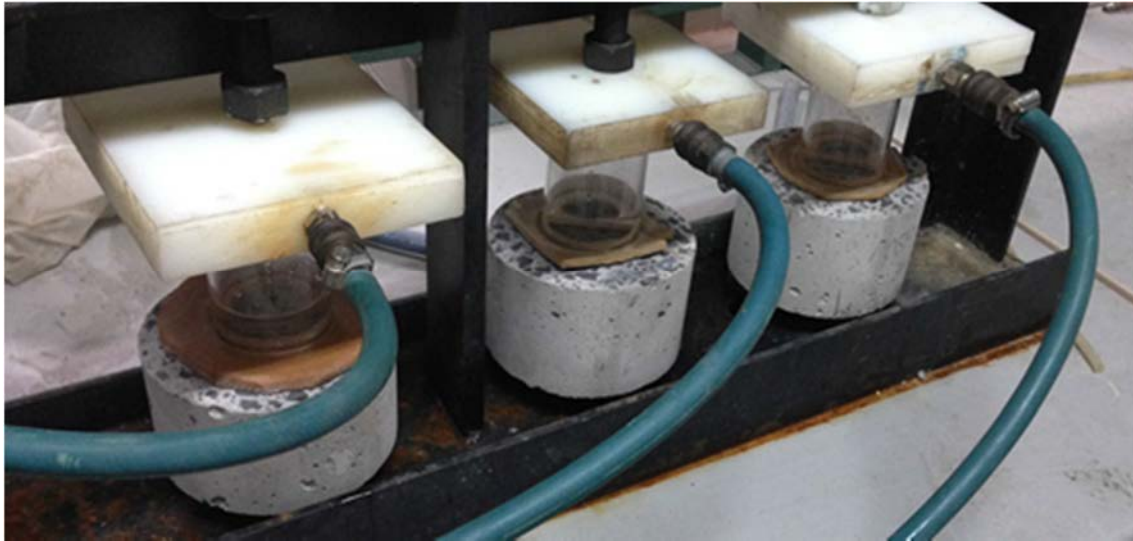


Figura 3.117. Dispositivo experimental para los ensayos de penetración de agua bajo presión.

Tras la rotura de las probetas a tracción indirecta, se marca el frente de penetración de agua, con un rotulador indeleble como se aprecia en la Figura 3.118.

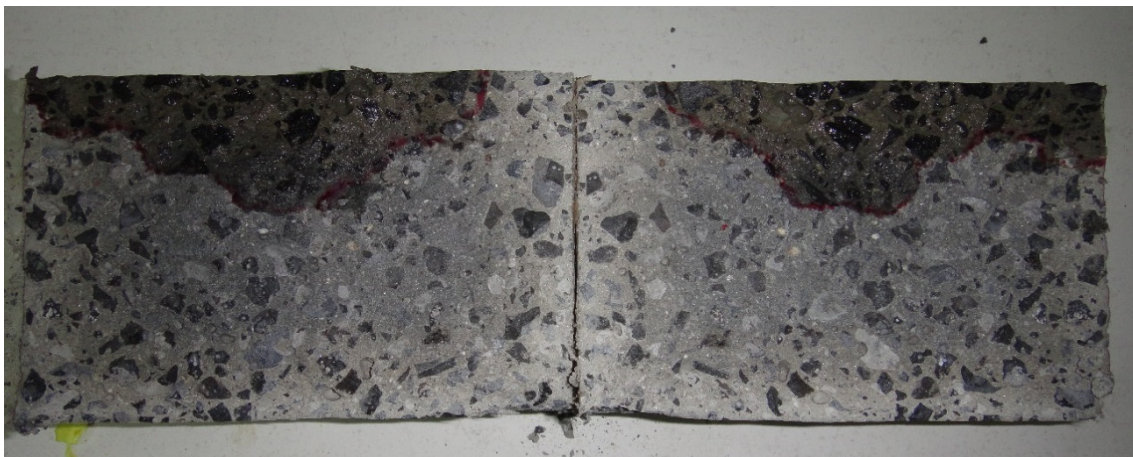


Figura 3.118. Detalle del perfil de permeabilidad del agua en los ensayos de penetración de agua bajo presión.

La medición se realiza con la ayuda de un pie de rey y, el resultado del ensayo, se expresa como valor de penetración máxima registrada en cada probeta redondeada al milímetro más próximo.

3.4.3.4.5 Envejecimiento por choque térmico

El ensayo consiste en someter al hormigón a la acción de ciclos de humedad-sequedad, con el propósito de evaluar la degradación causada por los cambios consecutivos de temperatura y agua absorbida.

Para la ejecución del ensayo, se han cortado las probetas prismáticas de 50x50x300 mm empleadas en los ensayos de retracción con una cortadora de disco de diamante en húmedo para obtener 4 probetas cúbicas 50 mm de lado. En la Figura 3.119, se muestra el aspecto de las probetas de las distintas dosificaciones obtenidas tras la subdivisión. Cabe destacar que todas las probetas cúbicas presentan dos caras de corte debido a que se descartaron los extremos donde se alojaban los tetones de medida.



Figura 3.119. Aspecto de las probetas cúbicas obtenidas tras el corte de los prismas.

Debido a la falta de normativa específica para este tipo de ensayo sobre hormigón, la metodología utilizada parte de seleccionar tres probetas de cada dosificación identificadas como 2.1, 2.2 y 2.3 (12 en total). Antes de iniciar los ciclos consecutivos de humedad-sequedad, se introducen en estufa a 110 ± 5 °C hasta obtener masa constante. Como datos de comparación, se determinan la masa seca inicial de cada muestra y la velocidad de los impulsos ultrasónicos, colocando los palpadores en caras opuestas que han estado en contacto con el molde. Previamente, dichas caras se marcan con un rotulador indeleble, para repetir en las posteriores mediciones de los impulsos la ubicación del emisor y del receptor, Figura 3.120.



Figura 3.120. Detalle del marcado de las probetas.

A continuación, se introducen las muestras en un recipiente con agua a 20 ± 2 °C hasta quedar completamente sumergidas, de manera que nivel del líquido esté al menos 20 mm por encima de las muestras. En el interior del recipiente las probetas descansan sobre una malla de plástico que impide el contacto directo con el fondo del depósito, Figura 3.121.



Figura 3.121. Detalle de las muestras sometidas a los ciclos de humedad-sequedad sumergidas.

Las muestras se someten a 100 ciclos, constando cada uno de 16 horas de secado en estufa y 8 horas de inmersión en agua. Durante la interrupción de los ciclos, las muestras se mantienen en la estufa.

Tras el secado de cada ciclo, se dejan enfriar las probetas, se registra la masa y, una vez por semana, se determina la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

La determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos se ha realizado según lo estipulado en la norma UNE-EN 12504-4: Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos [152]. Para ello, se ha empleado un generador de impulsos ultrasónicos con temporizador electrónico, dos palpadores (emisor y receptor) y pasta de glicerina para mejorar el contacto de los palpadores con la superficie de las probetas, Figura 3.122.



Figura 3.122. *Determinación de los impulsos ultrasónicos.*

Las transmisiones directas de velocidad, se han calculado mediante la fórmula:

$$v = \frac{l}{t} \tag{22}$$

Donde:

v = velocidad del impulso [km/s]

l = longitud de la trayectoria [mm]

t = tiempo del impulso entre palpadores [μ s]

Al final de los ciclos, se determina la pérdida de resistencia a compresión, al comparar la resistencia de los cubos sometidos a los ciclos con la resistencia obtenida de dos cubos no sometidos a los ciclos con la misma edad. En la Figura 3.123, se muestran el útil y el equipo de ensayos empleados en la caracterización mecánica de los cubos.



Figura 3.123. Caracterización mecánica de los cubos tras someterlos a los ciclos de humedad-sequedad.

3.4.3.4.6 Resistencia al hielo-deshielo

Los ciclos de hielo-deshielo, se han realizado siguiendo las indicaciones de la norma UNE-12390-9: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial [153], si bien se han introducido ciertas modificaciones reseñables.

Se han sometido a los ciclos de hielo-deshielo tres probetas cúbicas de 50 mm de lado de cada dosificación, identificadas como 1.1, 1.2 y 1.3 (12 en total), obtenidas del despiece de los prismas empleados en los ensayos de retracción, apartado 3.4.3.4.1. El uso de estas probetas deja los resultados fuera de las estipulaciones de la norma y convierte al ensayo en una prueba más agresiva válida para un análisis con fines meramente comparativos.

Durante la ejecución del ensayo, todas las muestras se mantuvieron sumergidas en una disolución de cloruro de sodio (NaCl) al 5% dentro de una caja de acero inoxidable de 135x135x400 mm, manteniendo el nivel de la disolución al menos 15 mm por encima de las probetas. Las probetas se colocaron separadas 10 mm de las paredes y el fondo del recipiente, para ello, descansaban sobre una rejilla de poliamida.

Para el control de la temperatura durante los ciclos, una de las probetas alojaba un termopar, Figura 3.124.

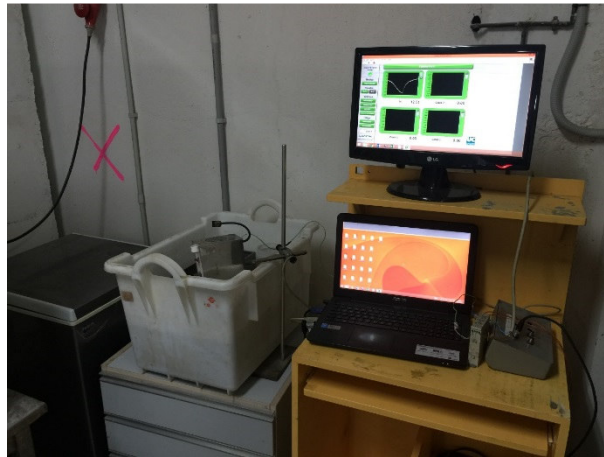


Figura 3.124. Sistema de control de temperatura en el seno de una de las probetas.

La fase de hielo se llevó a cabo en un arcón congelador mientras que la fase de deshielo se realizó en un recipiente de 75 l de capacidad con 25 l de agua corriente en el que se introdujo una resistencia eléctrica con agitador para calentar el agua del baño de manera homogénea.

La secuencia cíclica comienza situando las muestras en el arcón congelador hasta que la lectura de la sonda alcanza los $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto se logra en un periodo de 16 horas aproximadamente. A continuación, se retira el recipiente metálico con las muestras del arcón congelador, Figura 3.125, y se introduce en el baño hasta que la sonda de temperatura registra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto se logra con la ayuda de la resistencia y el agitador en un periodo de 6 horas. Finalizado este periodo de tiempo, se mantiene el recipiente dos horas en el baño hasta alcanzar la temperatura del ambiente, Figura 3.126, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. En la Figura 3.127 se muestra la temperatura registrada en el seno de la probeta durante uno de los ciclos y los límites establecidos en la norma 12390-9 [153].

Transcurridos 7 ciclos, se renueva la disolución, se retiran del recipiente metálico los fragmentos desprendidos de las probetas y se realiza un seguimiento fotográfico.

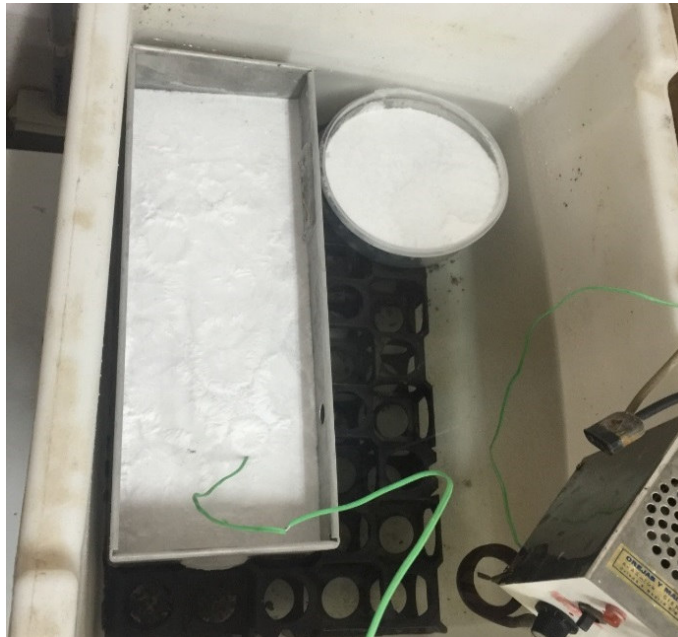


Figura 3.125. Aspecto de las muestras tras ser retiradas del arcón congelador.

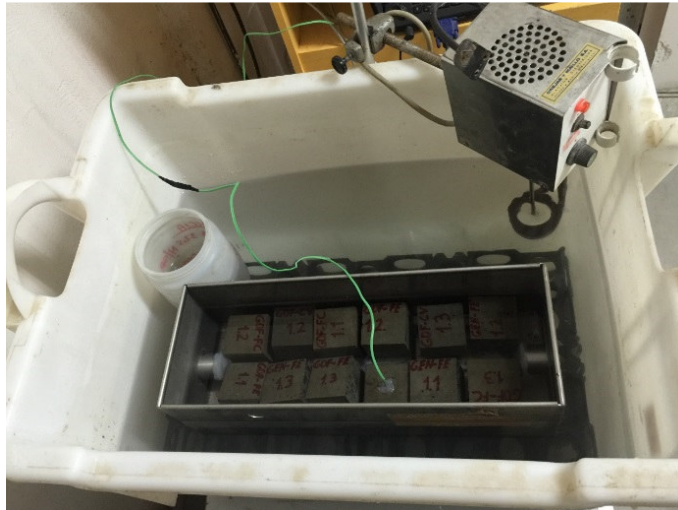


Figura 3.126. Aspecto de las muestras en el interior del recipiente metálico tras descongelarse.

Los ciclos se realizaron de lunes a viernes, mientras que, los fines de semana y festivos, las probetas se mantuvieron en el arcón a una temperatura constante de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Todas las probetas de cada dosificación se retiraron del baño una vez que una de ellas se desintegraba, perdiendo al menos el 50% de su volumen inicial.

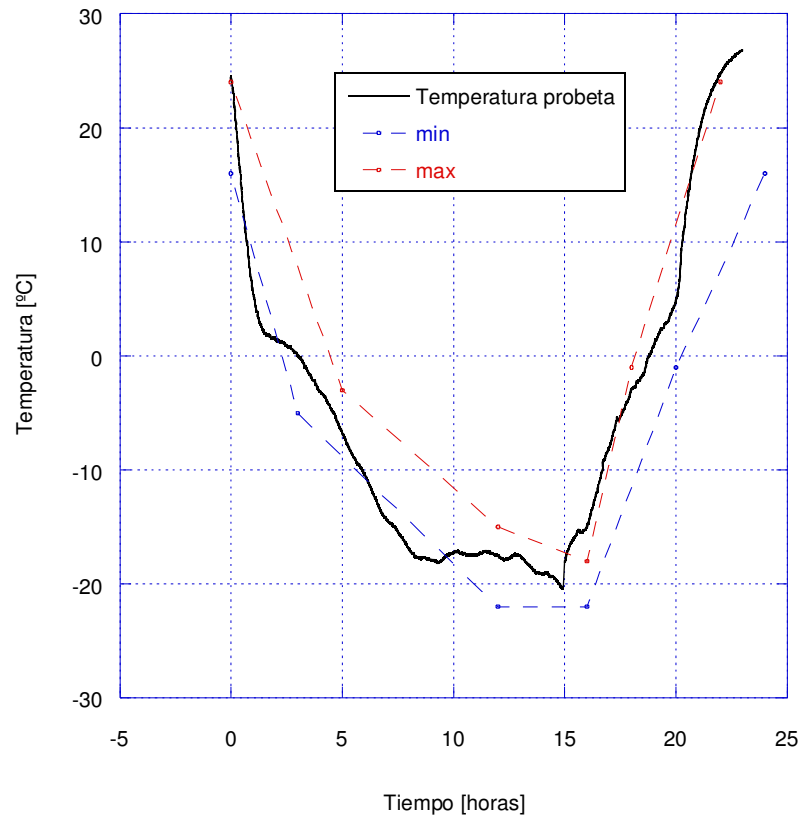


Figura 3.127. Temperatura registrada en el seno de la probeta durante un ciclo.

3.4.3.4.7 Penetración de ion cloruro y protección frente a la corrosión de armadura

La campaña de ensayos para la caracterización de la durabilidad del hormigón endurecido finaliza con la exposición a la intemperie y al agua de mar de probetas cónicas con barras corrugadas de acero embebidas en su seno.

Para la fabricación de cada probeta, se ha empleado como molde un cono de Abrams con la cara de menor diámetro como base para facilitar el llenado de la probeta, siguiendo la metodología descrita por C. Thomas et al. [154]. En su interior se han colocado en vertical dos barras corrugadas de diámetro 10 mm, Figura 3.128, dispuestas de manera tal que el recubrimiento mínimo de una de las barras en la base del cono es de 10 mm mientras que, en la segunda barra, es de 30 mm, Figura 3.129.



Figura 3.128. Detalle de las barras corrugadas embebidas en el hormigón.

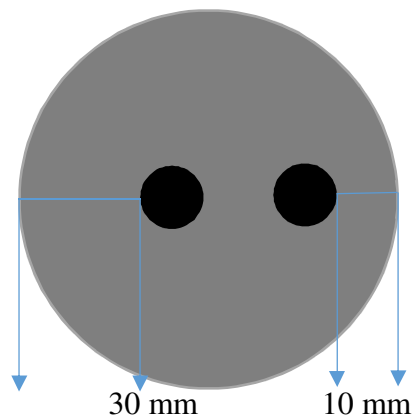


Figura 3.129. Disposición de las barras en la cara del cono truncado de menor diámetro.

Esta configuración se ha diseñado con el objetivo de evaluar la protección frente a la corrosión que ofrecen los hormigones autocompactantes confeccionados con espesores de recubrimiento inferiores a los recomendados. La geometría cónica de las probetas y la orientación vertical de las barras permite evaluar la penetración del ion cloruro a distintos espesores de recubrimiento.

En la Figura 3.130, se puede apreciar que además de las barras corrugadas se ha embebido una pieza metálica negra con la finalidad de facilitar la manipulación de las probetas, evitando ningún tipo de esfuerzo en el acero que pueda afectar a la adherencia entre ambos materiales.

La operación de amasado y llenado de los moldes, así como, también, el curado de las probetas se llevó a cabo del mismo modo que para el resto de probetas. Se fabricaron en total 8 probetas cónicas, que corresponden a dos probetas por cada dosificación.



Figura 3.130. Aspecto de la preparación de los moldes (Izq.) y aspecto tras el hormigonado (Dcha.).

Para garantizar que la penetración de cloruros únicamente ocurre en la generatriz del cono, se han protegido las caras superior e inferior, así como, también, los tramos de barras corrugadas que sobresalen del hormigón con una gruesa capa de recubrimiento epoxy de dos componentes, Figura 3.131 y Figura 3.132.

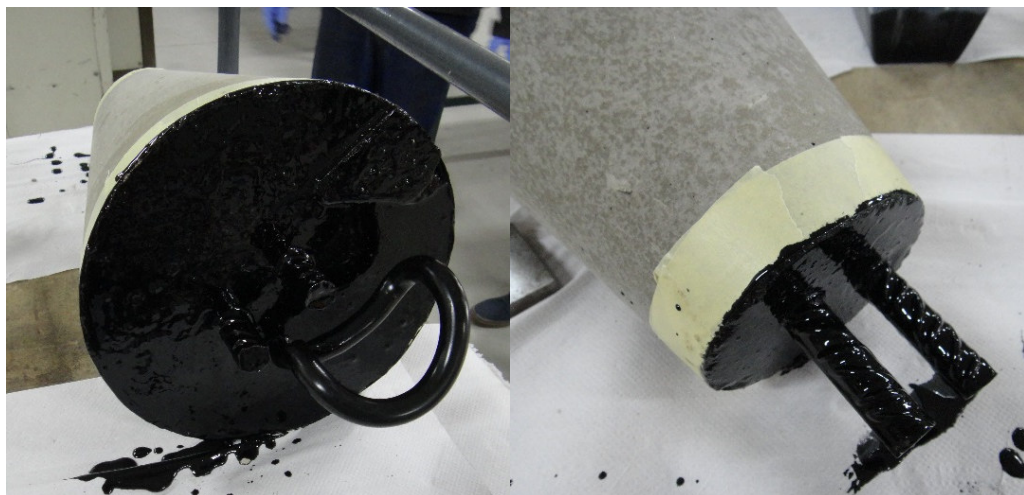


Figura 3.131. Detalle de la aplicación de la pintura sobre las superficies planas de las probetas y las armaduras.

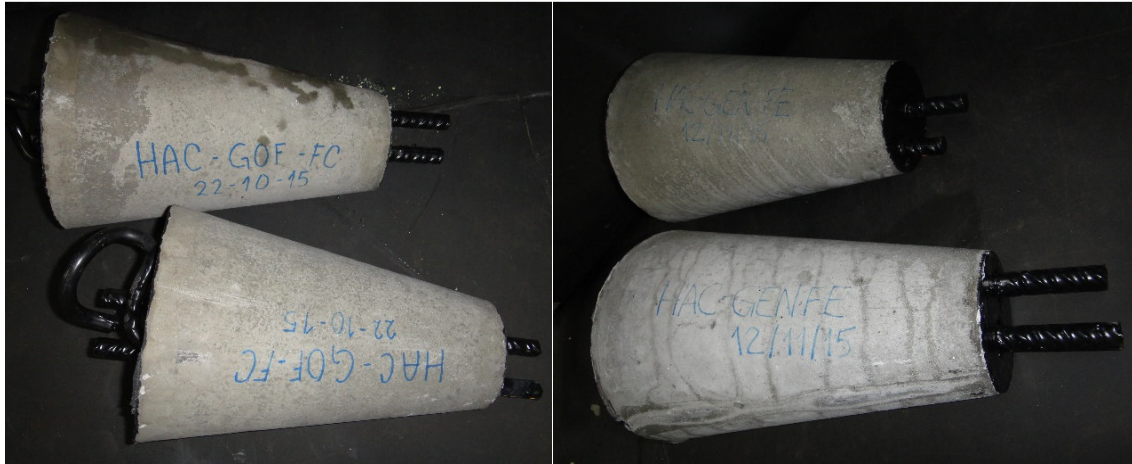


Figura 3.132. Aspecto de las probetas de dos dosificaciones tras aplicar la pintura.

Tras mantener las probetas en la cámara de humedad durante un mínimo de 28 días, se trasladó una de cada dosificación al puerto de Bilbao. Allí se colocaron repartidas sobre dos rejillas metálicas junto con otras probetas de otros centros de investigación, Figura 3.133. Con ayuda de una grúa, las rejillas se mantuvieron suspendidas a escasos centímetros de la superficie del mar dejando expuestas las probetas a los cambios de mareas durante 10 meses, Figura 3.134.



Figura 3.133. Disposición de las probetas en las rejillas metálicas.



Figura 3.134. Ubicación de las probetas en carrera de mareas en el Puerto de Bilbao.

Transcurrido este periodo de tiempo, las probetas se retiraron y se trasladaron de nuevo al laboratorio. Durante la inspección visual, se observó la presencia abundante de moluscos adheridos en la superficie de las probetas de hormigón, las barras corrugadas y el gancho de acero, Figura 3.135. En las zonas donde no estaban presentes dichas colonias, se observó la formación de una capa verdosa orgánica.



Figura 3.135. Aspecto de las probetas tras la exposición a la intemperie y los ciclos de mareas.

Con la ayuda de una barra de uña, se removieron los moluscos pegados en el hormigón mientras que, los adheridos a las barras y a la pieza metálica se machacaron con un martillo. A continuación se frotó la superficie con un estropajo para retirar la capa orgánica, Figura 3.136. Finalmente, se aclararon con agua abundante y se introdujeron en la estufa a 110 ± 5 °C hasta obtener masa constante.



Figura 3.136. Aspecto de las muestras antes y después de la limpieza.

Sobre cada probeta troncocónica, se realizaron dos cortes longitudinales en seco diametralmente opuestos con una cortadora radial sin que el disco de corte alcanzara las barras corrugadas, Figura 3.137. Tras romper el cono truncado de hormigón en dos mitades, se procedió, en primer lugar a observar el estado de las barras principalmente para evaluar la aparición de picaduras, Figura 3.138.



Figura 3.137. Aspecto de las muestras tras el corte longitudinal.



Figura 3.138. Aspecto de la probeta troncocónica tras la separación en dos mitades.

Una de las mitades de las probetas cónicas se dividió mediante un corte transversal con el fin de extraer una submuestra con distintos espesores de recubrimiento, que sirva para determinar, en el microscopio electrónico de barrido, la profundidad de penetración del ion cloruro mediante espectroscopia dispersiva de rayos X.

3.4.3.5 Caracterización microestructural

El análisis se ha realizado en el microscopio electrónico de barrido, mediante la obtención de micrografías a distintos aumentos de la interfaz pasta-árido, con el propósito de comparar la microestructura de cada una de las dosificaciones propuestas.

Las muestras analizadas en el microscopio electrónico, se obtuvieron de los despieces de las probetas cilíndricas normalizadas empleadas en los ensayos de durabilidad. Para ello, fue necesario extraer un fragmento de cada dosificación de tamaño adecuado para ser introducidas, simultáneamente, en la cámara de vacío del equipo. Al momento de seleccionar las muestras se procuró que tuviesen al menos una partícula de árido grueso.

Antes de introducir las muestras en el microscopio electrónico de barrido, se les aplicó un recubrimiento de oro con la finalidad de adquirir imágenes a gran número de aumentos con buena resolución, Figura 3.139.



Figura 3.139. Superficies observadas en el microscopio electrónico de barrido.

La observación de las muestras se realizó con la finalidad de analizar la microestructura de las pastas endurecidas en cuanto a la compacidad del material, la compatibilidad de las adiciones en la pasta y la morfología de los productos de hidratación del cemento y del filler de escoria.

Capítulo 4 Presentación y análisis de resultados experimentales

4.1 Composición de los hormigones HAC

Tras la caracterización de los materiales, se ha planificado la combinación de los mismos con dos objetivos. En primer lugar, definiendo un hormigón autocompactante patrón por triplicado con áridos naturales ofíticos incorporando las tres adiciones disponibles, con la finalidad de comparar las características del filler de escoria de cubilote con dos de las adiciones más empleadas en la fabricación de cemento portland y de hormigón, tanto tradicional como autocompactante. En segundo lugar, se diseñó el hormigón objetivo de esta Tesis, utilizando gravilla y arena de escoria de horno eléctrico, arena de sílice y filler de escoria de cubilote como adición, con el propósito de evaluar la influencia del uso de los residuos siderúrgicos en el comportamiento del hormigón autocompactante. Debido a la falta de finos de la escoria de horno eléctrico respecto a la arena de ofita, se incrementó el contenido de arena de sílice en la mezcla, ajustando la distribución de tamaños según la curva granulométrica del hormigón patrón.

En la Tabla 4.1, se reflejan las combinaciones de materiales propuestos en cada dosificación y los códigos asignados a cada tipo de hormigón.

Tabla 4.1. Combinación de materiales propuestos en las dosificaciones de la investigación.

Código	HAC-GOF-FC	HAC-GOF-CV	HAC-GOF-FE	HAC-GEN-FE
Fracción gruesa	GOF	GOF	GOF	GEN
Fracción fina	AOF+ASI	AOF+ASI	AOF+ASI	AEN+ASI
Adición	FC	CV	FE	FE
Cemento	CEM I 52,5 R			

Donde:

AOF: Arena de ofita.

ASI: Arena de sílice.

AEN: Arena de escoria negra.

GOF: Gravilla de ofita.

GEN: Gravilla de escoria negra.

FC: Filler calizo.

CV: Cenizas volantes.

FE: Filler de escoria (escoria de cubilote valorizada).

Estas dosificaciones son la base de los resultados de la investigación, tomando como referencia los hormigones de control. La comparación entre las tres primeras permite estudiar la influencia de las distintas adiciones incorporadas, mientras que, la última dosificación, HAC-GEN-FE, es el objetivo central de la Tesis, debido a que conlleva la sustitución de los áridos naturales por los áridos siderúrgicos.

En la Tabla 4.2, se presentan las cantidades necesarias de cada componente para generar una amasada de 1 m³ de las dosificaciones planteadas, considerando un 2% de aire atrapado. Dada la mayor densidad de las escorias negras, los valores reflejados se expresan tanto en peso como en volumen.

Tabla 4.2. Dosificaciones diseñadas.

HAC-GOF-FC	HAC-GOF-CV	HAC-GOF-FE	HAC-GEN-FE
GOF 314,5 l 896,4 kg	GOF 314,5 l 896,4 kg	GOF 314,5 l 896,4 kg	GEN 286,1 l 1101,6 kg
ASI 157,3 l 410,5 kg	ASI 157,3 l 410,5 kg	ASI 157,3 l 410,5 kg	ASI 232,1 l 605,7 kg
AOF 157,3 l 454,5 kg	AOF 152,3 l 454,5 kg	AOF 152,3 l 454,5 kg	AEN 117,6 l 443,5 kg
*FC 100 kg	*CV 80 kg	*FE 109 kg	*FE 109 kg
CEM 144,7 l 450 kg	CEM 144,7 l 450 kg	CEM 144,7 l 450 kg	CEM 144,7 l 450 kg
Agua 180,0 l	Agua 180,0 l	Agua 180,0 l	Agua 173,3 l

*Volumen de las adiciones: 37,7 l
 Cantidad de aditivo superplastificante: 9 kg y 8,5 l

Antes de comentar cuál ha sido el método de dosificación empleado, es importante acotar que los áridos se han incorporado en las mezclas manteniendo las condiciones de humedad del laboratorio tras un largo periodo de almacenamiento. Se ha procedido de esta manera, puesto que, los porcentajes de humedad en el caso de los áridos naturales son muy pequeños (< 1%).

De acuerdo a la distribución granulométrica de los áridos, es preciso mencionar que la gravilla y la arena de escoria negra presentan un porcentaje superior de partículas retenidas en los tamices de mayor abertura, respecto a los componentes de origen natural.

En el caso de las arenas, existe una diferencia notable, puesto que el contenido de finos en la arena de ofita es mucho mayor que en la escoria negra. Estas consideraciones se han tomado en cuenta durante los ajustes de la dosificación del HAC-GEN-FE.

Se observa que el hormigón de control diseñado contiene 314,5 l de árido grueso (gravilla) y una relación agua/cemento de 0,4. El volumen de pasta es de 392 l, considerando los finos aportados por las arenas y la gravilla (adherido en superficie). A pesar de que este valor se encuentra por encima de los 380 litros recomendados por EFNARC [43], la relación agua/finos, expresada en volumen, se sitúa en 0,85, ajustándose al mínimo de dichas recomendaciones. La relación agua/finos en peso es ligeramente superior a 0,29.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.2, existen diferencias en los contenidos de árido grueso y mortero en volumen de las dosificaciones HAC-GOF (árido natural) y HAC-GEN (árido siderúrgico). Esto se debe, principalmente, a dos factores: la carencia de finos de la arena de escoria negra y la mayor interacción intergranular derivada de su geometría cavernosa y angulosa, Figura 4.1.



Figura 4.1. Comparación de la superficie de las partículas de gravilla de ofita (izda.) y escoria de horno eléctrico (dcha.).

Al inicio de la etapa de diseño, se fabricó el hormigón HAC-GEN-FE con las mismas proporciones en volumen respecto al HAC-GOF-FC, resultando una mezcla deficiente a simple vista en estado fresco y notablemente mejorable, en estado endurecido, Figura 4.2. Esto obligó a realizar ajustes para obtener un hormigón funcional.



Figura 4.2. Aspecto del primer hormigón HAC-GEN-FE.

La distribución de áridos de las fracciones gruesa y fina de las mezclas con áridos naturales, HAC-GOF, corresponde a 50% GOF, 25% ASI y 25% AOF (en volumen), cuya curva granulométrica se representa como “GOF-AOF-ASI” en la Figura 4.3 junto con la parábola de Gesner, ajustada por el método de Fuller, para un $T_{máx}$ de 12,5 mm.

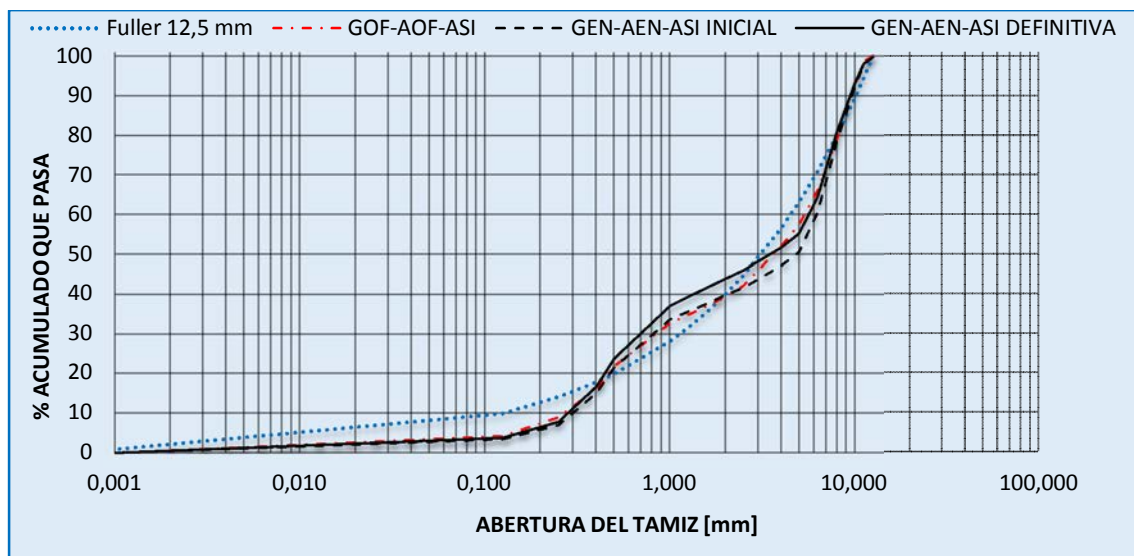


Figura 4.3. Distribución granulométrica de los áridos en las dosificaciones.

En el caso del HAC-GEN, como primer paso del ajuste, se decidió modificar la composición del mortero manteniendo la cantidad de gravilla. Para ello, se variaron las proporciones de las arenas hasta que se aproximaron a la distribución granulométrica del hormigón de control, resultando en 33% ASI y 17% AEN, que conducen a una curva compuesta representada como “GEN-AEN-ASI INICIAL” en la mencionada Figura.

Tras realizar una amasada de prueba, se observó una mejora notable de la capacidad de flujo y de relleno del hormigón. Sin embargo, la capacidad de paso no resultó satisfactoria, Figura 4.4.



Figura 4.4. Aspecto de los ensayos de escurrimiento (izda.) y caja en L (dcha.) empleando la distribución de áridos “GEN-AEN-ASI INICIAL”.

Para obtener las prestaciones mínimas en el hormigón HAC-GEN-FE en estado fresco, escurrimiento superior a 650 mm y evitar el bloqueo en la caja en L, fue necesario reducir el contenido de gravilla un 5% en volumen para acortar la diferencia en el contenido de partículas de tamaño comprendidos entre 4 y 6,3 mm respecto a la dosificación con áridos naturales. Dicho volumen, se compensó con arena, manteniendo la proporción ASI/AEN determinada en el ajuste previo. El cambio propició un hormigón fluido y sin bloqueo. Sin embargo, el ensayo en la caja en L resultó ligeramente inferior a lo esperado.

Finalmente, se realizó un pequeño retoque en la proporción de las arenas de manera tal que la distribución definitiva, representada en la Figura 4.3 como “GEN-AEN-ASI DEFINITIVA”, se concretó en 45% GEN, 36,5% ASI y 18,5% AEN.

La dosificación definitiva del hormigón objetivo de la Tesis resultó: 286 l de árido grueso (gravilla) y una relación agua/cemento de 0,385 (en peso), limitada por la segregación del árido. El volumen de pasta es de 380 l, que se ajusta al contenido de las recomendaciones actuales y la relación agua/finos de 0,84 (en volumen).

4.1.1 Pruebas preliminares con morteros

La estimación de la relación agua/cemento durante la fase de diseño de los hormigones, se realizó mediante la determinación del comportamiento en estado fresco de morteros fabricados con las proporciones establecidas en el apartado anterior y eliminando el árido grueso.

Las primeras amasadas, realizadas partiendo de una relación agua/cemento teórica de 0,4, experimentaron grandes escurrimientos, especialmente los morteros con escoria de cubilote, Figura 4.5.



Figura 4.5. Aspecto de la torta de escurrimiento de los morteros M-AOF-FC (izq.) y M-AOF-FE (dcha.) con una relación agua/cemento de 0,4.

Por otro lado, el mortero dosificado con arena de escorias negras resultó ser más sensible al contenido de agua, provocando la segregación de las partículas de arena con relaciones de agua/cemento superiores a 0,39. En la Figura 4.6, se presentan dos morteros endurecidos fabricados con distinta relación agua/cemento. En el lado izquierdo, se puede apreciar cómo han segregado las partículas de arena de escoria negra (relación agua/cemento de 0,4); mientras que, en el lado derecho, se observa que una ligera disminución del contenido de agua, aumenta la viscosidad del mortero lo suficiente para mantener en suspensión dichas partículas. Este incremento en la viscosidad conlleva que exista mayor contenido de aire atrapado en el interior de la mezcla.

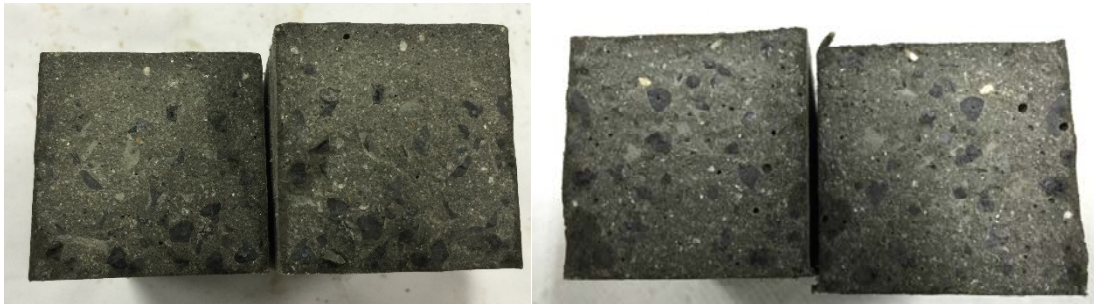


Figura 4.6. Aspecto del interior del mortero M-GEN-FE fabricado con distintas relaciones agua/cemento.

Tras el ajuste, se realizaron nuevas amasadas fijando la relación agua/cemento en 0,38, obteniendo, en todos los casos, escurrimientos adecuados sin segregación de las partículas. En la Tabla 4.3, se presentan las dimensiones de los diámetros resultantes.

Tabla 4.3. Dimensiones del escurrimiento de los morteros con características autonivelantes.

Muestra	a/c	Escurrecimiento [mm]		
		Ø1	Ø2	Media
M-AOF-FC	0,38	245	255	250
M-AOF-CV		245	245	245
M-AOF-FE		260	265	263
M-AEN-FE		190	200	195

En la Figura 4.7, se muestra el aspecto de los morteros tras el ensayo de escurrimiento.

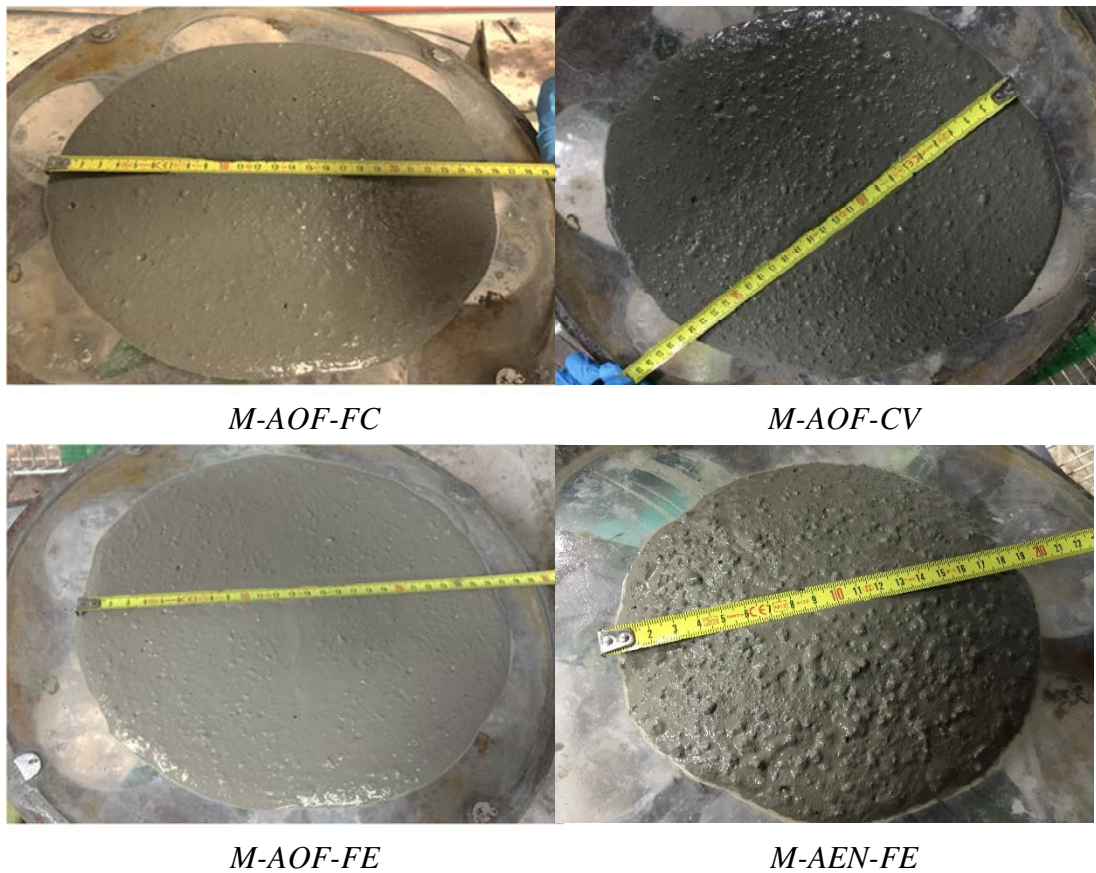


Figura 4.7. Escurrimiento de la fase mortero de los hormigones.

Todos los morteros en estado fresco presentaron distribución homogénea de las partículas de arena y simetría en el escurrimiento. Como se puede apreciar en la Figura 4.7, la incorporación de arena de escoria de horno eléctrico provocó la disminución del diámetro de la torta de escurrimiento en un 20% respecto de las dosificaciones con arenas naturales. Este efecto se debe al mayor contenido de partículas gruesas aportadas por la arena de escoria negra.

Se fabricaron cuatro probetas prismáticas de cada dosificación con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico del mortero endurecido. El llenado de los moldes se realizó sin aplicar ningún método de compactación, ayudándose, únicamente, de una espátula para nivelar y alisar la cara superior del mortero.

4.1.2 Caracterización de los morteros en estado endurecido

Tras realizar el curado de los morteros en condiciones normalizadas, se procedió a evaluar el comportamiento a flexotracción y compresión de las muestras a 28 y 60 días de edad, tomando en consideración el posible efecto reactivo de las adiciones, Figura 4.8. Se ensayaron dos probetas de cada dosificación por edad.



Figura 4.8. Ensayos mecánicos realizados sobre morteros.

En la Tabla 4.4, se presenta la evolución temporal de las propiedades mecánicas de los morteros autonivelantes.

Tabla 4.4. Evolución temporal de las propiedades mecánicas.

<i>Muestra</i>	<i>Resistencia a flexotracción [MPa]</i>		<i>Resistencia a compresión [MPa]</i>	
	<i>28 días</i>	<i>60 días</i>	<i>28 días</i>	<i>60 días</i>
<i>M-AOF-FC</i>	16,1	16,3	85,6	106,3
<i>M-AOF-CV</i>	16,0	16,5	82,0	101,8
<i>M-AOF-FE</i>	11,3	18,0	107,5	113,4
<i>M-AEN-FE</i>	19,2	20,5	109,5	116,0

Al igual que en las pruebas realizadas previamente, el carácter reactivo de la adición de escoria de cubilote proporciona mejor comportamiento mecánico al mortero. En la Figura 4.9, se muestra el aspecto de la superficie de rotura de las probetas ensayadas a 60 días a flexotracción.

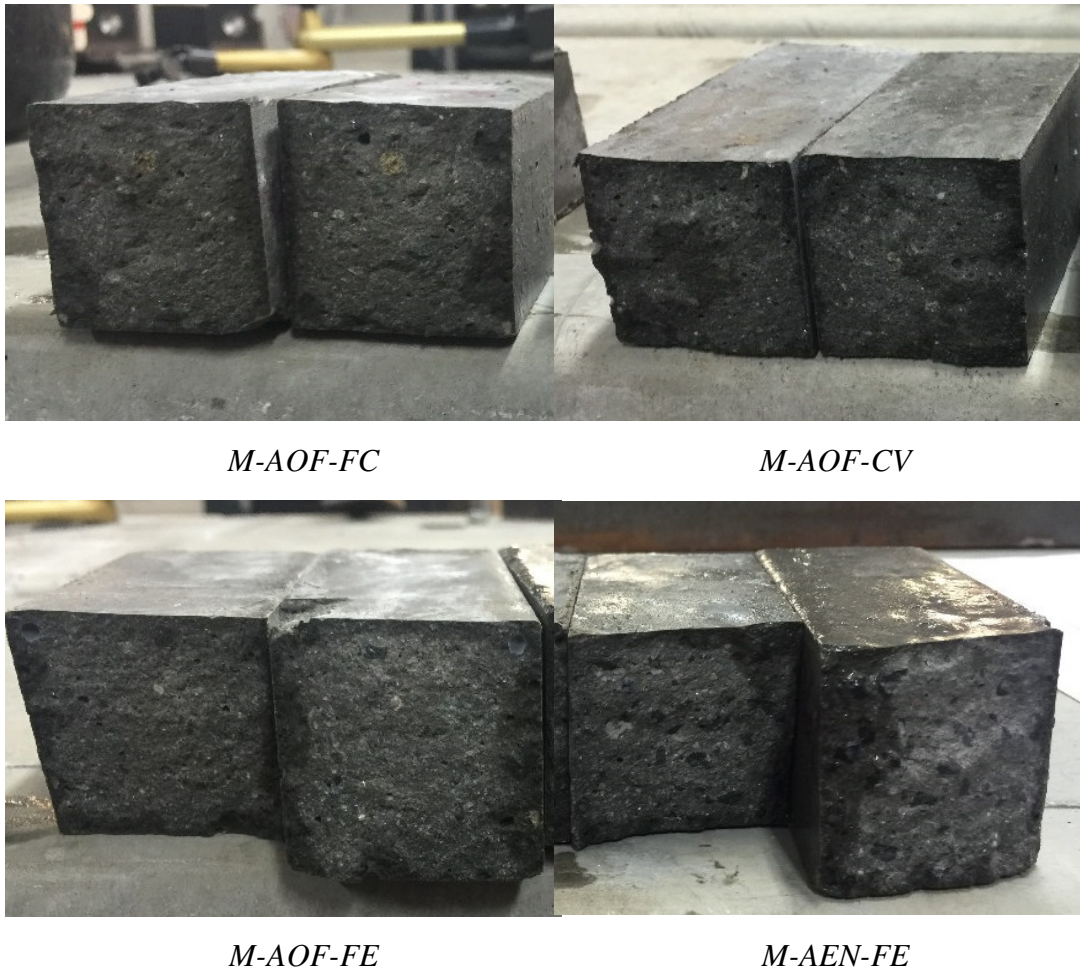


Figura 4.9. Aspecto de la sección transversal de las probetas de mortero tras el ensayo de flexotracción.

Además, se puede apreciar que las probetas, tras el ensayo de flexotracción, presentan superficies de rotura planas. En la sección transversal se observa que, en ningún caso, ha ocurrido segregación. Debido a la viscosidad de las pastas, se han quedado retenidas algunas burbujas de aire. Particularmente, el M-AOF-CV presenta mayor porosidad frente al resto de morteros.

4.2 Caracterización de los hormigones

La caracterización de las distintas amasadas realizadas, se inició con la determinación de las propiedades de los hormigones en estado fresco. Esta fase es de gran importancia, al obtenerse parámetros esenciales según los requerimientos del material para fluir, rellenar y compactar con una estabilidad mínima. La no consecución de las propiedades en estado fresco exigidas, obligó, en la fase experimental previa, a realizar ajustes en las dosificaciones.

A continuación, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones en estado endurecido. Dado que el objetivo principal de la investigación era superar la barrera de muy alta resistencia, especialmente tras incorporar escorias siderúrgicas, se considera un apartado relevante. El resto de ensayos realizados permitieron contrastar las altas prestaciones de los hormigones.

Finalmente, se realizó el estudio de la durabilidad de los hormigones para evaluar la influencia de las adiciones y de los áridos incorporados en la resistencia frente a los agentes externos y condiciones desfavorables durante el paso del tiempo.

Para la caracterización de los hormigones, se fabricaron 180 l de cada dosificación, resultando en un volumen total de hormigón de 720 l.

4.2.1 Hormigón en estado fresco

La caracterización en estado fresco se completó mediante los ensayos de escurrimiento, la caja en L con tres barras y el embudo en V y cada prueba se realizó en distintas amasadas. Los resultados se han evaluado según los criterios de la norma UNE-EN 206-9 [50] y la guía para la fabricación de hormigón autocompactante de EFNARC [43].

4.2.1.1 Ensayo de escurrimiento

En la Tabla 4.5, se muestran los resultados de escurrimiento obtenidos para cada una de las dosificaciones y el tiempo necesario para alcanzar un punto de la circunferencia de 500 mm de diámetro, t_{500} .

Tabla 4.5. Escurrimiento de las distintas dosificaciones y t_{500} .

<i>Muestra</i>	<i>Diámetro₁</i> [mm]	<i>Diámetro₂</i> [mm]	<i>Escurrimiento</i> [mm]	<i>t₅₀₀</i> [s]
<i>HAC-GOF-FC</i>	740	770	755	9
<i>HAC-GOF-CV</i>	740	730	735	7
<i>HAC-GOF-FE</i>	760	780	770	8
<i>HAC-GEN-FE</i>	690	680	685	10

Todos los hormigones fabricados con ofita presentan un escurrimiento superior a los 700 mm. Según la norma UNE-EN 206-9, los hormigones con filler calizo y escoria de cubilote se pueden catalogar como AC-E3, mientras que la adición de ceniza volante redujo la categoría de la mezcla a AC-E2. Los escurrimientos obtenidos son adecuados para el tamaño máximo de árido empleado. Según EFNARC [43], todos los hormigones con ofita se clasificarían como SF-2, ideal para aplicaciones convencionales como pilares y muros.

La incorporación de escorias como árido grueso en el HAC-GEN-FE reduce la capacidad de fluir de la mezcla en un 10%, sin embargo, mantiene la clase de escurrimiento de las dosificaciones con árido natural, AC-E2 según la norma UNE-EN 206-9 y SF-2 según EFNARC [43]. Este comportamiento es acorde con las experiencias previas en hormigones convencionales en las que la incorporación de escorias conlleva la disminución de la trabajabilidad [11,28]. La disminución en la fluidez se asocia al incremento del rozamiento de las partículas de escoria de horno eléctrico, así como, también, a su elevada densidad.

Es sabido que un alto contenido de finos y una baja relación agua/cemento favorece el incremento de la viscosidad de las mezclas, condición necesaria para mantener en suspensión los áridos con densidad considerable y dosificados en gran proporción. En las dosificaciones propuestas, la elevada interacción entre las partículas de árido conlleva que la velocidad de flujo se sitúe en el límite recomendado para los hormigones fabricados con ofita, mientras que la dosificación con escorias negras, supera el límite por 2 s. El incremento de viscosidad de las mezclas impide la segregación, sin embargo, puede acarrear efectos negativos como una mayor acumulación de aire atrapado o un peor acabado superficial.

De la Figura 4.10 a la Figura 4.13 se presentan las secuencias y los tiempos de escurrimiento del hormigón fresco desde que se levanta el cono hasta que cesa el flujo en la bandeja.



Figura 4.10. Secuencia y tiempos durante el escurrimiento del HAC-GOF-FC.

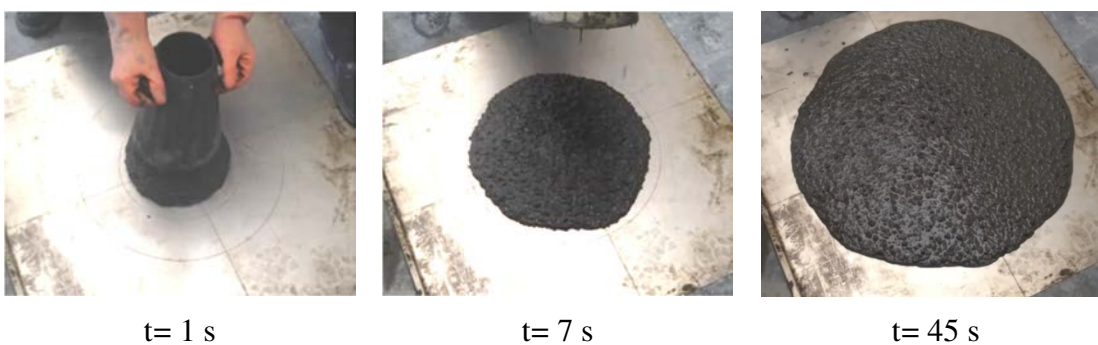


Figura 4.11. Secuencia y tiempos durante el escurrimiento del HAC-GOF-CV.

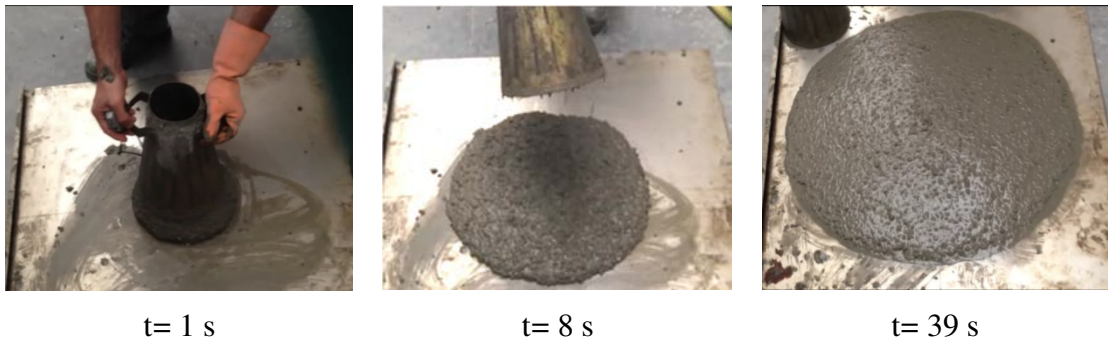


Figura 4.12. Secuencia y tiempos durante el escurrimiento del HAC-GOF-FE.



Figura 4.13. Secuencia y tiempos durante el escurrimiento del HAC-GEN-FE.

Mediante un análisis visual inicial, se puede apreciar que la distribución de áridos es correcta en todas las dosificaciones. Sin embargo, la estabilidad del hormigón está al límite debido al elevado contenido de pasta incorporado. Según el tipo de adición empleada en cada caso, dicha estabilidad puede mejorar o empeorar. A continuación, se analizan, en detalle, cada uno de los escurrimientos obtenidos.

El escurrimiento del HAC-GOF-FC, Figura 4.10, presenta zonas con mayor concentración de áridos, asociado a su menor capacidad de flujo. En el perímetro de la torta, se observa una banda de mortero de 10 mm de espesor y un ligero sangrado.

El comportamiento del HAC-GOF-CV, Figura 4.11, es más estable, favorecido por la morfología de las cenizas volantes que aportan un escurrimiento más homogéneo. Se puede apreciar una pequeña banda de mortero alrededor de la torta con espesor inferior a 10 mm y la ausencia sangrado.

El escurrimiento del HAC-GOF-FE, Figura 4.12, proporciona una distribución homogénea de áridos y se comprueba la disminución de la viscosidad de la pasta al incorporar la adición vítrea, manteniendo la relación agua/cemento teórica. Esto ha originado un mayor sangrado y exudación tras el escurrimiento. Adicionalmente, se observaron áridos descubiertos en el perímetro, Figura 4.14. Esta adición ha comprometido la estabilidad del hormigón, por su baja adsorción, sin embargo, esto puede llegar a ser un beneficio al permitir dosificar hormigones de igual consistencia con una relación agua/cemento menor.



Figura 4.14. Aspecto del escurrimiento de la dosificación HAC-GOF-FE.

En la torta de escurrimiento de la dosificación HAC-GEN-FE, Figura 4.13, se observa una distribución muy homogénea, simétrica y estable. A pesar de la elevada densidad de las escorias no se aprecia segregación ni concentración de áridos gruesos. La mayor absorción de las partículas de escorias negras ha contrarrestado el exceso de agua registrado tras incorporar la escoria de cubilote. Se produce una estrecha banda de mortero en ciertas zonas del perímetro de 10 a 15 mm de espesor.

4.2.1.2 Método de la caja en L

En la Tabla 4.6, se muestran las alturas H1 (al fondo del tramo vertical) y H2 (al final del tramo horizontal) y el valor de PL obtenidos en cada una de las dosificaciones.

Tabla 4.6. Capacidad de paso según la caja en L empleando 3 barras.

<i>Muestra</i>	<i>H₁ [mm]</i>	<i>H₂ [mm]</i>	<i>PL</i>
<i>HAC-GOF-FC</i>	90	80	0,89
<i>HAC-GOF-CV</i>	90	76	0,84
<i>HAC-GOF-FE</i>	95	86	0,91
<i>HAC-GEN-FE</i>	100	80	0,80

Los resultados de la capacidad de paso PL obtenidos son favorables en todos los casos de acuerdo a los requerimientos de la norma UNE-EN 206-9 [50] al ser superiores o iguales a 0,8. Esto permite clasificarlos como AC-RB2 y PA-2 según EFNARC [43]. Se constata que los valores de PL siguen el mismo orden que los resultados de escurrimiento del apartado anterior.

Durante la ejecución de los ensayos, se observó una notable reducción en la velocidad de flujo a través de espacios confinados de los hormigones que incorporan escoria de cubilote, siendo este aspecto más acusado en la dosificación del HAC-GEN-FE.

De la Figura 4.15 a la Figura 4.18 se presentan las secuencias de flujo con los tiempos asociados para los distintos hormigones, hasta que se completa el tramo horizontal. Se puede apreciar que, en ningún caso, ha habido bloqueo en la zona de las barras.

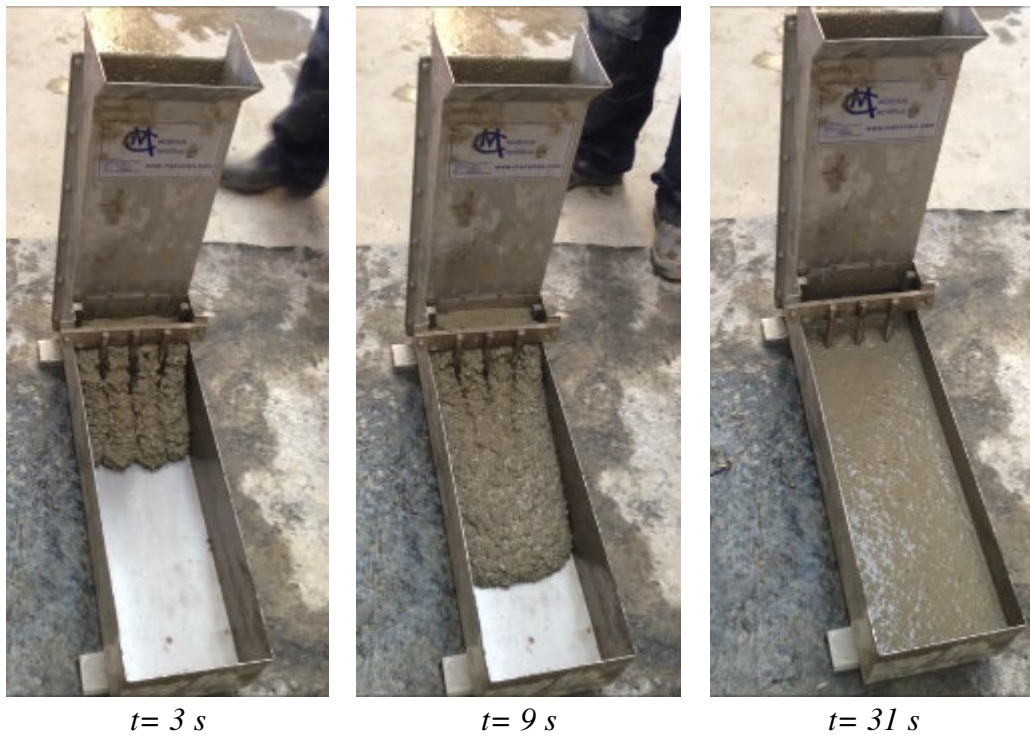


Figura 4.15. Secuencia de paso y tiempos en la caja en L del HAC-GOF-FC.

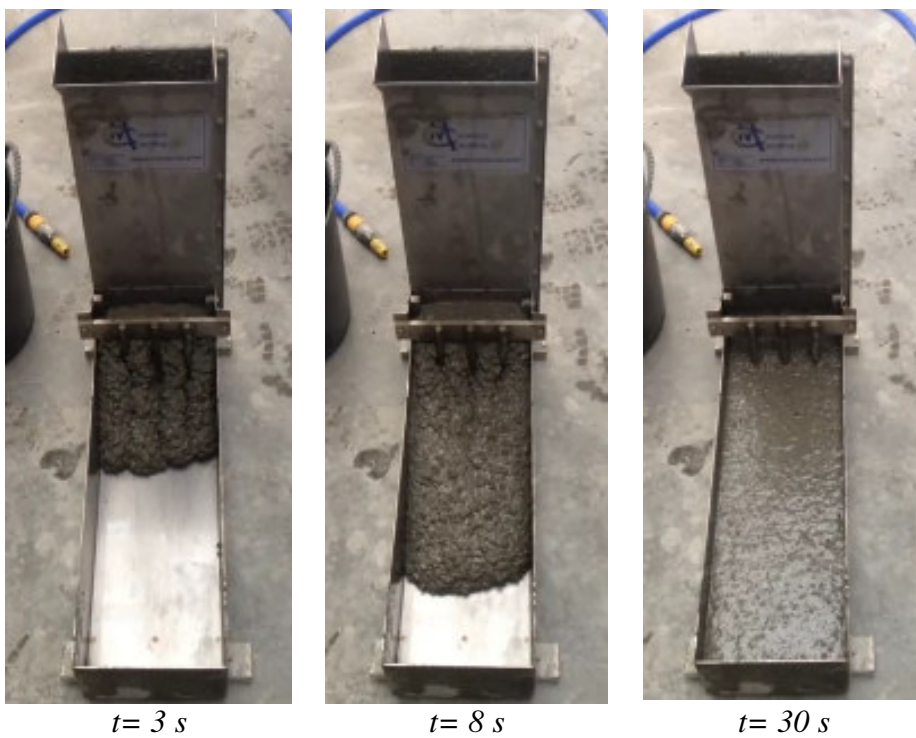


Figura 4.16. Secuencia de paso en la caja en L de la dosificación HAC-GOF-CV.

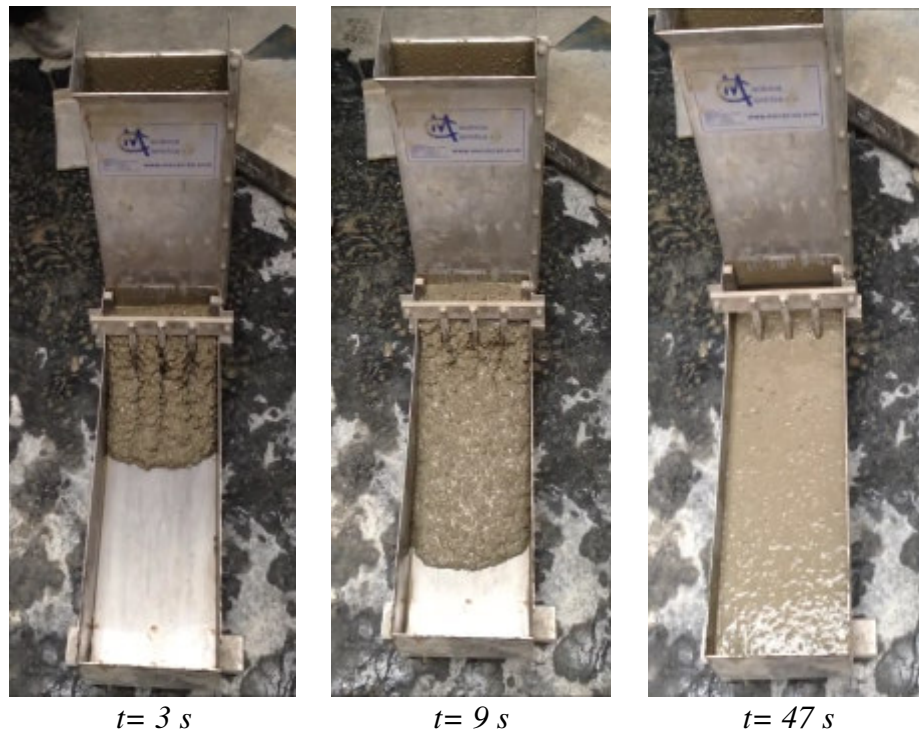


Figura 4.17. Secuencia de paso en la caja en L de la dosificación HAC-GOF-FE.

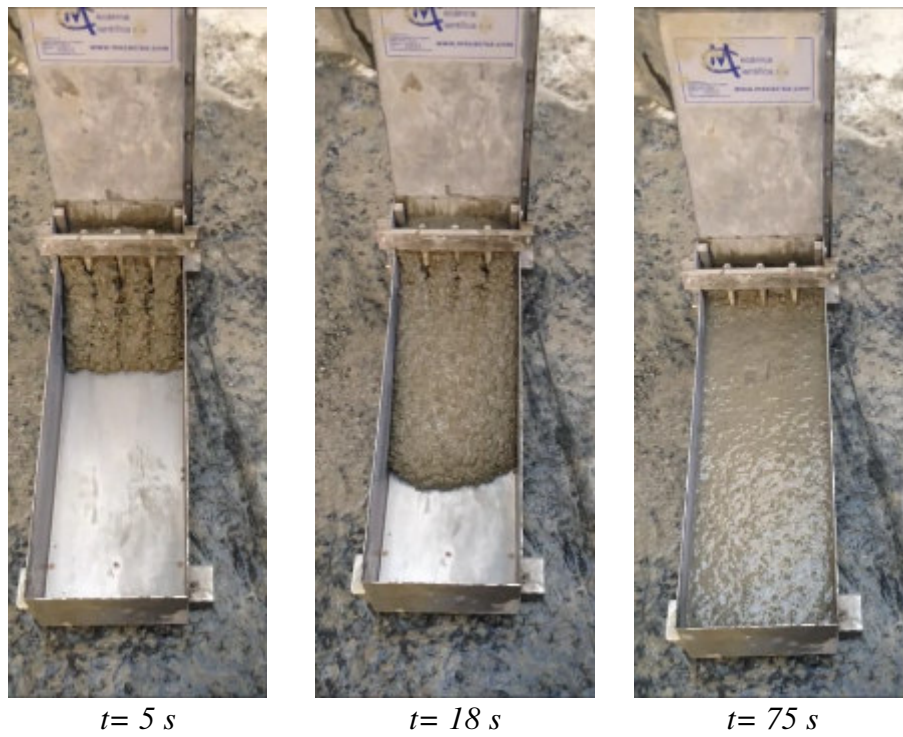


Figura 4.18. Secuencia de paso en la caja en L de la dosificación HAC-GEN-FE.

4.2.1.3 Ensayo del embudo en V

En la Tabla 4.7, se muestran los tiempos, t_v , transcurridos hasta vaciar el embudo en V para las distintas dosificaciones.

Tabla 4.7. *Tiempos transcurridos en el embudo en V.*

<i>Muestra</i>	<i>t_v [s]</i>
HAC-GOF-FC	80
HAC-GOF-CV	46
HAC-GOF-FE	89
HAC-GEN-FE	136

Como era de esperar, los resultados de velocidad de flujo a través del embudo son superiores a los 25 s establecidos en la normativa en vigor para hormigones autocompactantes convencionales [50]. Esto se debe, principalmente, al importante contenido de áridos gruesos por metro cúbico, que dificulta el paso a través de espacios reducidos tales como la boca del embudo.

Por ello, las mezclas diseñadas en esta investigación, no son adecuadas para atravesar zonas altamente confinadas. Para cumplir ese requerimiento, se precisan ajustes que mejoren la capacidad de paso, como puede ser la reducción del contenido de la fracción gruesa y el minimizar el contenido de partículas de tamaño superior a 2 mm en el mortero. Como contrapartida, estas alteraciones reducirían las resistencias mecánicas de los hormigones.

Otro factor que provoca el aumento del t_v es el elevado contenido de finos incorporados, que ha sido necesario para incrementar la viscosidad de la pasta. El efecto adverso que acarrea los hormigones de alta viscosidad es la gelificación por tixotropía, siendo observada en todas las amasadas tras mantener en reposo la mezcla fresca. Este efecto se magnificó en el HAC-GEN-FE por la mayor absorción de las partículas de escoria.

Durante la ejecución de las pruebas en estado fresco y el llenado de las probetas, el hormigón se depositaba en capazos a medida que se iba usando, mientras que, el resto de la amasada, se mantuvo en la hormigonera en marcha para evitar este fenómeno. El aumento de las tensiones superficiales en reposo puede ser una ventaja, al reducir la fuga de pasta por las juntas y la presión en los encofrados.

4.2.2 Hormigón en estado endurecido

En este apartado, se describen los ensayos realizados sobre los hormigones en estado endurecido. El apartado está dividido según han sido determinadas las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

El total de probetas confeccionadas para la determinación de las propiedades en estado endurecido del hormigón fue de 112 cubos de lado igual a 100 mm, 92 cilindros normalizados de 300 x 150 mm, 8 prismas de 50x50x300 mm y 8 probetas cónicas.

4.2.2.1 Aspecto del hormigón endurecido

En la Figura 4.19, se presenta el acabado de probetas cilíndricas normalizadas y de cubos de 100 mm de lado, de los distintos hormigones fabricados. Además, se muestra el interior de las probetas cilíndricas normalizadas mediante cortes longitudinales y transversales. En las instantáneas, se puede apreciar el importante contenido de árido grueso incorporado en las dosificaciones, compatible con la cantidad de mortero necesaria para cumplir con los requerimientos en estado fresco propuestos.

En la primera columna de la Figura 4.19 se secuencia el HAC-GOF-FC, que presenta buen acabado superficial. Sin embargo, se observan algunos poros que corresponden a burbujas de aire atrapado. En los cortes transversales se aprecia una distribución homogénea de los áridos y las líneas de flujo. No hay indicios de segregación en esta dosificación.

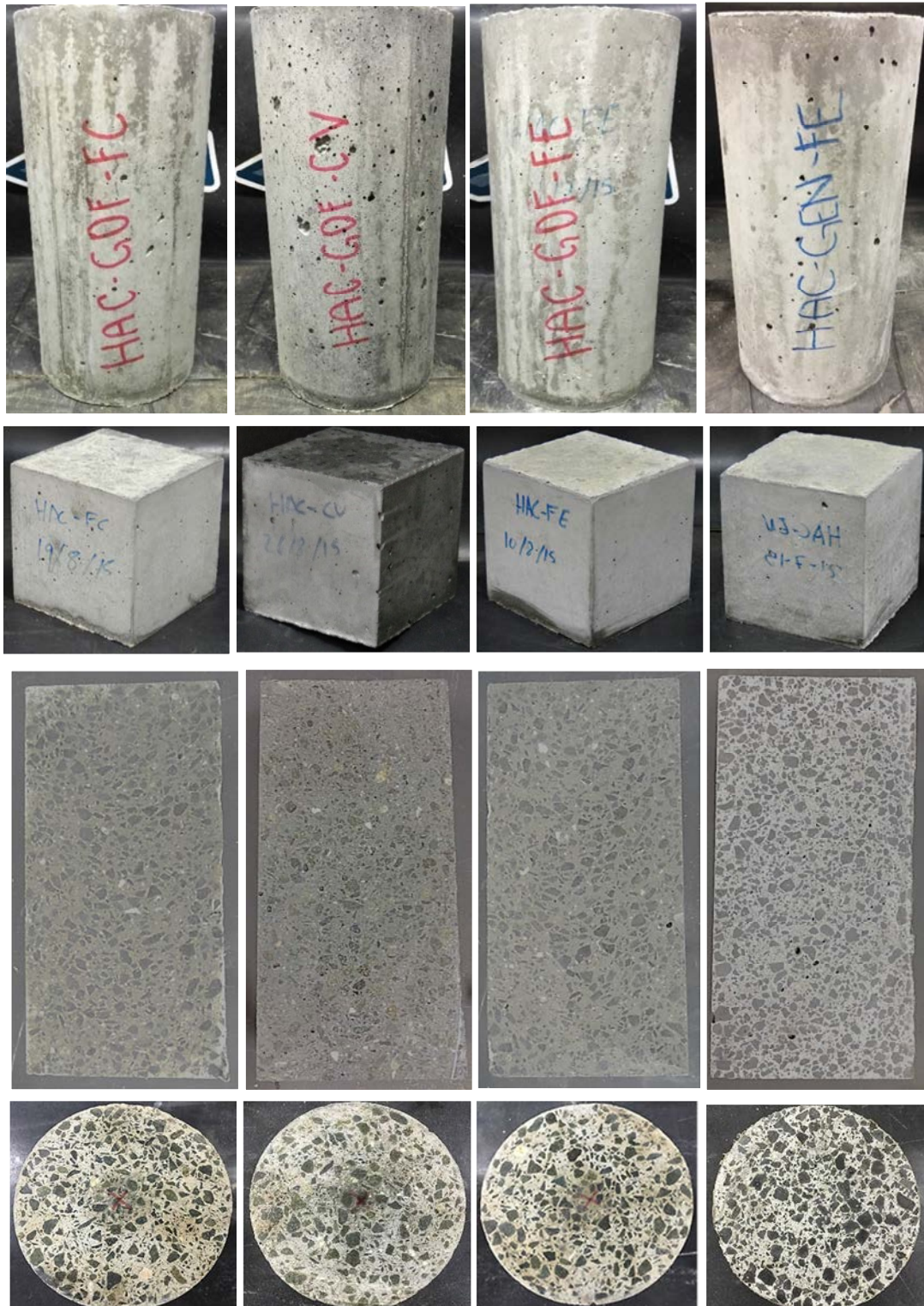


Figura 4.19. Acabado y distribución de las partículas de áridos en los hormigones.

En la segunda columna de la Figura 4.19 se sitúa el HAC-GOF-CV, que presenta mayor cantidad de aire atrapado en superficie respecto al HAC-GOF-FC. Se observa la presencia de poros distribuidos a lo largo de las caras de las probetas, Figura 4.20, debida, en parte, a una reacción gasificante entre la adición y el aditivo. Dicha interacción, se comprobó al mezclar ceniza volante con el aditivo en proporciones iguales. A diferencia del resto de dosificaciones fabricadas con árido natural, en el corte longitudinal no se aprecian las líneas de flujo del hormigón. En la parte superior de la probeta cilíndrica no aparecen signos de segregación del árido. Cabe recordar que esta dosificación evidenciaba un ligero aumento de la viscosidad de la pasta y una disminución del escurrimiento y el coeficiente de paso respecto al resto de adiciones.

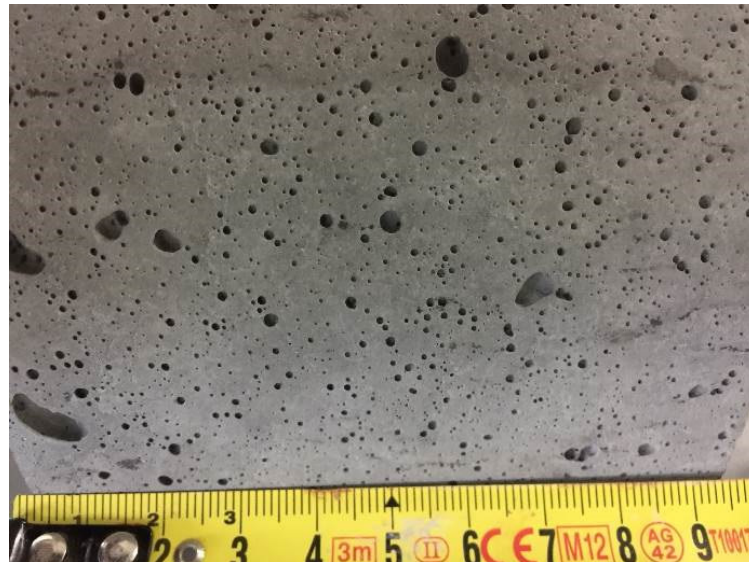


Figura 4.20. Aspecto de la porosidad superficial del hormigón HAC-GOF-CV.

En la tercera columna se presenta el HAC-GOF-FE. La incorporación de escoria de cubilote confiere un magnífico acabado al hormigón, dado que la mayor fluidez de la pasta evita que se acumulen poros en la superficie lateral. En la sección longitudinal de la probeta cilíndrica, se observa que las líneas de flujo son más acusadas que en el resto de adiciones, debido a la menor viscosidad comentada. Esta característica, junto a que se ha mantenido la relación agua/cemento teórica, resulta en ligeros signos de segregación de las partículas de árido grueso. Esto concuerda con el sangrado y la exudación observados en el ensayo de escurrimiento. Según EFNARC [43], el uso de la escoria de horno alto, la adición con mayor parecido a la escoria de cubilote, incrementa el riesgo de segregación por el mayor tiempo de fraguado respecto al resto de adiciones.

La última columna corresponde al HAC-GEN-FE, el cual presenta buen acabado por contener la escoria de cubilote como adición. Sin embargo, se aprecian poros aislados en la superficie lateral del cilindro que corresponden al aire ocluido que queda atrapado entre las partículas de árido. Al igual que en el HAC-GOF-CV, en el corte longitudinal no se aprecian las líneas de flujo del hormigón. Del mismo modo que sucede en el exterior de la probeta, se detectaron poros inaccesibles resultantes de las burbujas de aire atrapado en la zona inferior del cilindro. No se observan signos de segregación en la cara abierta de la probeta.

Como complemento a las imágenes anteriores, en la Figura 4.21 se puede apreciar en detalle el aspecto de las pastas de los hormigones bajo una lupa. Cabe destacar, nuevamente, la mayor porosidad de la pasta del HAC-GOF-CV y, en el caso del HAC-GEN-FE, la correcta penetración de la pasta en las irregularidades superficiales de los áridos, así como, también, la porosidad inaccesible de las partículas de gravilla de escoria.

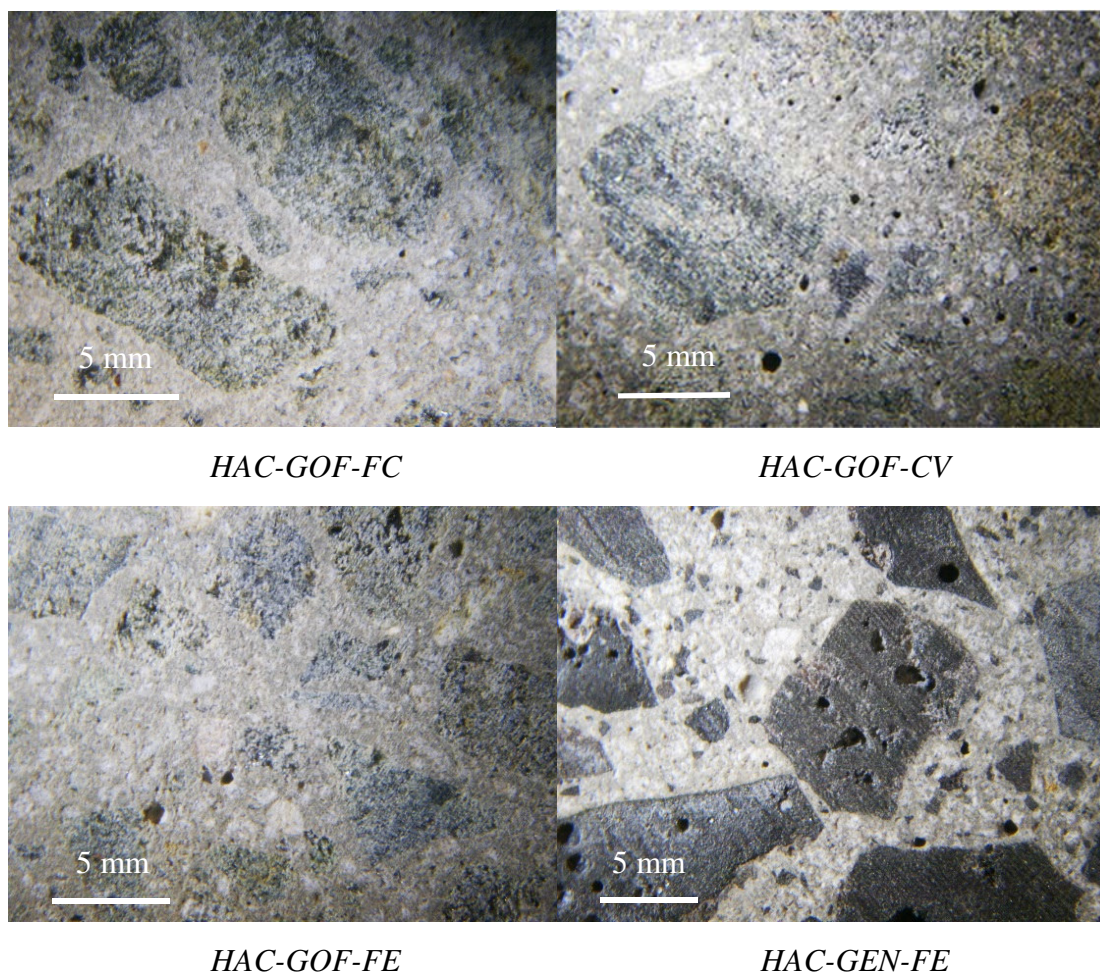


Figura 4.21. Aspecto de una superficie de corte de los hormigones bajo la lupa.

4.2.2.2 Propiedades físicas

En la Figura 4.22, la Figura 4.23 y la Figura 4.24 se presentan los valores de densidad relativa, aparente y saturada, respectivamente, obtenidos a los 90 días de curado, de cada una de las tres alturas de probeta consideradas.

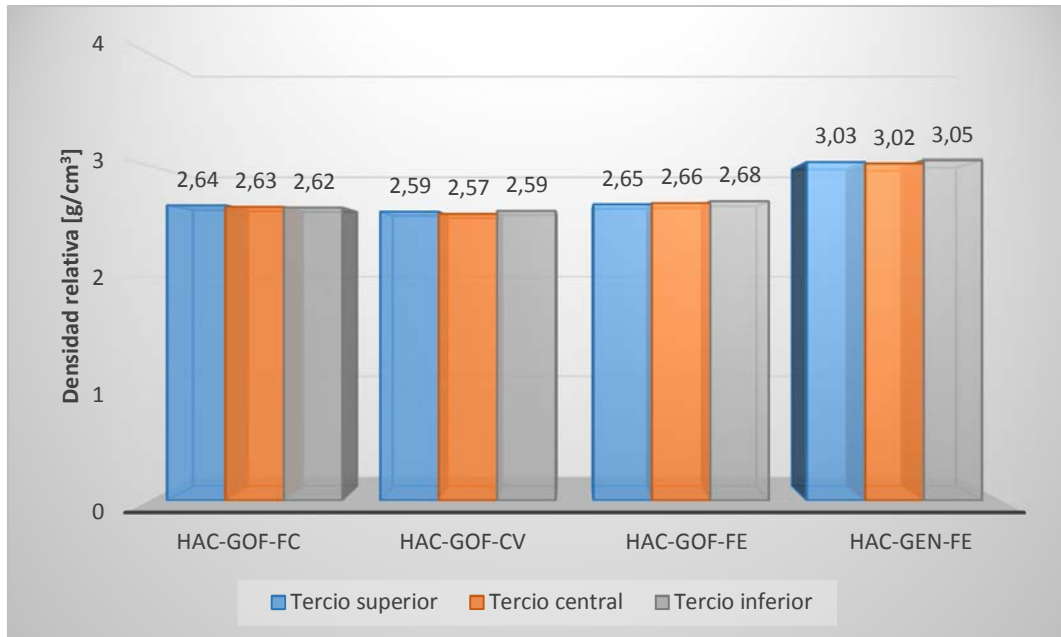


Figura 4.22. Densidad relativa media de los tercios de probetas cilíndricas.

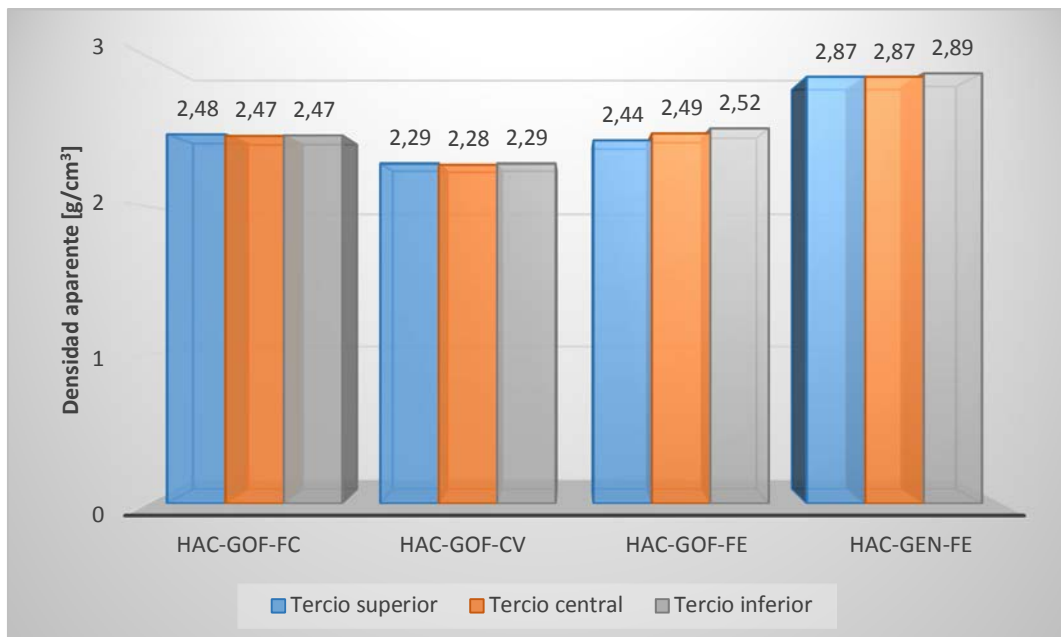


Figura 4.23. Densidad aparente media de los tercios de probetas cilíndricas.

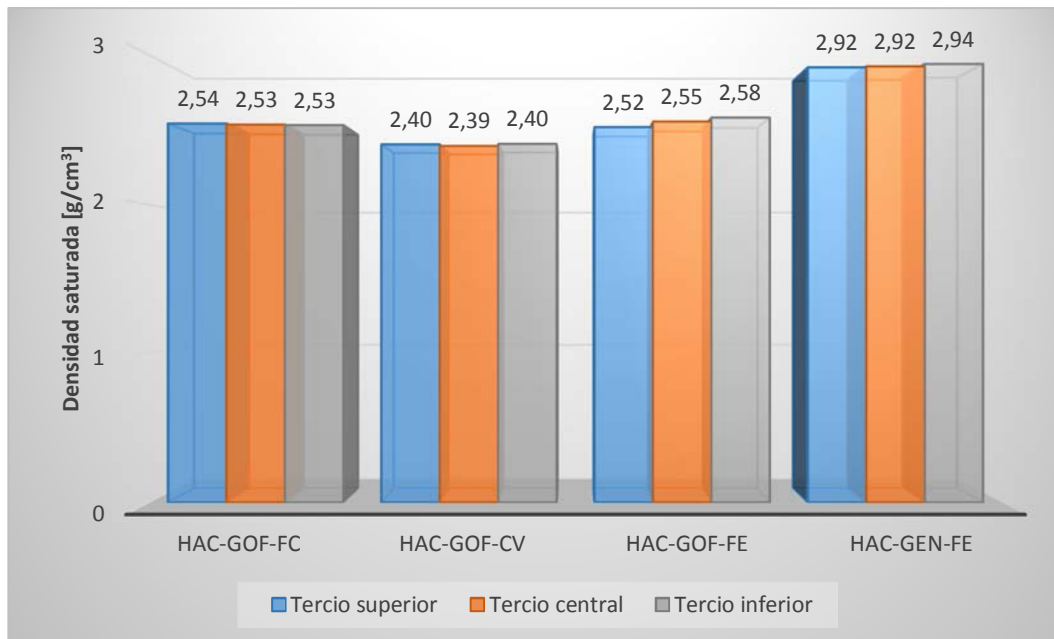


Figura 4.24. Densidad saturada media de los tercios de probetas cilíndricas.

La elevada densidad de las escorias negras confiere al hormigón HAC-GEN-FE una densidad, un 15%, mayor en comparación con las dosificaciones confeccionadas con gravilla de ofita. Las adiciones no han influido en la densidad de los hormigones, a excepción de las cenizas volantes, que han ocasionado un descenso de 2% de la densidad relativa y del 7% de la densidad aparente.

La adición de escoria de cubilote en el HAC-GOF-FE ha proporcionado un hormigón de menor viscosidad en estado fresco, que ha afectado a la estabilidad del hormigón durante el fraguado, causando una ligera segregación del árido. Esto se puede confirmar con la disminución de la densidad del hormigón cuanto mayor es la altura de la probeta cilíndrica. En el resto de dosificaciones con árido natural no se observa esta diferencia. En el caso del HAC-GEN-FE, se detecta un pequeño aumento de la densidad en el tercio inferior. Los resultados confirman la homogeneidad de los hormigones objeto de estudio.

A continuación, en la Figura 4.25 y la Figura 4.26, se recogen los valores de porosidad y los coeficientes de absorción que presentan las cuatro combinaciones estudiadas.

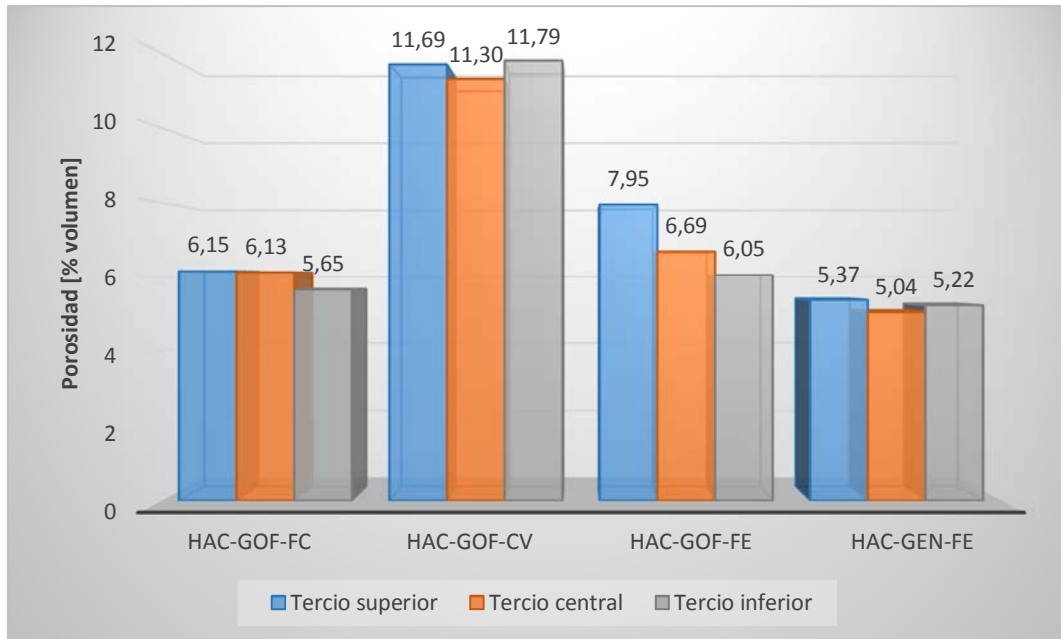


Figura 4.25. Porosidad media de los tercios de probetas cilíndricas.

La porosidad accesible del hormigón fabricado con escorias negras es menor frente al resto de dosificaciones, al estar dosificado con una menor relación agua/cemento y por la mayor densidad de las partículas de árido que facilita la expulsión del aire atrapado. La dosificación HAC-GOF-CV presenta una porosidad abierta muy superior, la cual era esperable tras comprobar el aspecto de las probetas.

En los tercios superiores se observa un ligero aumento de la porosidad respecto a los tercios centrales e inferiores asociado a la concentración de aire atrapado durante la consolidación del material. En el caso del HAC-GOF-FC, este incremento se sitúa en torno al 9%, mientras que, en el HAC-GOF-CV no se aprecian diferencias significativas. En el HAC-GOF-FE se obtuvo un 30% de aumento de la porosidad en los tercios superiores, siendo el hormigón con mayor aumento proporcional, asociado a la segregación, y en consecuencia, al mayor contenido de mortero. El HAC-GEN-FE presenta una diferencia del 3% que confirma la homogeneidad del material.

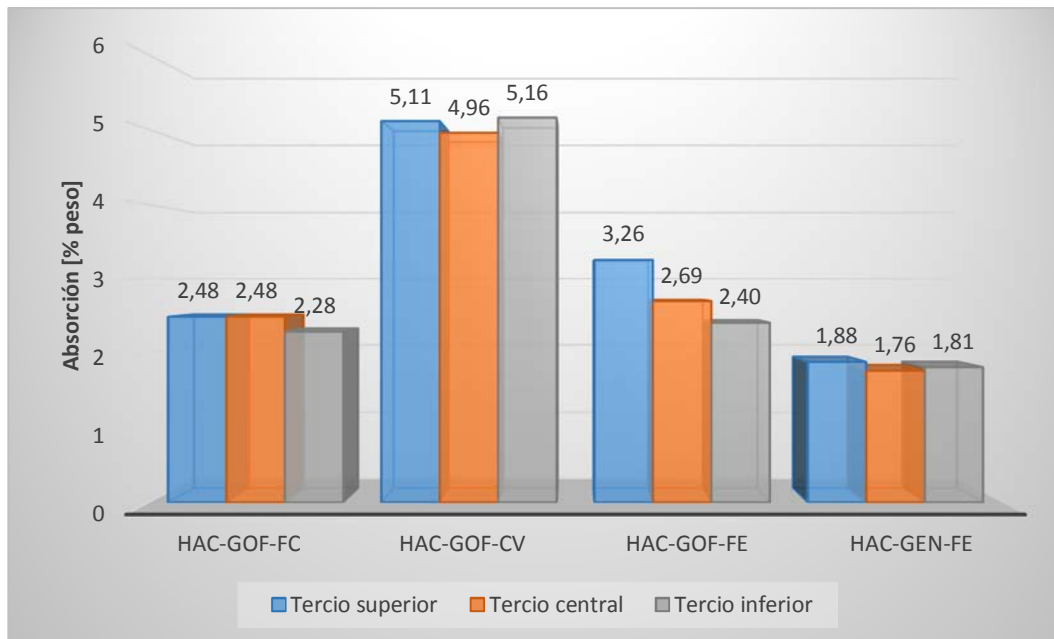


Figura 4.26. Absorción media de los tercios de probetas cilíndricas.

Los resultados de absorción son análogos a los de porosidad a excepción del HAC-GEN-FE en el que la alta densidad de los hormigones hace que la absorción, evaluada como peso del agua absorbida frente al peso del hormigón, sea notablemente menor. La diferencia de densidad de los distintos hormigones hace que el coeficiente de absorción de las dosificaciones con áridos de distinta naturaleza no sea comparable. En el caso del HAC-GOF-CV los resultados obtenidos son semejantes a los de un hormigón convencional.

4.2.2.3 Propiedades mecánicas

4.2.2.3.1 Resistencia a compresión uniaxial

En base a los objetivos propuestos, la propiedad mecánica clave en el desarrollo de esta Tesis es la resistencia a compresión del hormigón. Mediante el uso de cemento Tipo I 52,5 R el endurecimiento y desarrollo de altas resistencias ha tenido lugar en un breve periodo de tiempo.

Al igual que en los resultados obtenidos en las mezclas de morteros, el hormigón HAC-GEN-FE ha desarrollado resistencias superiores al resto de dosificaciones, mientras que, el hormigón HAC-GOF-FC, considerado el hormigón de control, ha resultado el material menos resistente.

El incremento de las propiedades mecánicas del hormigón con un esqueleto de escorias respecto al hormigón con áridos naturales se debe, principalmente, a tres factores: el mejor desempeño del árido siderúrgico frente a esfuerzos a compresión, Figura 4.27, el aumento del coeficiente de rozamiento entre partículas debido a la morfología que presentan los áridos gruesos de escoria (rugosidad y angulosidad) y la mejor unión adherente entre la pasta y el propio árido.

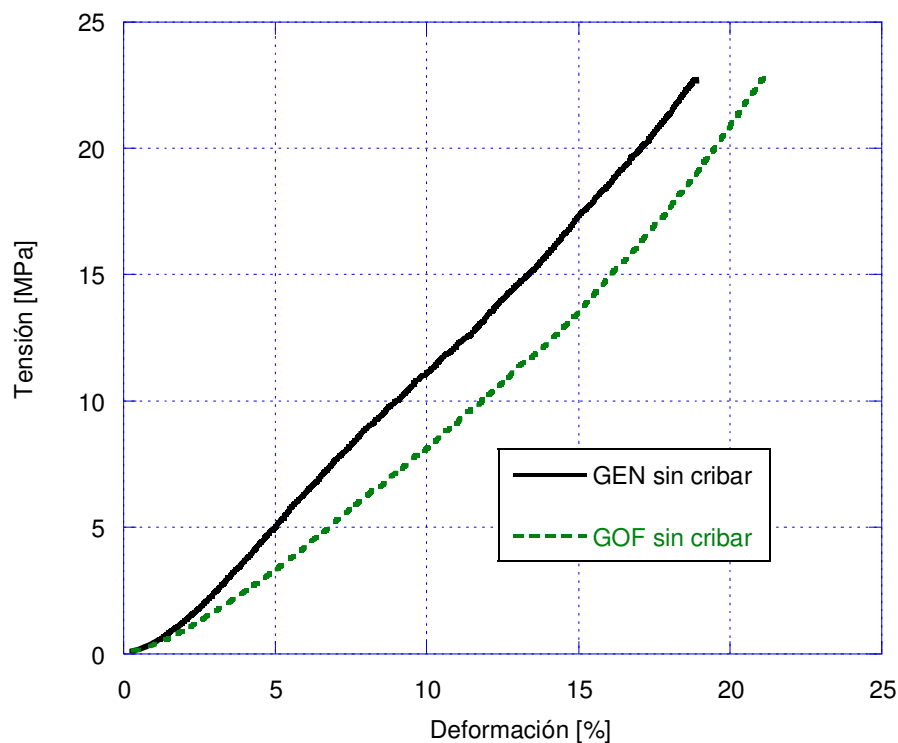


Figura 4.27. Comportamiento de los áridos empleados bajo esfuerzos a compresión.

En lo referente a las adiciones, comparando las tres dosificaciones confeccionadas con áridos naturales, se observa que la escoria de cubilote valorizada supera a las dosificaciones con filler calizo o cenizas volantes. Esto se ha logrado por el carácter reactivo de la escoria de cubilote, beneficiado por una dosificación rica en cemento, de baja relación agua/cemento lograda mediante el uso del aditivo superplastificante de última generación.

En la Figura 4.28, se presentan las curvas de evolución temporal del comportamiento a compresión de los hormigones autocompactantes hasta los 365 días de edad, obtenidos sobre probetas cúbicas de 100 mm de lado. Se observa que el hormigón HAC-GEN-FE es más resistente que el resto, seguido del hormigón HAC-GOF-FE, a pesar de su inestabilidad, mientras que, los hormigones HAC-GOF-FC y HAC-GOF CV se sitúan en la última posición con poca diferencia entre ellos.

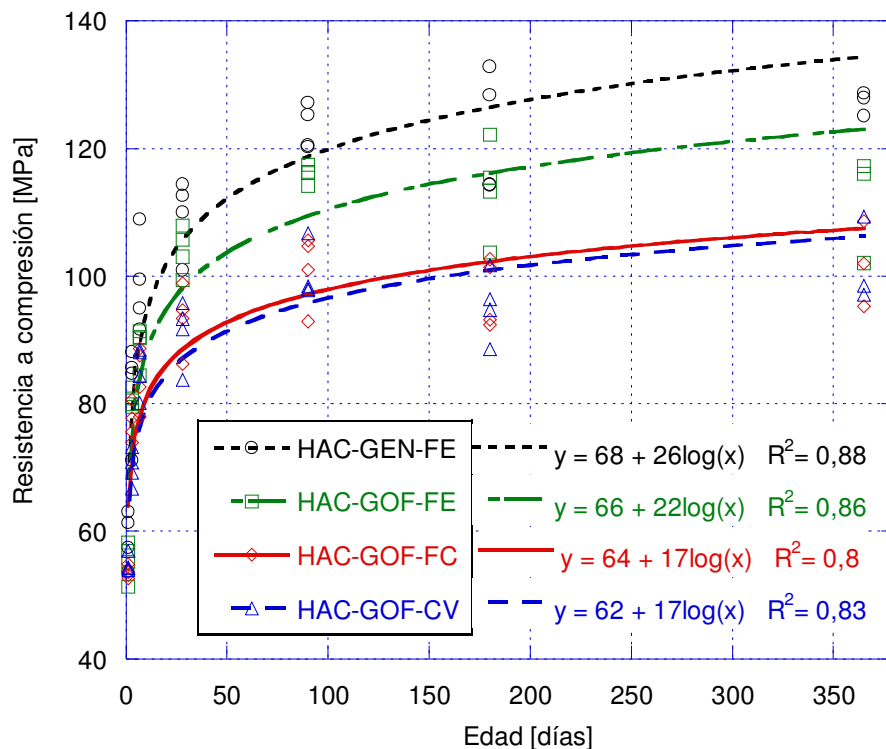


Figura 4.28. Evolución de la resistencia a compresión de las distintas dosificaciones hasta los 365 días.

A los 28 días de edad, los hormigones con escoria de cubilote superaron los 100 MPa, mientras que, el resto se situaban en torno a los 90 MPa. A los 90 días la resistencia de los hormigones se incrementó en 10% respecto a los 28 días, superando en el caso del HAC-GEN-FE los 120 MPa. Tras 180 días, las resistencias de los hormigones con áridos naturales (HAC-GOF) se estabilizaron con valores superiores a los 100 MPa, en cambio, el hormigón HAC-GEN-FE mantuvo su evolución hasta alcanzar los 130 MPa.

A pesar de que todos los hormigones han superado el umbral de los 100 MPa a los 365 días, los hormigones con adición de escoria de cubilote, HAC-GOF-FE y HAC-GEN-FE, han superado al hormigón patrón en un 7,6% y un 25,5%, respectivamente. Esto confirma el efecto observado en las pruebas con morteros. Al final de la campaña de ensayos, la dosificación HAC-GOF-CV presentó el mismo comportamiento mecánico que el HAC-GOF-FC, a pesar de su elevada porosidad.

En la Figura 4.29, se presenta en detalle la evolución de la resistencia durante los primeros 28 días. A las 24 horas, todos los hormigones superaban los 50 MPa, mientras que, tras 72 horas de curado evolucionaron lo suficiente para denominarse de alta resistencia al superar los 70 MPa, mientras que a los 28 días, las dosificaciones con escoria de cubilote alcanzaban la categoría de muy alta resistencia superando los 100 MPa.

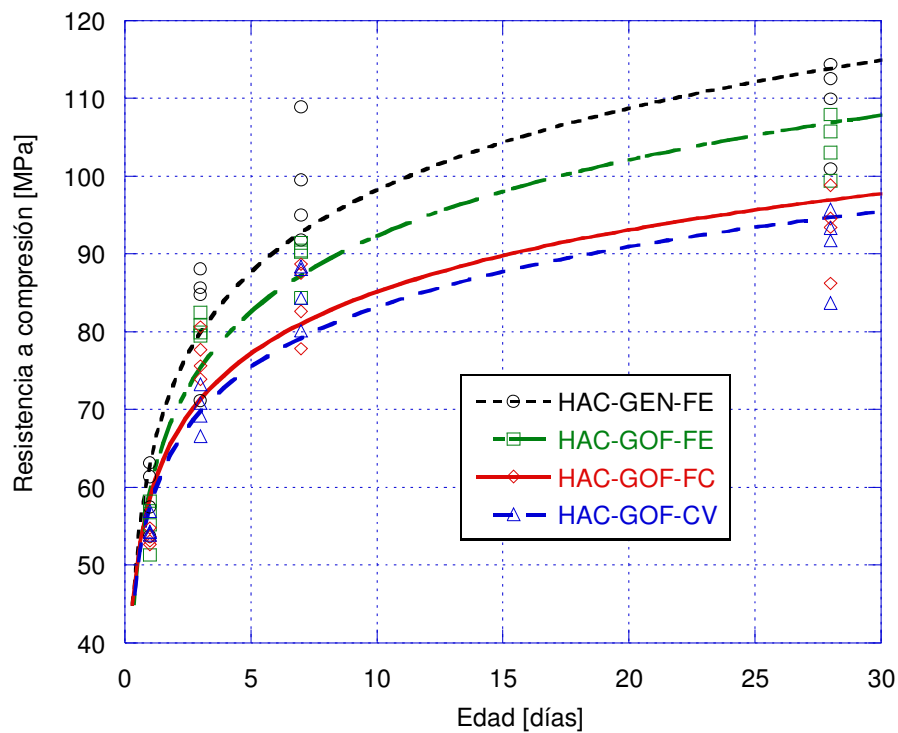


Figura 4.29. Evolución de la resistencia a compresión de las distintas dosificaciones hasta los 28 días.

En general, la evolución de la resistencia a compresión de los hormigones confeccionados, resulta en un incremento superior al 27% entre las 24 horas y los 3 días de edad, mientras que dicho aumento se reduce aproximadamente a 10% entre los 3 y los 7 días, tendencia que también se mantiene entre los 7 y los 28 días de edad.

En la Figura 4.30, se presenta el aspecto de algunas de las roturas de las probetas cúbicas ensayadas a 365 días de edad. Como puede observarse, debido a la elevada sollicitación de esfuerzos de estos hormigones y la excelente interfaz pasta-árido, los planos de corte se han propagado a través de la pasta y los áridos, liberando toda su energía mediante roturas explosivas.

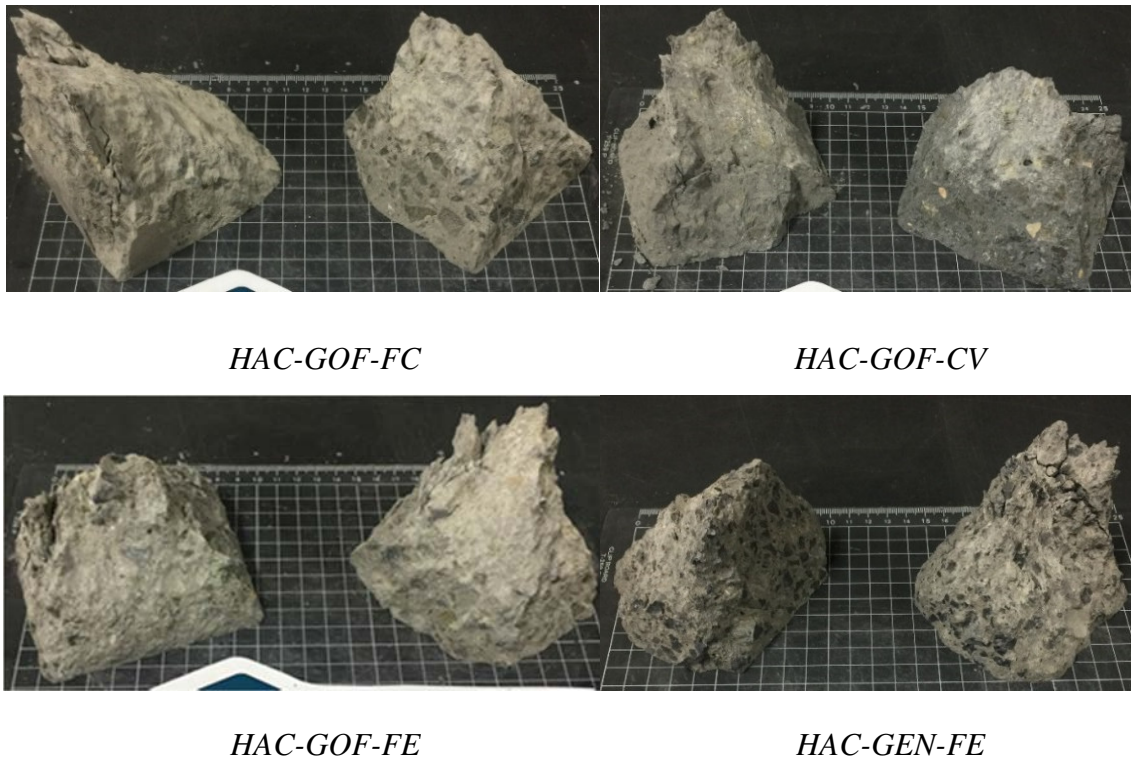


Figura 4.30. Aspecto de las roturas a compresión a 365 días.

4.2.2.3.2 Determinación del módulo secante de elasticidad

En la Tabla 4.8, se recogen los módulos de elasticidad iniciales y estabilizados de las cuatro dosificaciones a distintas edades, obtenidas a partir de los 7 días hasta un año de curado.

Tabla 4.8. Módulos de elasticidad iniciales y estabilizados.

Módulo de elasticidad [GPa] (Inicial/Estabilizado)					
Muestra/Edad	7 días	28 días	90 días	180 días	365 días
HAC-GOF-FC	39,3/42,8	40,4/41,9	42,4/43,9	41,1/44,4	44,5/46,7
HAC-GOF-CV	34,5/36,4	36,1/36,9	37,3/39,5	36,9/39,7	37,8/37,9
HAC-GOF-FE	41,6/41,9	44,7/45,9	44,7/46,9	45,2/47,3	48,4/49,7
HAC-GEN-FE	50,7/51,5	54,1/56,9	55,4/56,4	56,3/58,9	55,7/56,7

El módulo de elasticidad secante, determinado sobre probetas cilíndricas normalizadas, ha resultado acorde con los resultados de resistencia a compresión. La dosificación HAC-GEN-FE ha desarrollado un módulo de elasticidad 20% superior a la dosificación HAC-GOF-FC, mientras que la dosificación HAC-GOF-FE ha superado al hormigón de control en torno al 10%. La dosificación HAC-GOF-CV ha presentado valores inferiores al resto de dosificaciones, siendo un 10% inferior respecto al hormigón de control.

A continuación, en la Figura 4.31 y la Figura 4.32 se presenta la evolución de los módulos de elasticidad iniciales y estabilizados, respectivamente. En ambos casos, se ha realizado el ajuste logarítmico de los resultados obtenidos durante un año.

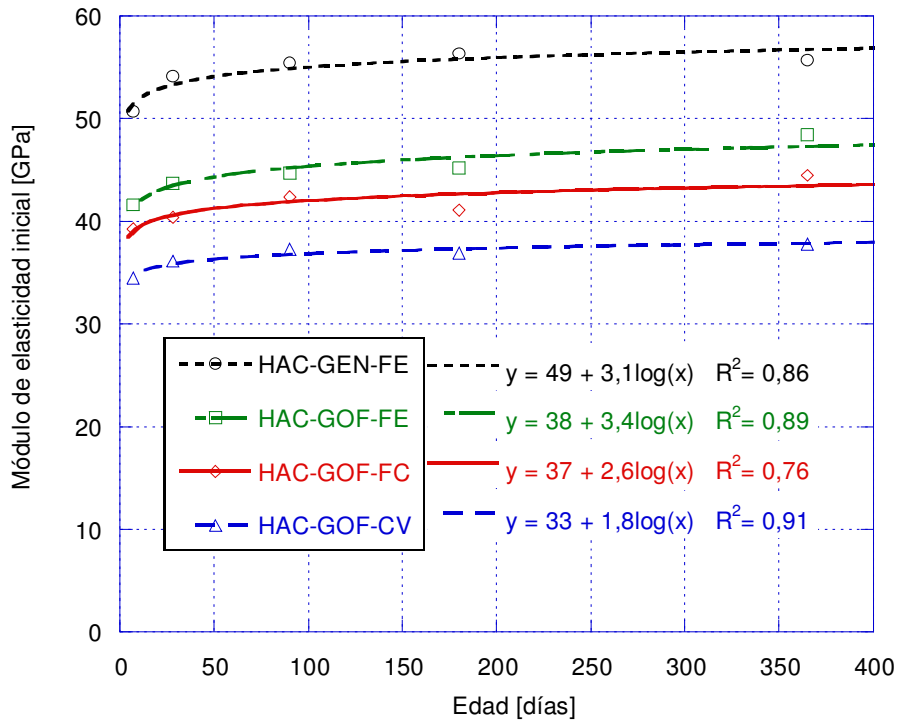


Figura 4.31. Evolución del módulo de elasticidad inicial.

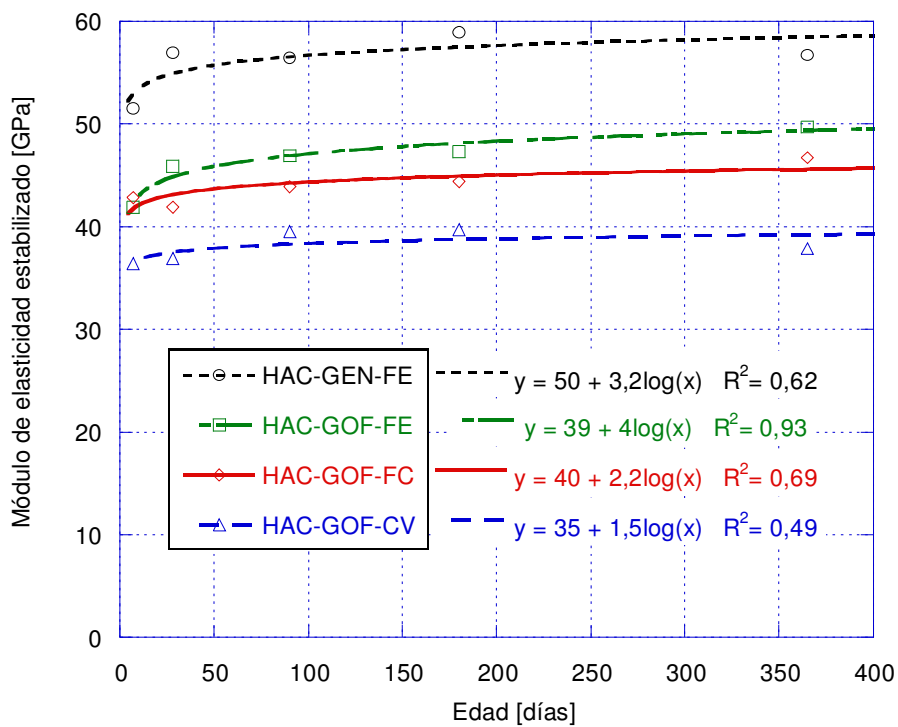


Figura 4.32. Evolución del módulo de elasticidad estabilizado.

Al igual que la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad del hormigón tiende a incrementar con el paso del tiempo, si bien en una proporción notablemente menor. Adicionalmente, se observa que el módulo de elasticidad estabilizado es ligeramente superior al módulo de elasticidad inicial en todos los casos estudiados.

4.2.2.3.3 Tracción indirecta

Como complemento a las propiedades mecánicas determinadas, en la Figura 4.33 se presentan los valores medios de la resistencia a tracción indirecta, obtenidos sobre los tercios de tres probetas cilíndricas normalizadas a los 90 días de edad.

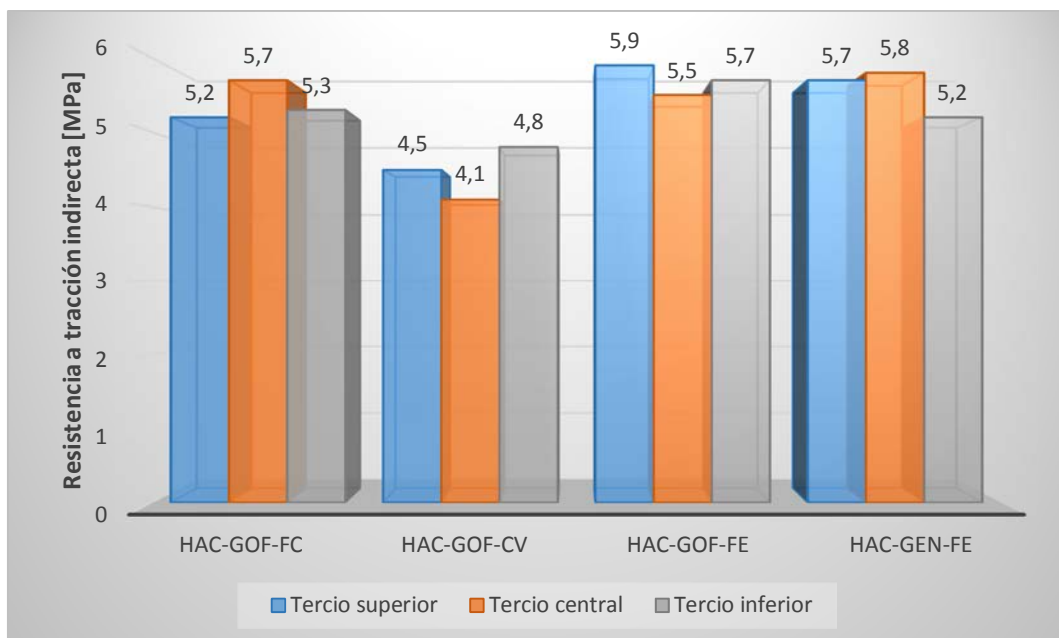


Figura 4.33. Resistencia a tracción indirecta media de los tercios de probetas cilíndricas.

A excepción de la dosificación HAC-GOF-CV que resultó con un promedio de 4,5 MPa, la resistencia a tracción indirecta de los hormigones se sitúa en torno a 5,5 MPa. De los datos obtenidos, se observa que los resultados no presentan ninguna tendencia, ni se aprecian diferencias significativas a distintas alturas.

A los 90 días de edad, la relación de la resistencia a tracción indirecta respecto a la resistencia a compresión para cada tipo de hormigón corresponde a: 5,45% para el HAC-GOF-FC, 4,43% para el HAC-GOF-CV, 5,13% HAC-GOF-FE y 4,51% para el HAC-GEN-FE.

Los resultados obtenidos permiten corroborar que la resistencia a tracción indirecta, de los hormigones de alta resistencia, no es directamente proporcional al comportamiento a compresión.

4.2.2.3.4 Resistencia al desgaste por abrasión

Se ha determinado la resistencia al desgaste por abrasión de las cuatro dosificaciones sobre las caras de corte de los tercios de probetas cilíndricas normalizadas a los 365 días de edad. En la Tabla 4.9 se presentan las dimensiones máximas de las huellas obtenidas en cada tercio.

Tabla 4.9. Dimensiones máximas de las huellas de desgaste por abrasión de los tercios de probetas cilíndricas.

<i>Dimensión máxima de huella [mm]</i>			
<i>Muestra</i>	<i>Tercio superior</i>	<i>Tercio central</i>	<i>Tercio inferior</i>
<i>HAC-GOF-FC</i>	<i>17,0</i>	<i>16,0</i>	<i>15,5</i>
<i>HAC-GOF-CV</i>	<i>17,0</i>	<i>16,0</i>	<i>16,0</i>
<i>HAC-GOF-FE</i>	<i>16,0</i>	<i>15,0</i>	<i>15,0</i>
<i>HAC-GEN-FE</i>	<i>15,5</i>	<i>15,5</i>	<i>15,0</i>

A pesar de que la diferencia entre las dimensiones de las huellas en todas las dosificaciones es muy pequeña, el menor desgaste se ha registrado, como era de esperar, en la dosificación HAC-GEN-FE. En las dosificaciones con árido natural, se observa que las huellas de los hormigones HAC-GOF-FC y HAC-GOF-CV son similares mientras que en la dosificación HAC-GOF-FE se registró una ligera disminución del ancho de la huella que aproxima los resultados a los obtenidos en el HAC-GEN-FE.

Esto permite deducir que el uso de la escoria de cubilote mejora el comportamiento de la pasta e incrementa la resistencia del hormigón al desgaste. Cabe destacar que la norma UNE-EN 1338 [144], establece que la clase más resistente al desgaste por abrasión de baldosas de hormigón debe registrar huellas de dimensión inferior a 20 mm. Adicionalmente, se observa que la menor huella se registra, en todos los casos, en el tercio inferior de los cilindros.

En la Figura 4.34 se presenta el aspecto de las huellas de desgaste por abrasión de las distintas dosificaciones.

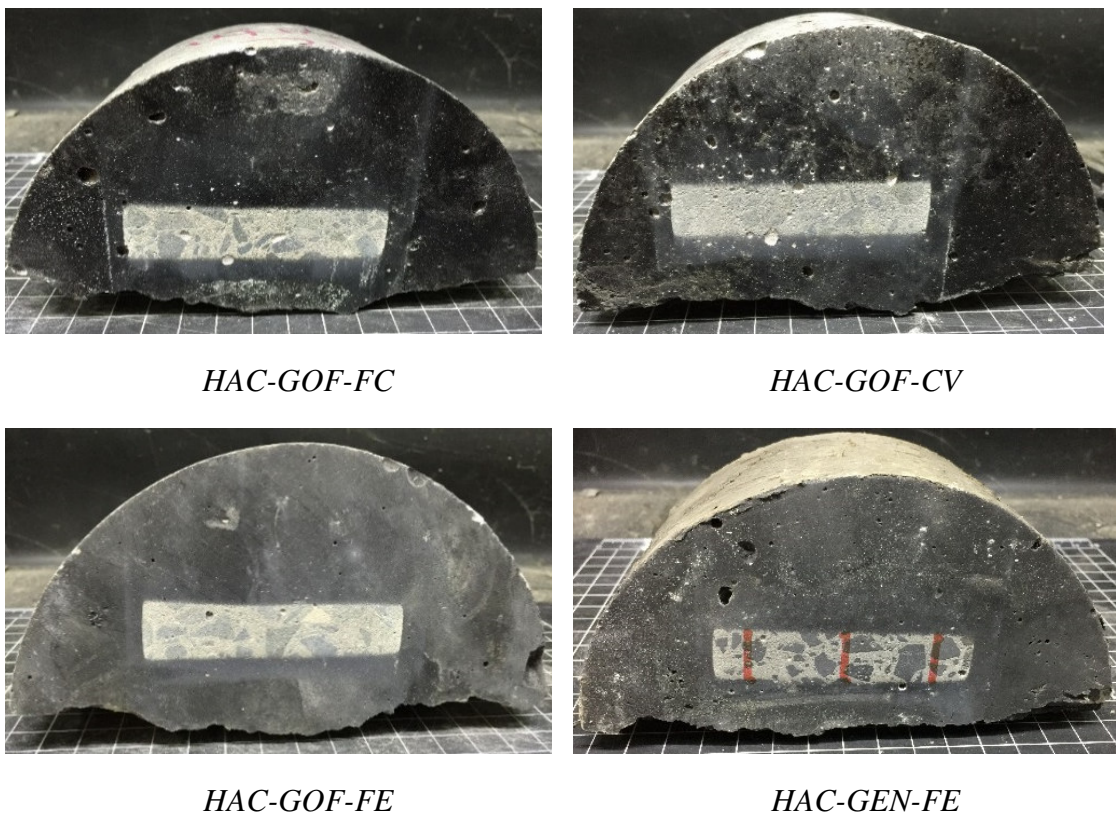


Figura 4.34. Ejemplo de huellas tras el ensayo de abrasión.

4.2.2.4 Durabilidad

En este apartado se presentarán y analizarán las propiedades relativas a la durabilidad de los diferentes hormigones estudiados.

4.2.2.4.1 Retracción del hormigón

En la Figura 4.35, se representa la variación porcentual de longitud de las cuatro dosificaciones, habiéndose obtenido los resultados sobre probetas prismáticas durante 130 días en condiciones óptimas de curado.

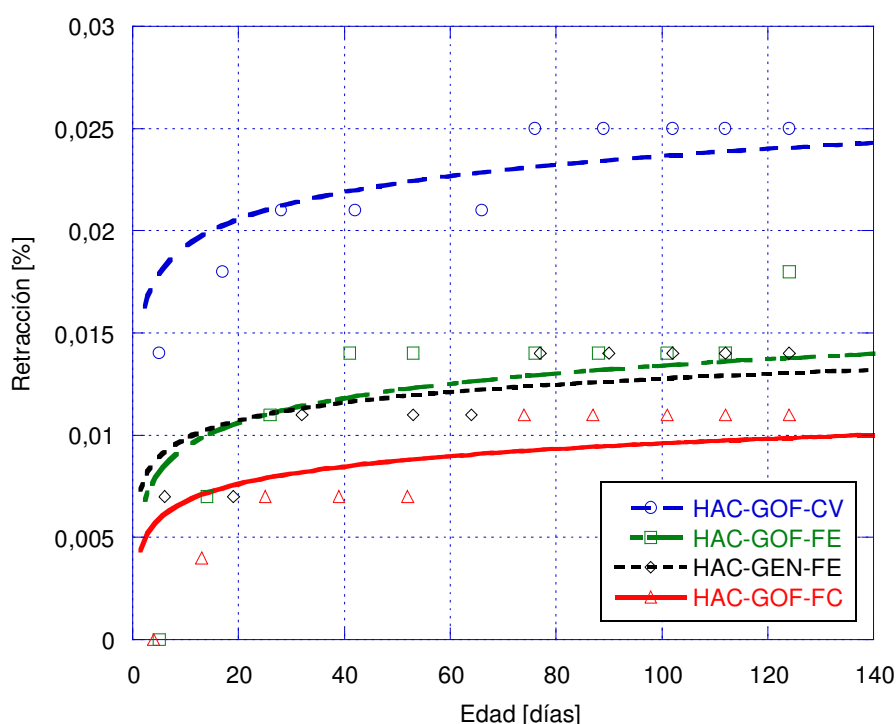


Figura 4.35. Retracción del hormigón durante 130 días.

En la gráfica se puede apreciar que la retracción en todos los casos no supera el 0,025%. La dosificación que experimentó menor retracción ha resultado ser la HAC-GOF-FC tras estabilizar a los 60 días, mientras que, el mayor cambio de longitud, corresponde al HAC-GOF-CV, la dosificación con mayor porosidad accesible. En relación a las mezclas con escoria de cubilote, HAC-GOF-FE y HAC-GEN-FE, la retracción se sitúa en torno a 0,014% en ambos casos, siendo superior a la dosificación de control.

4.2.2.4.2 Ensayo de carbonatación acelerada

En ninguna de las dosificaciones, tras ser expuestas a 90 días, se ha observado frente de carbonatación, tanto en la cara de corte como en la generatriz de los cilindros, como se puede apreciar en la Figura 4.36.



Figura 4.36. Aspecto de la dosificación HAC-GEN-FE sometida a 90 días de exposición de carbonatación acelerada tras aplicar la disolución con fenolftaleína.

En la inspección visual de las muestras, no se aprecia degradación del material puesto que conservan el mismo aspecto que en el momento de la preparación previa al ensayo. En la Figura 4.37 se demuestra que la carbonatación únicamente es superficial, tras haber rociado una pequeña cantidad de disolución viradora en la generatriz de las probetas con escoria de cubilote tras 90 días de exposición en la cámara estanca.



Figura 4.37. Aspecto de la generatriz de las probetas HAC-GEN-FE y HAC-GOF-FE tras 90 días de carbonatación acelerada.

Cabe destacar que la norma UNE-EN 13295 [155] considera presente en la atmósfera un contenido del 1% de CO₂ y que, en la investigación, se ha incrementado este porcentaje hasta un 30% durante el llenado de la cámara y al momento de la renovación los porcentajes se situaban en torno al 5%.

Finalmente, en la Figura 4.38, se muestran las dosificaciones HAC-GOF-FC, HAC-GOF-FE y HAC-GEN-FE tras 90 días de carbonatación acelerada una vez aplicado el virador de fenolftaleína.



Figura 4.38. Aspecto de los hormigones tras la aplicación del virador.

4.2.2.4.3 Permeabilidad al oxígeno

En la Figura 4.39, se recogen los valores medios relativos al coeficiente de permeabilidad al oxígeno de los distintos hormigones confeccionados, determinados a diferentes alturas de las probetas cilíndricas normalizadas y a los 90 días de edad.

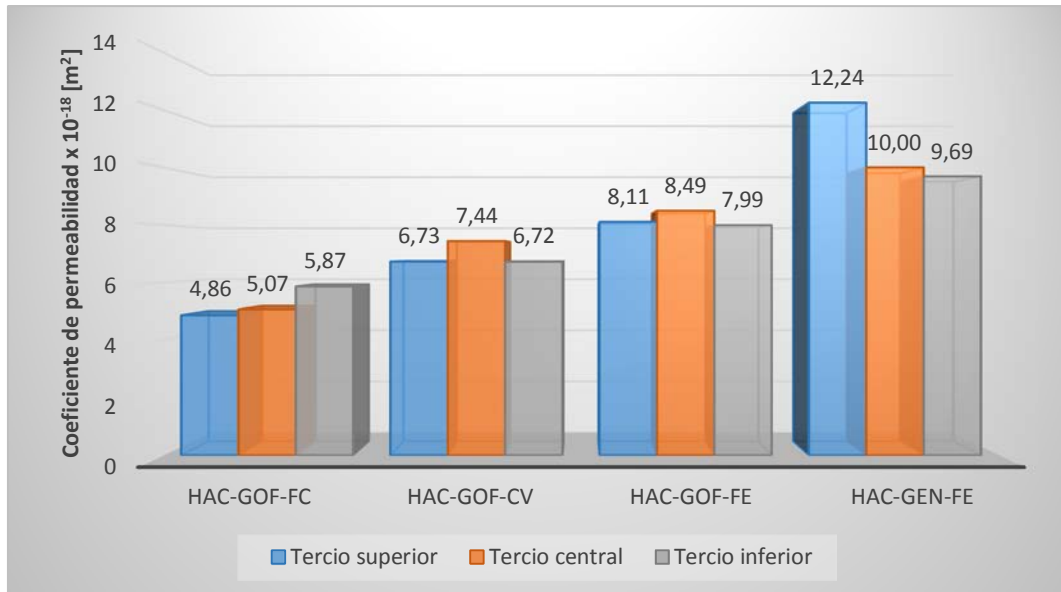


Figura 4.39. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno a los 90 días de edad.

En este caso se puede observar que el hormigón menos permeable corresponde al HAC-GOF-FC seguido, con un ligero incremento, por el HAC-GOF-CV a pesar de su elevada porosidad. Los dos hormigones más permeables han resultado ser los de las dosificaciones con escoria de cubilote HAC-GOF-FE y HAC-GEN-FE.

El incremento asociado a la incorporación de escoria como adición en el hormigón HAC-GOF-FE se asocia a la mayor relación agua/cemento efectiva de la mezcla, mientras que la dosificación HAC-GEN-FE con escoria de horno eléctrico presenta un mayor coeficiente debido al mayor contenido de mortero en volumen respecto a los hormigones con áridos naturales.

Los valores de permeabilidad tienen un orden de magnitud de 10^{-18} m^2 , a excepción del tercio superior del HAC-GEN-FE, lo cual permite catalogarlos como hormigones de baja permeabilidad a los gases. Estos valores corroboran los excelentes resultados frente a la carbonatación acelerada presentados en el apartado anterior.

4.2.2.4.4 Penetración de agua bajo presión

En la Figura 4.40, se presentan los valores medios de penetración máxima de agua bajo presión en los tercios de probetas cilíndricas normalizadas obtenidos tras el ensayo de permeabilidad a los gases.

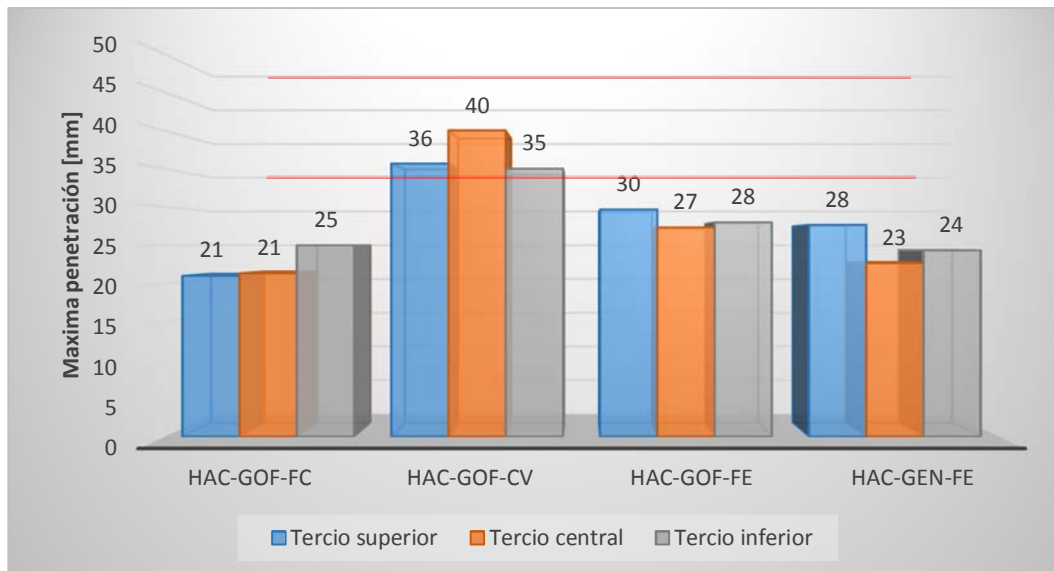


Figura 4.40. Máxima penetración de agua bajo presión de los tercios de probetas cilíndricas.

El hormigón menos permeable al agua ha resultado ser el HAC-GOF-FC mientras que el más permeable y, con gran diferencia, el HAC-GOF-CV. Las dosificaciones con escoria de cubilote, se sitúan en posiciones intermedias, resultando el hormigón con escorias negras el mejor de los dos. Según la EHE-08 [7], todos los hormigones, a excepción del HAC-GOF-CV, se pueden catalogar como suficientemente impermeables puesto que el valor máximo de penetración de agua bajo presión exigido a los hormigones estructurales es de 50 mm y la media de los resultados obtenidos se sitúa en torno a 30 mm, lo cual permite su exposición incluso a ambientes agresivos (clases de exposición tipo IIIa, IIIb y IV). Dichos límites se reflejan en la Figura 4.40 mediante líneas rojas.

4.2.2.4.5 Envejecimiento por choque térmico

En lo que concierne al envejecimiento acelerado mediante ciclos consecutivos de humedad-sequedad, en la Tabla 4.10 se presentan los datos de masa de las probetas, antes y después de someter las mismas a 100 ciclos.

Tabla 4.10. Variación de masa tras los ciclos de humedad-sequedad.

<i>Muestra</i>	<i>Masa inicial [g]</i>	<i>Masa final [g]</i>	<i>Variación [%]</i>
<i>HAC-GOF-FC</i>	308,71	310,22	0,49
<i>HAC-GOF-CV</i>	306,58	309,05	0,81
<i>HAC-GOF-FE</i>	310,62	312,21	0,51
<i>HAC-GEN-FE</i>	362,53	365,34	0,78

Todas las muestras han experimentado un ligero aumento de masa. Este incremento es mayor en las dosificaciones HAC-GOF-CV y HAC-GEN-FE. Este efecto se asocia, en el primer caso, a la mayor porosidad de la pasta y, en el segundo caso, a la porosidad del árido siderúrgico, tomando en consideración que los cubos ensayados presentaban dos caras abiertas resultantes del corte de las probetas prismáticas.

En la Tabla 4.11, se recoge la variación de la velocidad de impulsos ultrasónicos después de someter las probetas a 100 ciclos.

Tabla 4.11. Variación velocidad de impulsos ultrasónicos tras los ciclos de humedad-sequedad.

<i>Muestra</i>	<i>Velocidad de impulsos inicial [km/s]</i>	<i>Velocidad de impulsos final [km/s]</i>	<i>Variación [%]</i>
<i>HAC-GOF-FC</i>	4,89	4,72	-3,47
<i>HAC-GOF-CV</i>	4,79	4,56	-4,83
<i>HAC-GOF-FE</i>	5,01	4,72	-5,79
<i>HAC-GEN-FE</i>	5,03	4,78	-4,97

Los resultados obtenidos indican que el hormigón que mejor ha resistido los ciclos de humedad-sequedad es el HAC-GOC-FC, seguido de los hormigones con adición de escoria de cubilote, mientras que el HAC-GOF-CV es el hormigón más afectado. A pesar de que el descenso de los ultrasonidos es más acusado en algunas dosificaciones, los valores finales son muy próximos en todos los casos y reflejan que el material prácticamente no ha sufrido daño.

A continuación, en la Figura 4.41, se presenta la evolución temporal del descenso de los impulsos ultrasónicos de cada dosificación. Los valores representados corresponden a la media de tres resultados. La disminución de este parámetro refleja el daño que sufre el material en la matriz del hormigón a causa de los choques térmicos.

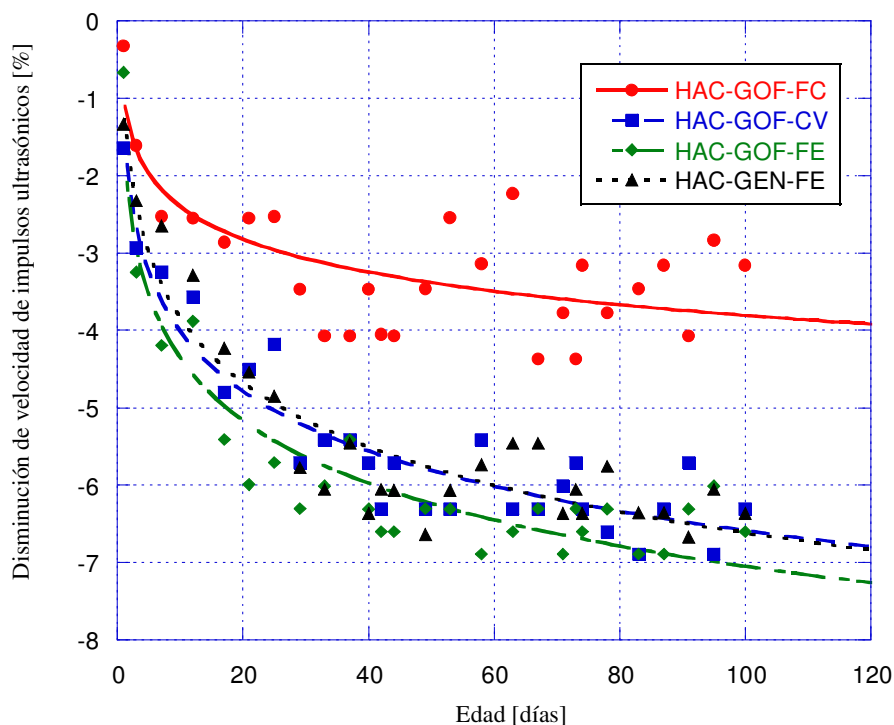


Figura 4.41. Pérdida de velocidad de impulsos ultrasónicos durante los ciclos de humedad-sequedad.

En la Tabla 4.12, se muestra la variación del comportamiento mecánico después de someter las probetas a 100 ciclos.

Tabla 4.12. Variación de la resistencia a compresión tras los ciclos de humedad-sequedad.

<i>Muestra</i>	<i>Tensión de rotura inicial [MPa]</i>	<i>Tensión de rotura final [MPa]</i>	<i>Variación [%]</i>
HAC-GOF-FC	100,1	102,1	0,2
HAC-GOF-CV	101,6	89,47	-11,5
HAC-GOF-FE	108,6	102,9	-5,24
HAC-GEN-FE	130,7	121,5	-7,03

En cuanto al comportamiento mecánico de las tres muestras de cada dosificación sometidas a los ciclos, se observa que el HAC-GOF-FC mantiene sus propiedades mecánicas debido a que no hay pérdida de resistencia de las probetas respecto a las probetas de control. El HAC-GOF-CV experimenta un descenso de las propiedades mecánicas que supera el 10%.

El HAC-GOF-FE presenta un descenso de 5,2% de la resistencia a compresión tras los choques térmicos. Sin embargo, la resistencia a compresión residual sigue siendo superior a la resistencia del hormigón de control.

En el HAC-GEN-FE, la disminución de la resistencia a compresión es del 7%, siendo más acusada que en el resto de los hormigones, a excepción del hormigón con cenizas volantes.

De la Figura 4.42 a la Figura 4.45 se muestra el aspecto de las probetas tras los 100 ciclos de envejecimiento, donde se puede observar que el deterioro exterior es mínimo, siendo más pronunciado en las aristas de los cubos. Adicionalmente, en las caras que estaban en contacto con el molde se han revelado algunos poros que estaban inicialmente recubiertos por una fina capa de pasta. En el caso del árido siderúrgico, se aprecian óxidos de hierro de los restos presentes en las partículas de escoria. Este fenómeno solo se manifiesta en las caras de corte.



Figura 4.42. Aspecto del HAC-GOF-FC tras los ciclos de humedad-sequedad.



Figura 4.43. Aspecto del HAC-GOF-CV tras los ciclos de humedad-sequedad.



Figura 4.44. Aspecto del HAC-GOF-FE tras los ciclos de humedad-sequedad.



Figura 4.45. Aspecto del HAC-GEN-FE tras los ciclos de humedad-sequedad.

4.2.2.4.6 Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo

El envejecimiento acelerado mediante ciclos de hielo-deshielo de probetas cúbicas de lado 50 mm, se ha realizado de manera muy agresiva con fines comparativos. En este caso, ha sido necesario definir un criterio de desintegración. Cuando las probetas ensayadas dejaban de ser viables en un ensayo de resistencia a compresión por pérdida de su forma cúbica, se consideraron desintegradas. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Número de ciclos hasta desintegración.

	<i>HAC-GOF-FC</i>	<i>HAC-GOF-CV</i>	<i>HAC-GOF-FE</i>	<i>HAC-GEN-FE</i>
Ciclos	7	>21	11	21

De los tres hormigones con áridos naturales, el más resistente ha resultado ser el HAC-GOF-CV. En cambio, el más afectado ha sido el HAC-GOF-FC, mostrando una respuesta diferente en comparación con el comportamiento frente a los ciclos de humedad-sequedad, presentados en el apartado anterior. En cuanto a los hormigones con escoria de cubilote, el HAC-GOF-FE ha resultado ser cuatro ciclos más resistente que el HAC-GOF-FC, mientras que, el HAC-GEN-FE ha resistido un número muy superior de ciclos con un grado de deterioro similar al HAC-GOF-CV.

A continuación, de la Figura 4.46 a la Figura 4.49, se presenta el aspecto de las muestras antes de ser sometidas a los ciclos de hielo-deshielo:

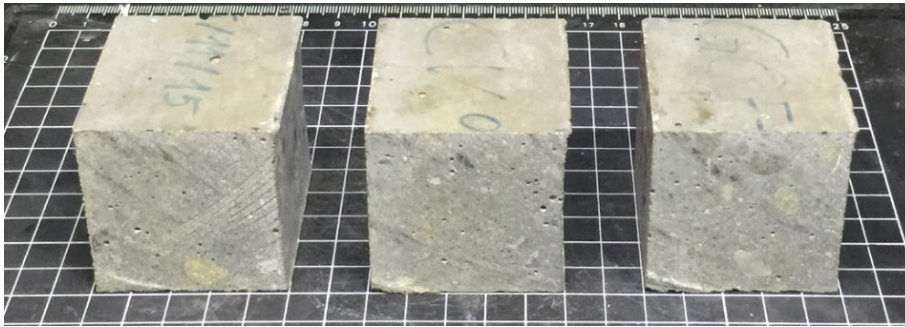


Figura 4.46. Aspecto del HAC-GOF-FC antes de los ciclos de hielo-deshielo.



Figura 4.47. Aspecto del HAC-GOF-CV antes de los ciclos de hielo-deshielo.



Figura 4.48. Aspecto del HAC-GOF-FE antes de los ciclos de hielo-deshielo.



Figura 4.49. Aspecto del HAC-GEN-FE antes de los ciclos de hielo-deshielo.

A continuación, de la Figura 4.50 a la Figura 4.53, se presenta la degradación de las muestras con el paso de los ciclos. Las instantáneas se han obtenido tras 5 ciclos.



Figura 4.50. *Aspecto del HAC-GOF-FC tras 5 ciclos de hielo-deshielo.*



Figura 4.51. *Aspecto del HAC-GOF-CV tras 5 ciclos de hielo-deshielo.*



Figura 4.52. *Aspecto del HAC-GOF-FE tras 5 ciclos de hielo-deshielo.*



Figura 4.53. *Aspecto del HAC-GEN-FE tras 5 ciclos de hielo-deshielo.*

Como se refleja en la Tabla 4.13, al cabo de 7 ciclos las tres probetas de HAC-GOF-FC se desintegraron, dándose por finalizada su exposición a los ciclos. En la Figura 4.54 se muestra el aspecto de los fragmentos remanentes.



Figura 4.54. *Aspecto del HAC-GOF-FC tras 7 ciclos de hielo-deshielo.*

A continuación, de la Figura 4.55 a la Figura 4.57, se aprecia el aspecto del resto de muestras tras ser sometidas a 10 ciclos de hielo-deshielo:



Figura 4.55. *Aspecto del HAC-GOF-CV tras 10 ciclos de hielo-deshielo.*



Figura 4.56. *Aspecto del HAC-GOF-FE tras 10 ciclos de hielo-deshielo.*

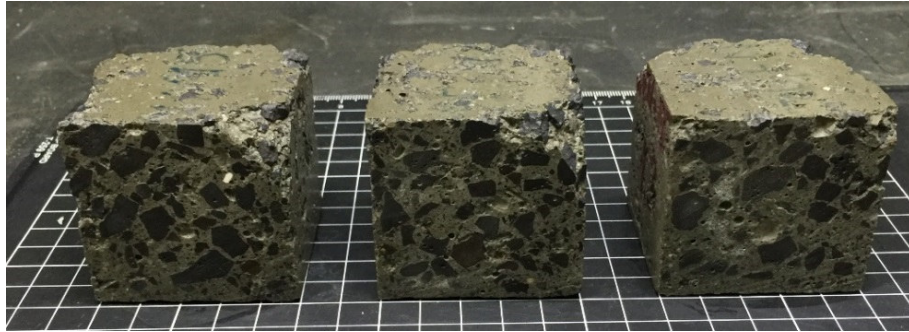


Figura 4.57. Aspecto del HAC-GEN-FE tras 10 ciclos de hielo-deshielo.

Transcurrido 11 ciclos, una de las probetas de la dosificación HAC-GOF-FE quedó desintegrada, dándose por finalizada la secuencia de ciclos para esta dosificación. En la Figura 4.58 se muestra el aspecto de las probetas.

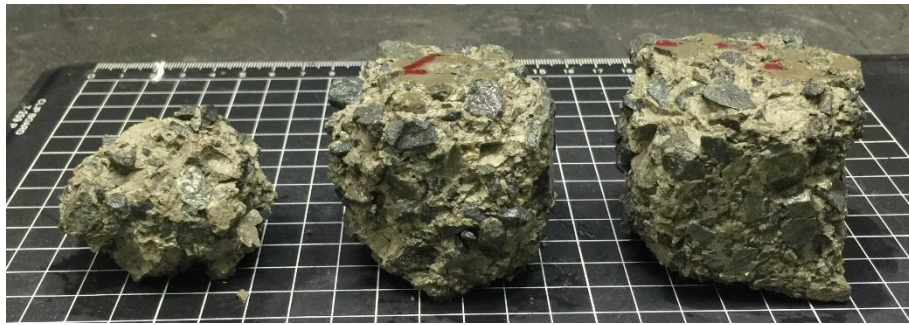


Figura 4.58. Aspecto del HAC-GOF-FE tras 11 ciclos de hielo-deshielo.

A continuación, en las Figura 4.59 y Figura 4.60, se aprecia la apariencia de las muestras remanentes tras ser sometidas a 15 ciclos de hielo-deshielo:



Figura 4.59. Aspecto del HAC-GOF-CV tras 15 ciclos de hielo-deshielo.

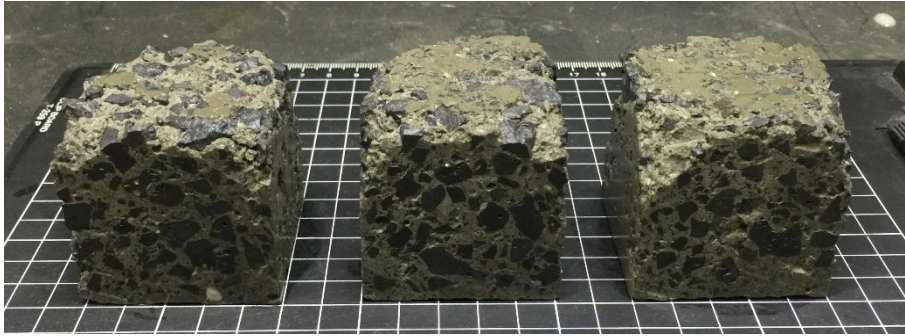


Figura 4.60. Aspecto del HAC-GEN-FE tras 15 ciclos de hielo-deshielo.

Finalmente, tras 21 ciclos se observó que el grado de deterioro que presentaban las dosificaciones HAC-GOF-CV y HAC-GEN-FE era suficiente para finalizar los ciclos, Figura 4.61 y Figura 4.62. El daño de los hormigones era más pronunciado en las probetas de HAC-GEN-FE. A continuación, se presenta el aspecto de las muestras al finalizar el ensayo.



Figura 4.61. Aspecto del HAC-GOF-CV tras 21 ciclos de hielo-deshielo.



Figura 4.62. Aspecto del HAC-GEN-FE tras 21 ciclos de hielo-deshielo.

4.2.2.4.7 Protección frente a la corrosión en ambiente marino

En la Figura 4.63 se muestra el aspecto de las probetas tras la exposición continuada al ambiente marino y a la carrera de mareas durante 10 meses.



Figura 4.63. Exterior de las probetas cónicas HAC-GOF-FC, HAC-GOF-FE, HAC-GOF-CV y HAC-GEN-FE tras la exposición al contacto con agua de mar.

Se puede constatar la ausencia de patologías en el exterior de los troncos de cono como desconches o pérdida de material, mientras que, en la Figura 4.64, se aprecia el estado intacto de las barras en el interior de los hormigones tras realizar un corte longitudinal en las probetas. La exposición directa al agua de mar no ha afectado negativamente a las barras de acero embebidas, no habiéndose observado deterioro. Cabe destacar que en la zona más estrecha de las probetas, el espesor mínimo de recubrimiento es de 10 mm.

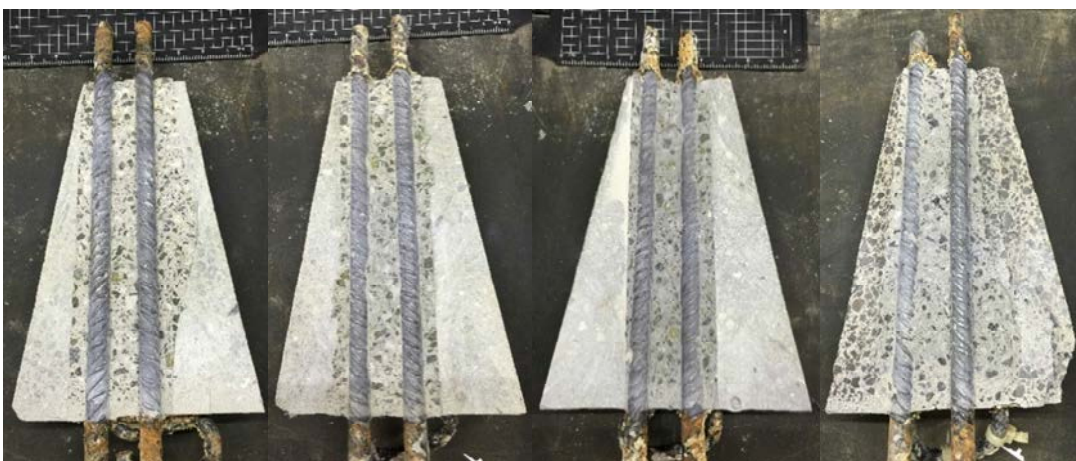


Figura 4.64. Interior de las probetas troncocónicas HAC-GOF-FC, HAC-GOF-CV, HAC-GOF-FE y HAC-GEN-FE tras la exposición al agua de mar.

De la Figura 4.65 a la Figura 4.69 se muestra en detalle el aspecto de las barras de acero en el extremo más estrecho de las probetas cónicas. En algunos casos, se observan picaduras en las barras, ocasionadas por la penetración de agua de mar por la parte superior de la probeta como consecuencia de la pérdida de la pintura impermeabilizante aplicada.



Figura 4.65. Aspecto del HAC-GOF-FC y de las barras tras la exposición a la carrera de mareas.



Figura 4.66. Aspecto del HAC-GOF-CV y de las barras tras la exposición a la carrera de mareas.



Figura 4.67. Aspecto del HAC-GOF-FE y de las barras tras la exposición a la carrera de mareas.



Figura 4.68. Aspecto del HAC-GEN-FE y una de las barras tras la exposición a la carrera de mareas.

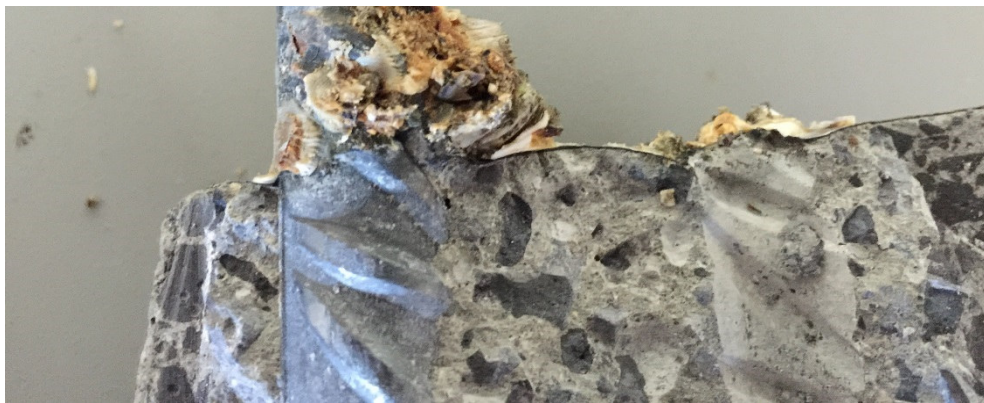


Figura 4.69. Aspecto del HAC-GEN-FE y otra de las barras tras la exposición a la carrera de mareas.

Debido al aspecto de las barras de acero en el interior del hormigón, únicamente se procedió a realizar el corte en el extremo de menor diámetro del cono para determinar la penetración del ion cloruro en un microscopio electrónico de barrido.

En la Figura 4.70 se presenta la concentración de cloruro de los hormigones obtenidos mediante microanálisis realizados desde la generatriz hacia la zona donde se alojaban las barras de acero.

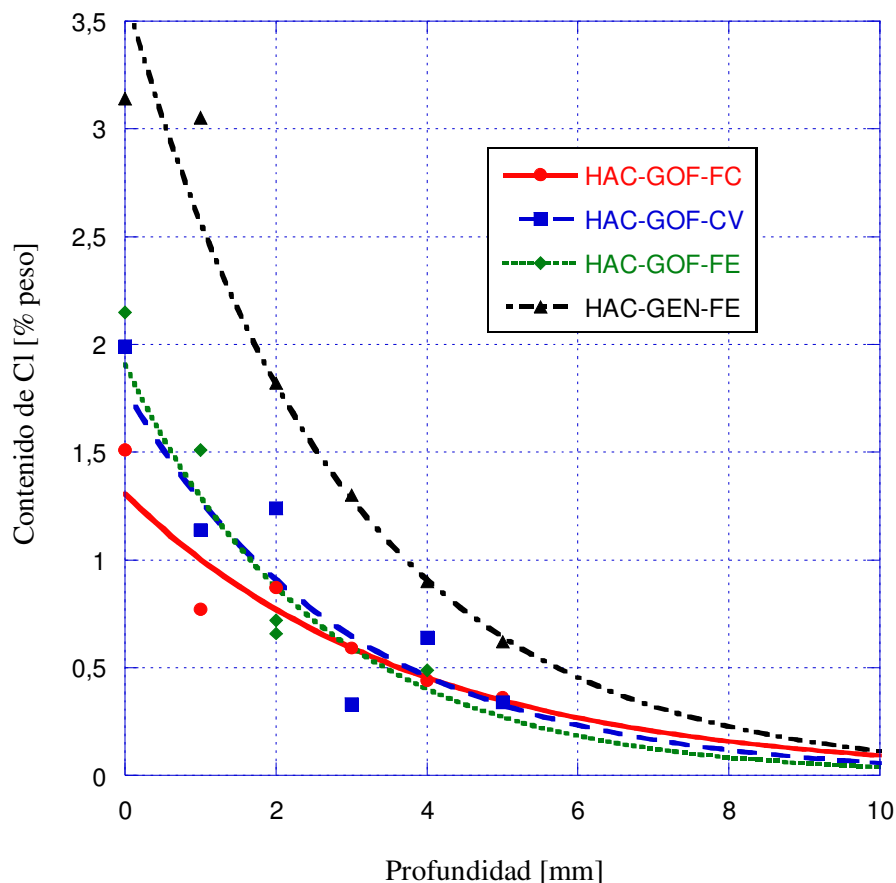


Figura 4.70. Penetración de cloro en los hormigones.

En la Figura 4.70 se observa que la mayor concentración se encuentra en la superficie. De todas las muestras, el HAC-GEN-FE presenta una concentración de cloruros muy superior, mientras que, las muestras confeccionadas con áridos naturales, a pesar de contener distintas adiciones, presentan un contenido muy similar de cloruros. Estos resultados concuerdan con los coeficientes de permeabilidad al oxígeno, pudiendo asumir que la difusión se realiza a través de los capilares.

En todos los casos analizados se aprecia que, a partir de los 6 mm, la concentración del ion Cl^- , es inferior al 0,3% lo cual se sitúa en el límite de la capacidad de detección del microscopio electrónico de barrido para este elemento. Estos resultados son notablemente inferiores a los reportados por C. Medina et al. para un HVC con áridos reciclados [156].

Como complemento a los análisis, se determinó el frente de carbonatación de los hormigones con adición de escoria de cubilote, Figura 4.71.



Figura 4.71. Detalle del frente de carbonatación de las probetas HAC-GOF-FE y HAC-GEN-FE expuestas al agua de mar durante 10 meses.

Al igual que el ensayo de carbonatación acelerada por exposición a CO_2 , la profundidad de carbonatación en las muestras expuestas a la intemperie en el puerto de Bilbao ha sido nula. Este resultado señala que la carbonatación ocurre a un ritmo menor que la penetración de cloruros.

4.2.2.5 Caracterización microestructural

En el presente apartado, se presentan micrografías de todos los hormigones autocompactantes realizadas en un microscopio electrónico de barrido tras 90 días de curado.

Para comparar la microestructura de las cuatro dosificaciones analizadas, en las siguientes figuras se presentan micrografías de las pastas en el contorno de un árido grueso, realizadas con 100, 500, 1000, 5000 y 10000 aumentos.

En la Figura 4.72, se observan las pastas a pocos aumentos. La elevada resistencia del hormigón es coherente con las microestructuras cerradas que han podido observarse. En la pasta del HAC-GOF-CV, se distinguen, perfectamente, las cenizas volantes del resto de componentes.

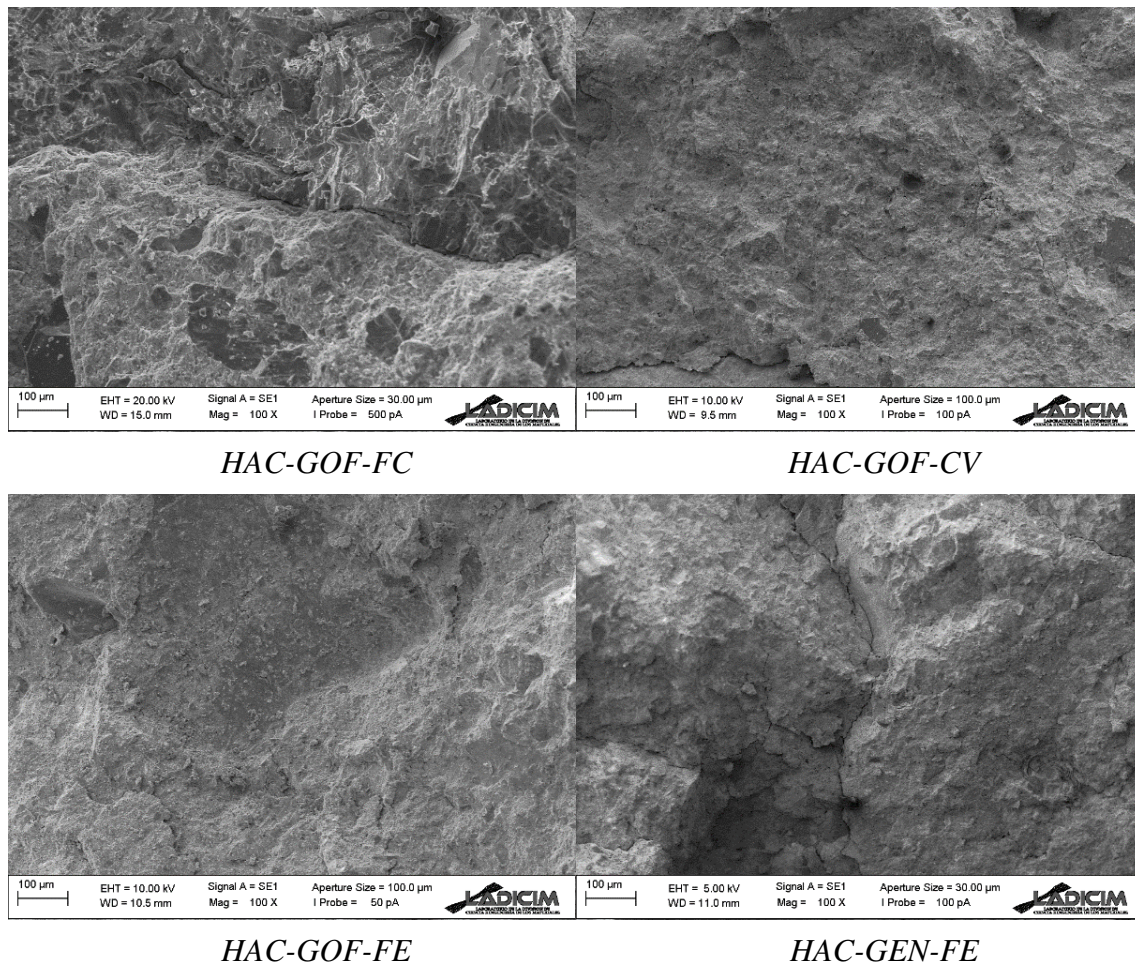


Figura 4.72. Micrografías obtenidas a 100x.

En la Figura 4.73, se observa que, a mayor número de aumentos, las pastas mantienen un aspecto muy denso, con baja microporosidad. En dicha Figura, se aprecia una buena adherencia entre la pasta y el árido del HAC-GOF-FE, que permite la transmisión de esfuerzos sin que ocurra su separación. En el HAC-GOF-CV se puede apreciar una ceniza volante perfectamente integrada, con el conocido aspecto vacuolar característico de este material.

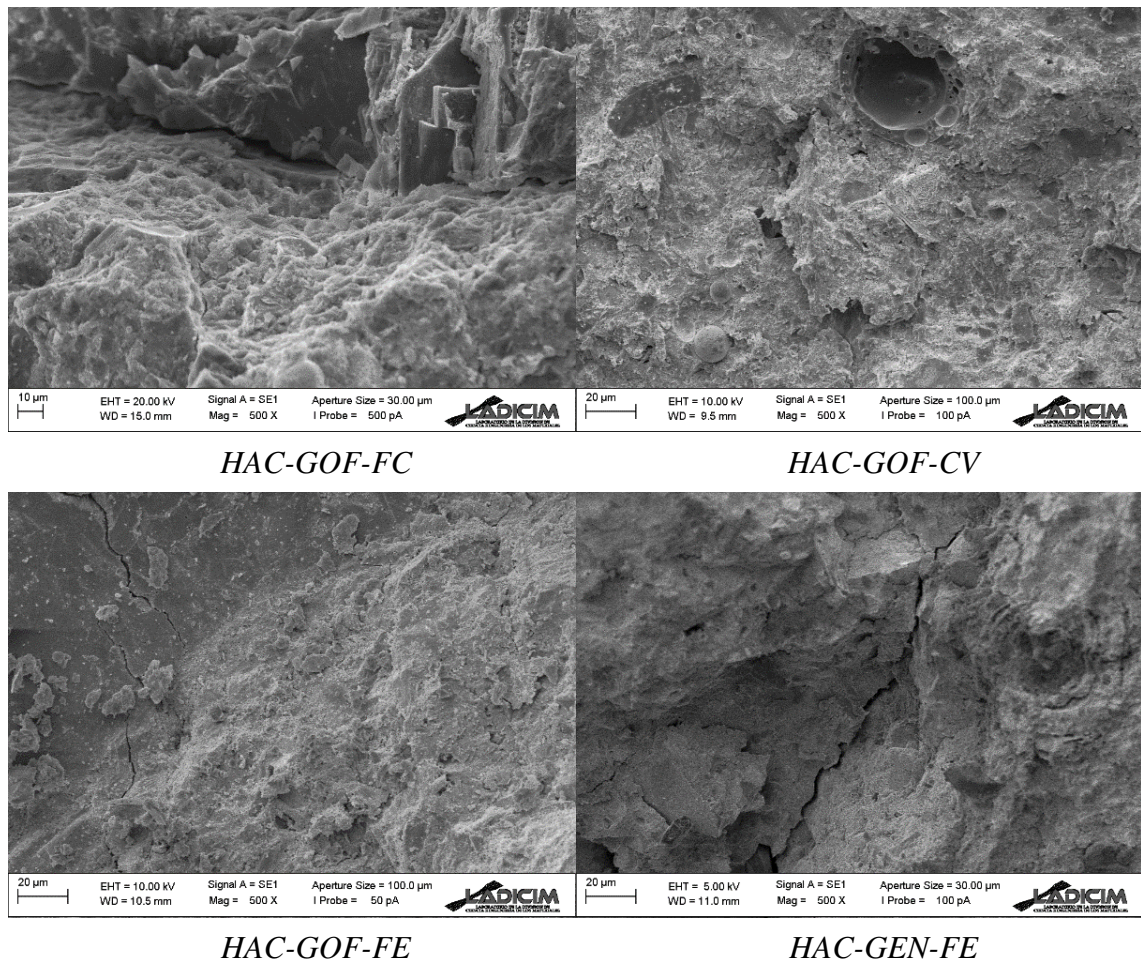


Figura 4.73. Micrografías obtenidas a 500x.

A 1000 aumentos, en la Figura 4.74, se pueden detectar las microporosidades de las pastas, siendo mayores en el HAC-GEN-FE, lo que concuerda con el mayor coeficiente de permeabilidad al oxígeno obtenido.

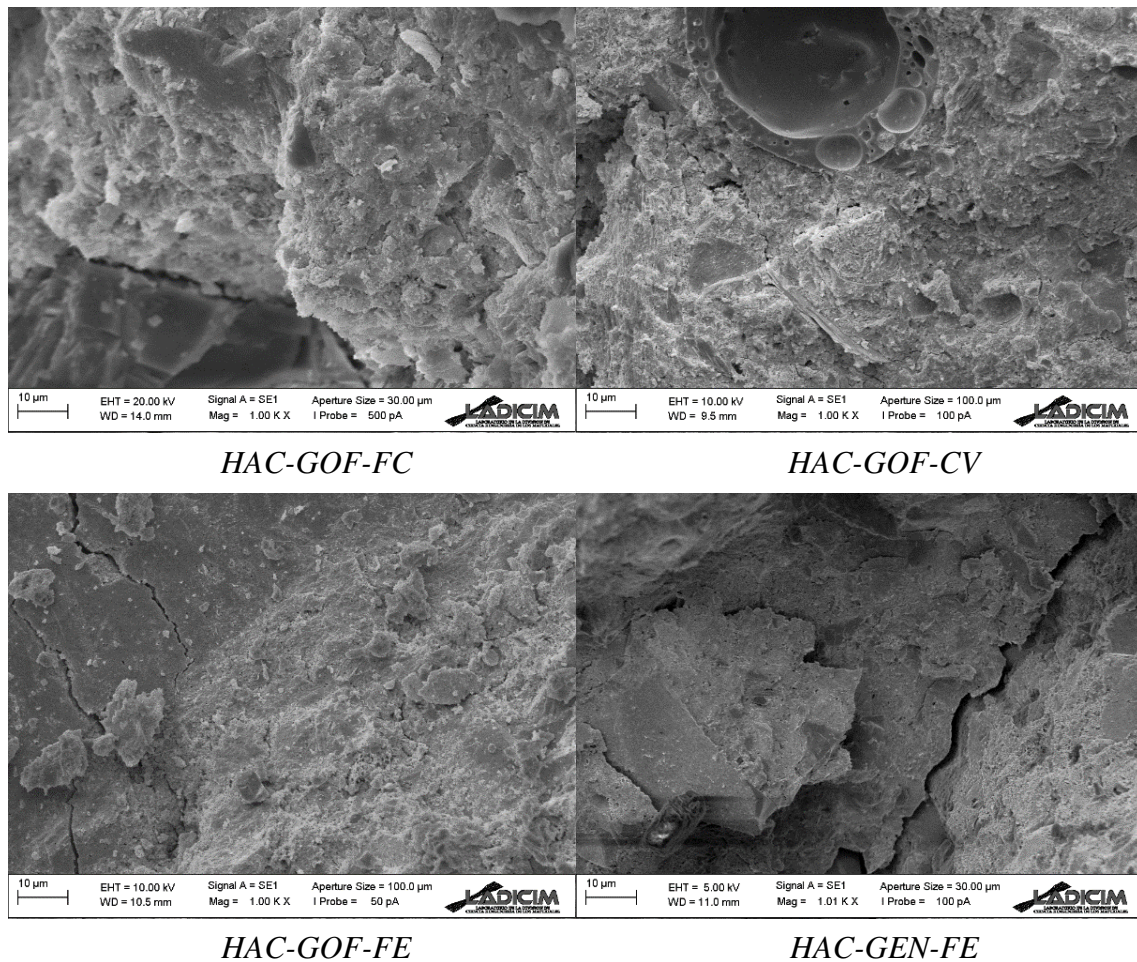


Figura 4.74. Micrografías obtenidas a 1000x.

En la Figura 4.75, a una mayor magnificación, 5000x, se observa que las pastas endurecidas de los cuatro hormigones presentan una excelente densificación, en donde las reacciones de hidratación y, en su caso, las puzolánicas han generado una microestructura masiva y compacta, lo que hace muy difícil distinguir las distintas morfologías cristalinas típicas de los CSH y demás productos hidratados.

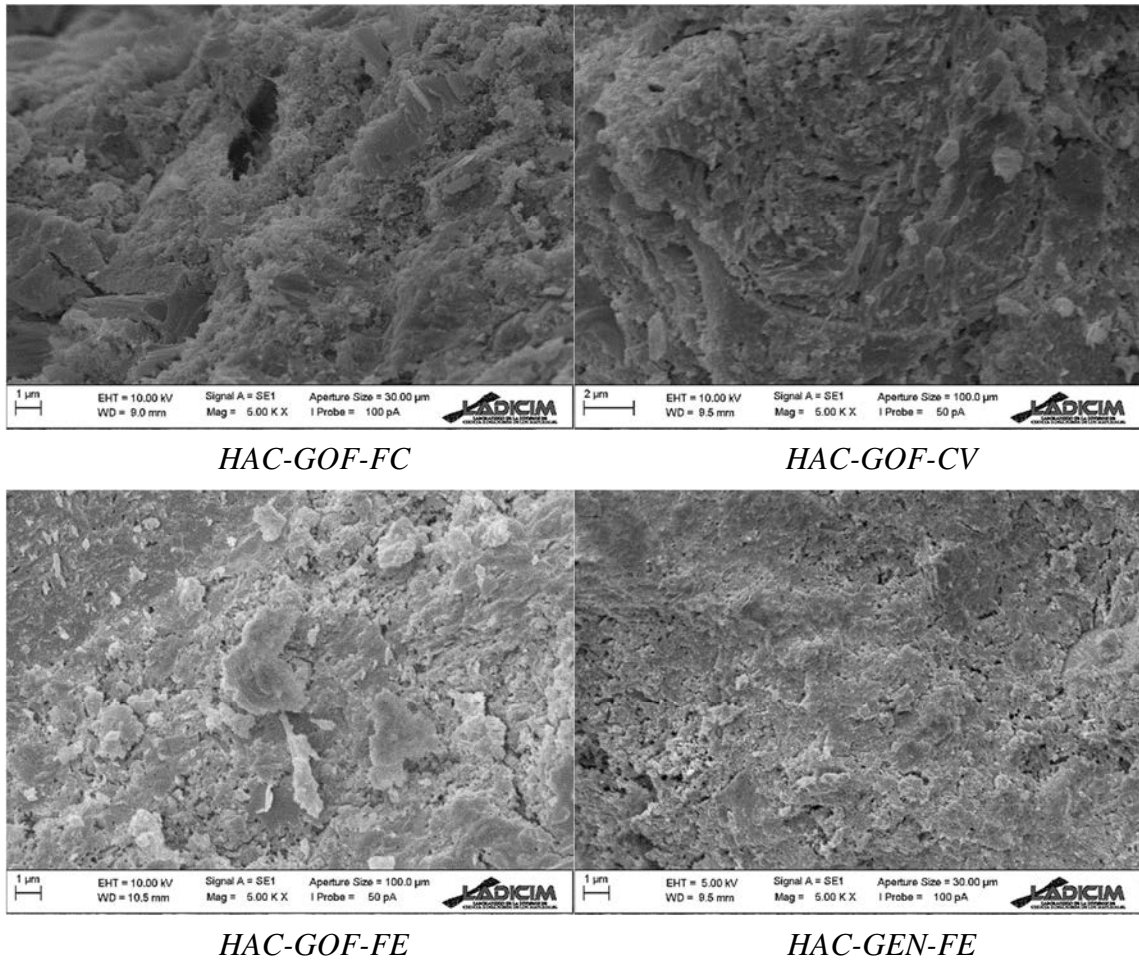


Figura 4.75. Micrografías obtenidas a 5000x.

En la Figura 4.76, a 10000 aumentos, se aprecia la distribución de los microporos de las pastas y la masificación ya comentada. Lo más destacable es que no es posible diferenciarlas desde el punto de vista morfológico, lo que indica que las adiciones activas incorporadas en cada dosificación han desarrollado su reactividad y han contribuido con productos de hidratación semejantes a los generados por el cemento portland. Ello justifica los elevados resultados obtenidos en las resistencias mecánicas de las mezclas diseñadas.

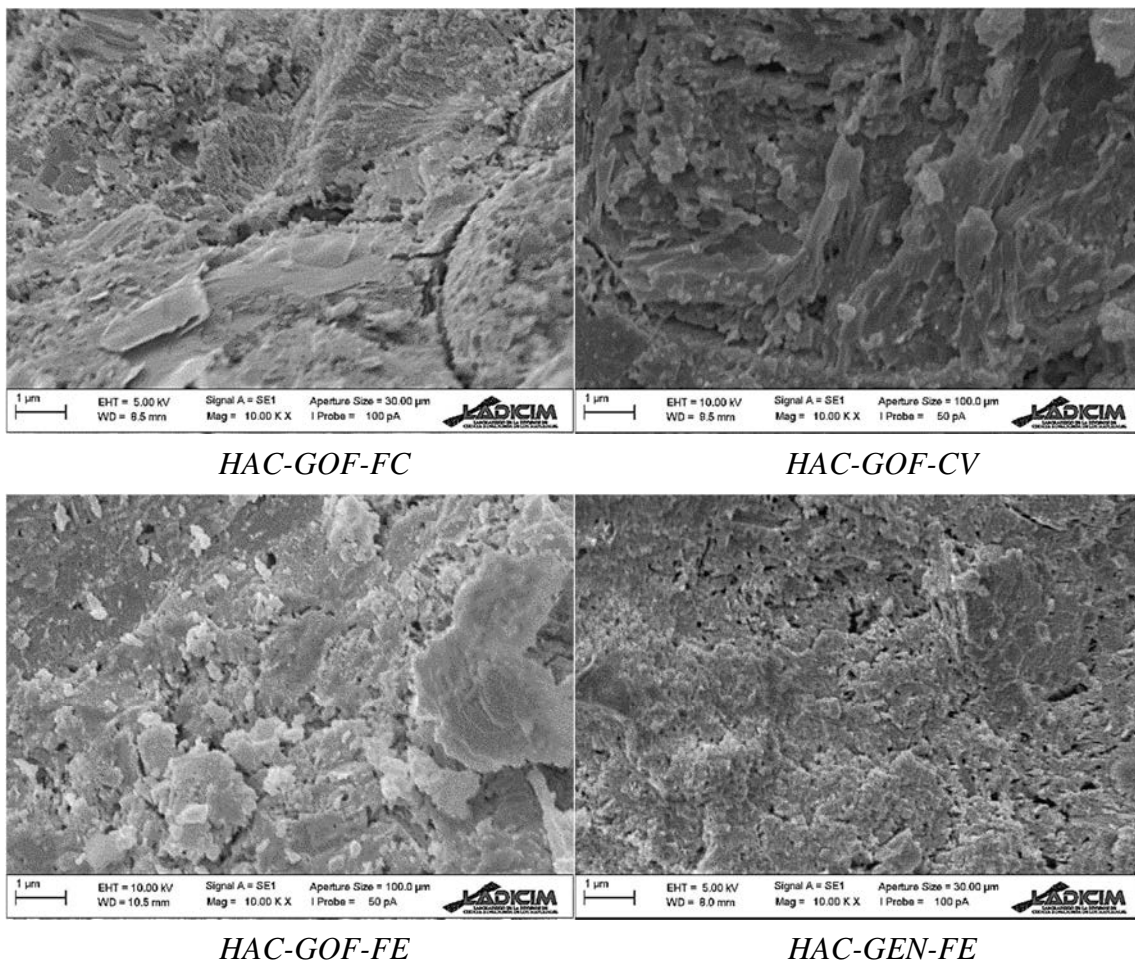


Figura 4.76. Micrografías obtenidas a 10000x.

Con la finalidad de identificar la reactividad de la escoria de cubilote al combinarse con los productos de hidratación del cemento, se han obtenido imágenes de algunas partículas tras reaccionar en el mortero con mayor porcentaje de sustitución de escoria de cubilote por cemento (Figura 4.77 A, B y C). En las micrografías se aprecia como las partículas de filler de escoria se disuelven durante su fusión en la pasta.

En el caso del hormigón, ha sido necesario detectar la reacción en el entorno de un poro, donde hay espacio suficiente para que se generen los productos libremente, Figura 4.77 D. Se han podido vislumbrar la transformación del material valorizado en nuevos componentes con forma de escamas paralelas, perfectamente integradas en la pasta y en combinación con los productos de hidratación del cemento.

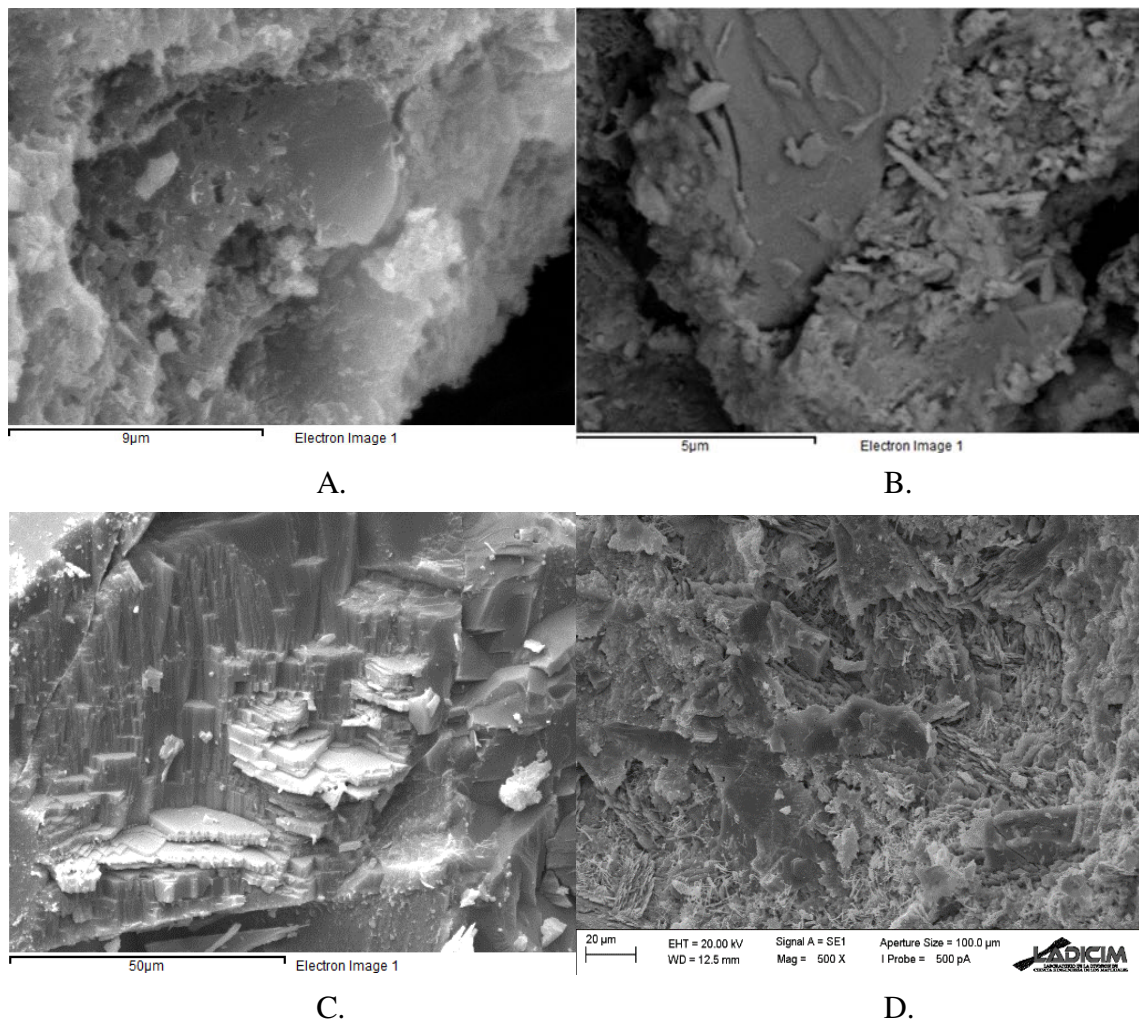


Figura 4.77. Micrografías adicionales del HAC-GOF-FE.

El aspecto de la escoria de cubilote tras reaccionar a mayor número de aumentos, Figura 4.78 y Figura 4.79, presenta escamas hexagonales ordenadas en planos paralelos, cuya composición corresponde a aluminosilicatos cálcicos hidratados.

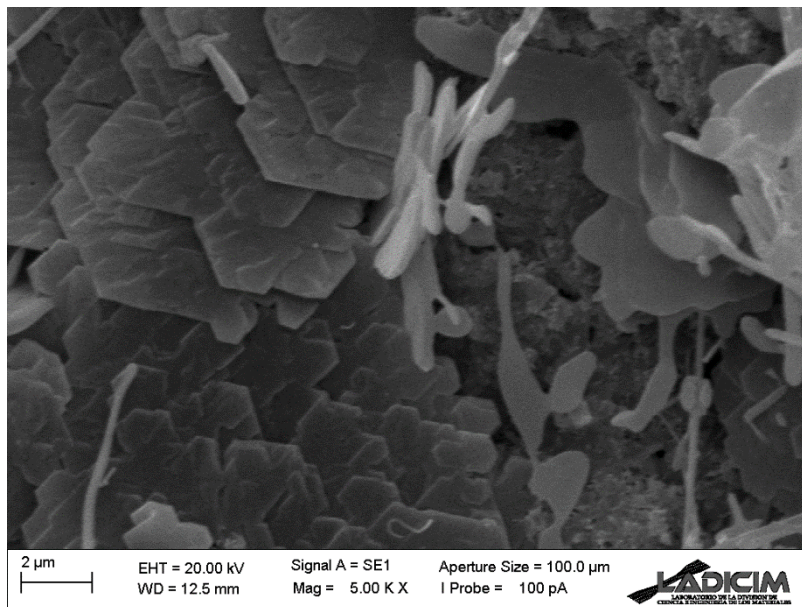


Figura 4.78. Apariencia de la escoria de cubilote tras reaccionar en la pasta de cemento a 5000 aumentos.

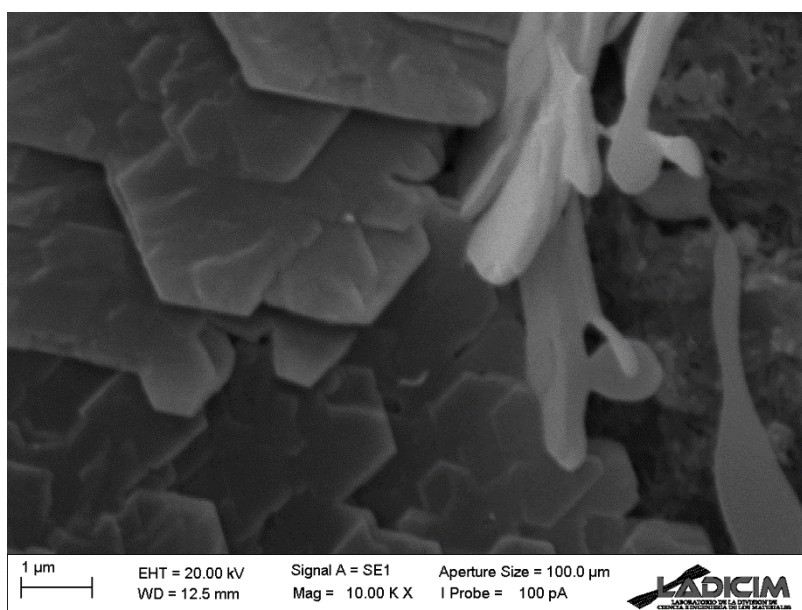


Figura 4.79. Apariencia de la escoria de cubilote tras reaccionar en la pasta de cemento a 10000 aumentos.

Capítulo 5 Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este capítulo se destacan las conclusiones derivadas del estudio realizado, basado en el diseño y la caracterización de hormigones autocompactantes que incorporan residuos siderúrgicos en su composición. También, y para finalizar, se proponen una serie de tareas que pueden complementar el camino iniciado en esta investigación.

5.1 Conclusiones

En esta Tesis Doctoral queda demostrada la aptitud de la incorporación de escorias valorizadas, derivadas de la etapa de fusión de distintos procesos industriales, en la fabricación de hormigones autocompactantes de altas prestaciones. Se ha conseguido sustituir los componentes naturales, cumpliendo el objetivo propuesto satisfactoriamente. Los resultados experimentales demuestran que es viable confeccionar hormigones de altas prestaciones con características adecuadas en estado fresco y endurecido.

Del estudio de la escoria de horno eléctrico de arco, se derivan las siguientes observaciones:

- La composición química corresponde, mayoritariamente, a óxidos de hierro, calcio y silicio, mientras que, en menor proporción, a óxidos de magnesio y manganeso. En la superficie de las partículas se detectó un contenido elevado de calcio asociado al carbonato cálcico generado en los procesos de carbonatación. Aleatoriamente, en el interior de las partículas, se observaron pequeños restos de hierro metálico no diluidos en la colada.
- La escoria de horno eléctrico de arco empleada cumple con los requisitos medioambientales exigidos en la normativa, si bien, el contenido de cromo detectado en los lixiviados se sitúa próximo al límite permitido.
- La distribución granulométrica de la fracción fina, está fuera del huso granulométrico establecido por la EHE-08. Esto requiere un ajuste mediante la incorporación de partículas más finas y de otra naturaleza.
- La escoria negra presenta una elevada densidad, superior a 3 g/cm^3 , y un coeficiente de absorción del 4%. Destaca, igualmente, su comportamiento mecánico: alta resistencia a la fragmentación (Coeficiente Los Ángeles = 15) y a los esfuerzos a compresión (Índice de Machacabilidad =12).

Del estudio de la escoria de cubilote se extraen las siguientes consideraciones:

- La composición química de la escoria corresponde, mayoritariamente, a óxidos de silicio, calcio y aluminio, mientras que, en menor medida, a óxidos de hierro y magnesio. Durante el desescoriado, el rápido enfriamiento vitrifica el material y le confiere una estructura amorfa.

- La escoria de cubilote empleada cumple con las exigencias estipuladas en la normativa medioambiental.
- La molienda practicada al material ha permitido obtener partículas de tamaño inferior a 100 μm , equiparables a las de las adiciones convencionales que han servido de comparación.
- El filler de escoria origina un efecto ligeramente plastificante, lo que permite reducir la relación agua/cemento para mantener una misma consistencia.
- La escoria de cubilote molida ha desarrollado actividad puzolánica, manifestándose la misma a partir de los 28 días de edad.

Conclusiones relativas a los hormigones autocompactantes en estado fresco:

- La alta densidad de la escoria de horno eléctrico de arco demanda una pasta de elevada viscosidad que sea capaz de mantener las partículas en suspensión. Dicha viscosidad se consigue incorporando filler a las mezclas.
- La morfología cavernosa de las escorias negras hace que las mezclas sean más sensibles al contenido de agua. Igualmente, la mayor rugosidad superficial asociada a dicha morfología, asegura una buena adherencia pasta-árido.
- El árido de escoria negra disminuye la velocidad de flujo para valores de escurrimiento iguales en comparación con un hormigón con árido natural. En el ensayo en la caja en L, el tiempo necesario para completar el paso se duplica para el caso del hormigón HAC-GEN-FE.

- A pesar de cumplir con los otros ensayos en estado fresco, los hormigones confeccionados no cumplen con los valores recogidos en la bibliografía para la prueba del embudo en V. Estos resultados se justifican por la elevada relación árido grueso/mortero necesaria para obtener las altas resistencias propuestas.

Conclusiones relativas a los hormigones autocompactantes en estado endurecido:

- **Aspecto**

- El filler de escoria de cubilote proporciona un magnífico acabado superficial. Su incorporación requiere ajustar el contenido de agua para evitar riesgos de segregación.

- **Propiedades físicas**

- La incorporación de la fracción fina y gruesa de escoria negra genera un incremento superior al 15% de densidad respecto a los hormigones confeccionados con árido ofítico. Según la EHE-08, reciben la calificación de hormigones pesados ($\rho > 2800 \text{ kg/m}^3$).
- Todas las mezclas diseñadas, a excepción de la que incorpora cenizas volantes, presentan valores de porosidad accesible inferiores al 8%. Se ha detectado cierta reactividad entre la ceniza volante y el aditivo superplastificante que genera un efecto gasificante, lo cual ha repercutido en la abundante presencia de porosidad en los hormigones dosificados con ambos productos.
- El alto contenido de cemento de rápido endurecimiento junto con el empleo de una relación agua/cemento baja ha originado, en todos los hormigones, la gelificación por tixotropía de la pasta, siendo más acusado este fenómeno en el hormigón con escoria negras.

- **Propiedades mecánicas:**

- La incorporación de escoria de cubilote como adición en el hormigón mejora el comportamiento a compresión, permitiendo superar la barrera de 100 MPa de resistencia a los 28 días. Es necesario esperar hasta los 90 días para superar este requisito cuando se utiliza filler calizo o cenizas volantes.
- El árido de escoria negra permite alcanzar resistencias a compresión superiores a 120 MPa a los 90 días y genera hormigones con un módulo de elasticidad en el entorno de los 50 GPa.
- Las escorias siderúrgicas mejoran la evolución de la resistencia a compresión frente al árido natural. Su incorporación ha permitido superar a los 28 días los 100 MPa y a 90 días los 120 MPa lo que corresponde a 20% y 25% mayor respecto al hormigón con árido natural y filler calizo.
- La resistencia a tracción indirecta no ha resultado proporcional al comportamiento a compresión, manteniendo valores similares en todos los hormigones analizados.
- Todos los hormigones presentan un magnífico comportamiento frente al desgaste, destacando, sobre el resto, el que incorpora escorias siderúrgicas.

- **Durabilidad:**

- Los hormigones confeccionados han registrado valores de retracción muy pequeños siendo inferiores a 0,03% tras 130 días de curado.
- La máxima penetración de agua bajo presión del hormigón con escorias siderúrgicas ha resultado en torno a los 30 mm, siendo similar al hormigón con árido de naturaleza ofítica.

- El hormigón con escorias ha registrado el mayor coeficiente de permeabilidad al oxígeno, si bien, los valores obtenidos lo clasifican dentro de la categoría de hormigón impermeable.
 - La exposición a 100 ciclos de humedad-sequedad no afecta a las mezclas estudiadas. El hormigón con escorias siderúrgicas, a pesar de perder un 7% de resistencia, supera los 120 MPa.
 - Solamente el hormigón con cenizas volantes y el que utiliza escoria negra como árido han superado 20 ciclos de hielo-deshielo. Se ha observado una desintegración manifiesta en las otras dosificaciones antes de alcanzar los 10 ciclos.
 - La exposición al agua de mar y a la carrera de mareas durante 10 meses no ha afectado la estética, ni ha llegado a corroer las armaduras de acero embebidas en el hormigón. La concentración de cloruros en todos los casos es muy pequeña a partir de los 6 mm de profundidad.
- **Microestructura**
 - El elevado contenido de finos y la baja relación agua/cemento proporcionan mezclas con una microestructura muy compacta, dificultando discernir los distintos productos de hidratación de los hormigones incluso a gran número de aumentos en el microscopio electrónico de barrido.
 - Se ha podido corroborar la reactividad de la escoria de cubilote formando parte de los productos hidratados. La transformación ocurre tras consumirse y fusionarse en la pasta, formando estructuras definidas por capas paralelas en forma de escamas hexagonales compuestas mayoritariamente por Ca, Si y Al.

5.2 Futuras líneas de investigación

Desde un punto de vista ingenieril y sostenible, se proponen las siguientes líneas de investigación enmarcadas en el aprovechamiento de algunos de los residuos generados en el entorno más próximo, con el propósito de fomentar su normalización, incrementar la confianza y su utilización en el sector de la construcción:

- Evaluar la viabilidad del uso de la escoria de cubilote como adición al cemento portland.
- Desarrollo de productos cementantes alcalinos, empleando la escoria de cubilote como aglomerante.
- Estudio de la viabilidad de introducir nuevas etapas de trituración en el proceso de obtención de las distintas fracciones de escoria negra, con el fin de mejorar su huso granulométrico, especialmente el de las arenas.
- Desarrollo de hormigones autocompactantes con escorias de horno eléctrico como árido grueso, escoria de cuchara como árido fino y escoria de cubilote como adición, con bajos contenidos de cemento.

Capítulo 6 Bibliografía

- [1] Directiva 2008/98/CE, Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos,.
- [2] Ley 22/2011, de 28 de julio de 2011, Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, BOE. A-2011-13046.
- [3] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015, BOE. A-2009-3243.
- [4] 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, LPV. 2003/50.
- [5] Decreto 104/2006 de 19 de octubre. Valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria, BOC. 204.
- [6] Decreto 32/2009 de 24 de febrero de 2009, Valorización de escorias siderúrgicas de la Comunidad Autónoma de Cataluña, DOGC. 5328.
- [7] Ministerio de Fomento - Gobierno de España, EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural, (2008).
- [8] CEDEX - Ministerio de Fomento. Catálogo actualizado de residuos utilizables en la construcción, (2009).
- [9] I Papayianni, E Anastasiou. Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products, Constr.Build.Mater. 24 (2010) 1412-1417.
- [10] I Arribas, A Santamaría, E Ruiz, V Ortega-López, JM Manso. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete, Constr.Build.Mater. 90 (2015) 68-79.
- [11] JM Manso, JA Polanco, M Losañez, JJ González. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate, Cem.Concr.Compos. 28 (2006) 528-534.

- [12] M Pasetto, N Baldo. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag, *Constr.Build.Mater.* 25 (2011) 3458-3468.
- [13] JM Manso, Fabricación de Hormigón Hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco. (2001).
- [14] IHOBE, S.A. Sociedad pública de gestión ambiental. Departamento de ordenación del territorio, vivienda y medio ambiente. Gobierno Vasco, Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de acería, Bilbao, 1999.
- [15] Equipo técnico de La Toba, Centro de formación del Departamento de Planificación y Desarrollo de Recursos Humanos de ACERALIA, Corporación Siderúrgica., El proceso siderúrgico. Tomo I, 1998.
- [16] Decisión 2000/532/CE. Catálogo Europeo de Residuos (CER), (2000).
- [17] JM Manso, M Losanez, JA Polanco, JJ Gonzalez. Ladle furnace slag in construction, *J.Mater.Civ.Eng.* 17 (2005) 513-518.
- [18] EK Anastasiou, I Papayianni, M Papachristoforou. Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement, *Mater Des.* 59 (2014) 454-460.
- [19] I Papayianni, E Anastasiou. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag, *Cem.Concr.Compos.* 34 (2012) 400-407.
- [20] JM Manso, V Ortega-López, JA Polanco, J Setién. The use of ladle furnace slag in soil stabilization, *Constr.Build.Mater.* 40 (2013) 126-134.
- [21] M Frías Rojas, MI Sánchez De Rojas, A Uría. Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry, *Mater.Constr.* 2002 (2002) 79-83.
- [22] CEDEX. NLT 361/91: Grado de envejecimiento de escorias de acería. (1991).
- [23] M Skaf, Efectos de la incorporación de escorias de acería a mezclas bituminosas drenantes, (2015).
- [24] ASTM C33 / C33M - 13. Standard Specification for Concrete Aggregates, .
- [25] UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón, (2009).
- [26] JM Manso, JJ Gonzalez, JA Polanco. Electric arc furnace slag in concrete, *J.Mater.Civ.Eng.* 16 (2004) 639-645.
- [27] E Vázquez, M Barra. Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno eléctrico con sus aplicaciones en la construcción, *Materiales de Construcción.* 51 (2001) 137.

- [28] C Pellegrino, P Cavagnis, F Faleschini, K Brunelli. Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate, *Cement and Concrete Composites*. 37 (2013) 232-240.
- [29] SI Abu-Eishah, AS El-Dieb, MS Bedir. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region, *Constr.Build.Mater.* 34 (2012) 249-256.
- [30] Modern casting staff, 49th Census of World Casting Production Modest Growth in Worldwide Casting Market, December 2015 (2015) 26.
- [31] J Tartera, La fundición, evolución en la globalización. X encuentro internacional sobre cubilotes modernos, *Fundidores*. (2006) 35.
- [32] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Mejores técnicas disponibles de referencia europea Forja y fundición, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ed., Secretaría general técnica, Madrid, 2009.
- [33] D Baricová, A Pribulová, P Demeter. Comparison of possibilities the blast furnace and cupola slag utilization by concrete production, *Archives of Foundry Engineering*. 10 (2010) 15.
- [34] DA Aderibigbe, AE Ojobo. Properties of cupola slag as a pozzolana and its effects on partial replacement of cement in a mortar, *Conservation & Recycling*. 5 (1982) 203-208.
- [35] D Ceccato, A Masuero, C Moraes, A Vilela. Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigón, *Revista Matéria*. 14 (2009) 737.
- [36] F Puertas, H Santos, M Palacios, S Martínez-Ramírez. Polycarboxylate superplasticiser admixtures: Effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes, *Adv Cem Res*. 17 (2005) 77-89.
- [37] H Okamura, K Ozawa. Self-compacting high performance concrete, *Struct Eng Int J Int Assoc Bridge Struct Eng*. 6 (1996) 269-270.
- [38] H Okamura. Self-compacting high-performance concrete, *Concr.Int.* 19 (1997) 50-54.
- [39] H Okamura, K Ozawa, M Ouchi, Self-Compacting Concrete, *Structural Concrete*. 1 (2000) 3.
- [40] K Ozawa, S Tangtermsirikul, K Maekawa, Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete, 4th CANMET/ACI International Symposium. (1992) 121.
- [41] P Zia, National Science Foundation, International Workshop on High-Performance Concrete, Farmington Hills: American Concrete Institute (ACI), Estocolmo, 1996.

- [42] Å Skarendahl, Ö Petersson. Self-Compacting Concrete, State-of-the Art report of RILEM TC 174-SCC, (2000).
- [43] EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. www.efnarc.org. (2005).
- [44] Y Zhiwu, S Caijun, H Kamal, X Youjun, Proceedings pro042 : 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, RILEM 2005.
- [45] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, (2005).
- [46] Å Skarendahl, P .Billberg, Casting of Self Compacting Concrete - Final Report of RILEM TC 188-CSC, RILEM 2006.
- [47] G De Schutter, K Audenaert, Durability of Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, S.A.R.L. ed., RILEM, Bagnaux, 2007.
- [48] ACI Committee 237, Self-Consolidating concrete, Michigan, 2007.
- [49] ACHE - Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, M-13:Hormigón Autocompactante. Diseño y Aplicación. (2008).
- [50] UNE-EN 206-9. Hormigón. Parte 9: Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante, (2013).
- [51] K Khayat, G De Schutter, Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, State of the Art Report RILEM TC 228-MPS, RILEM ed., Springer 2014.
- [52] HJH Brouwers, HJ Radix. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, Cem.Concr.Res. 35 (2005) 2116-2136.
- [53] PL Domone. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, Cem.Concr.Compos. 28 (2006) 197-208.
- [54] ACHE - Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, M-16:Manual de tecnología de Aditivos para Hormigón, 166.
- [55] AA Ramezaniapour, E Ghiasvand, I Nickseresht, M Mahdikhani, F Moodi. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, Cem.Concr.Compos. 31 (2009) 715-720.
- [56] M Uysal, K Yilmaz. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, Cem.Concr.Compos. 33 (2011) 771-776.

- [57] G Ye, X Liu, G De Schutter, A- Poppe, L Taerwe. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, *Cem.Concr.Compos.* 29 (2007) 94-102.
- [58] UNE-EN 450-1. Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. (2013).
- [59] Ministerio de Fomento - Gobierno de España, RC-08 Instrucción para la recepción de cementos, Centro de publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, Madrid, 2009.
- [60] ALA Fraay, JM Bijen, YM de Haan. The reaction of fly ash in concrete a critical examination, *Cem.Concr.Res.* 19 (1989) 235-246.
- [61] UNE-EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, (2000).
- [62] UNE 83481:1996 EX. Adiciones al hormigón. Escorias granuladas molidas de horno alto. Recomendaciones de uso para las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I, .
- [63] P Borralleras, Criterios de selección del aditivo superplastificante en HAC, 3er Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante. (2012) 55.
- [64] H Hafid, G Ovarlez, F Toussaint, PH Jezequel, N Roussel. Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars, *Cem.Concr.Res.* 80 (2016) 44-51.
- [65] J Yammine, M Chaouche, M Guerinet, M Moranville, N Roussel. From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions, *Cem.Concr.Res.* 38 (2008) 890-896.
- [66] M Westerholm, B Lagerblad, J Silfwerbrand, E Forssberg. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars, *Cem.Concr.Compos.* 30 (2008) 274-282.
- [67] K Yamada. Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers, *Cem.Concr.Res.* 41 (2011) 793-798.
- [68] R Magarotto, I Torresan, N Zeminian, Influence of the molecular weight of polycarboxilate ether superplasticizers on the reological properties of fresh cement pastes, mortar and concrete, *Proceedings of the XI International Conference on the Chemistry of Cement, Durban.* (2003) 514.
- [69] K Yamada, T Takahashi, S Hanehara, M Matsuhisa. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer, *Cem.Concr.Res.* 30 (2000) 197-207.

- [70] MM Alonso, M Palacios, F Puertas, AG De La Torre, MAG Aranda. Effect of polycarboxylate admixture structure on cement paste rheology, *Mater.Constr.* 57 (2007) 65-81.
- [71] B Felekoglu, S Türkel, B Baradan. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Build. Environ.* 42 (2007) 1795-1802.
- [72] H Okamura, M Ouchi. Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No. 1 (2003) 5-15.
- [73] C. Shi, Z. Wu, K. Lv, L. Wu. A review on mixture design methods for self-compacting concrete, *Construction and Building Materials.* 84 (2015) Pages 387-398.
- [74] Y Edamatsu, T Sugamata, M Ouchi, A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests, *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete.* (2003) 345-354.
- [75] P Domone, Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method, University College London. (2009).
- [76] OR Khaleel, H Abdul Razak. Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate, *Mater Des.* 53 (2014) 691-700.
- [77] FK Ghazi, RS JadiriAl. New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements, *Materials Journal.* 107 (2010) 490-497.
- [78] P Dinakar, KP Sethy, UC Sahoo. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag, *Mater Des.* 43 (2013) 161-169.
- [79] O Petersson, P Billberg, BK Van, A model for Self-Compacting Concrete, *Proceedings of Production Methods and Workability of Concrete.* (1996) 483-492.
- [80] C Hwang, C Tsai, The effect of aggregate packing types on engineering properties of self-consolidating concrete, (2005) 337-345.
- [81] J Kanadasan, HA Razak. Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing, *Mater Des.* 56 (2014) 9-19.
- [82] KH Khayat, A Ghezal, MS Hadriche. Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete, *Mater.Struct.* 32 (1999) 679-686.
- [83] T Bouziani. Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach, *Constr.Build.Mater.* 49 (2013) 308-314.
- [84] AW Saak, HM Jennings, SP Shah. New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete, *Materials Journal.* 98 (2001) 429-439.

- [85] V Buui, Y Akkaya, SP Shah. Rheological model for self-consolidating concrete, *ACI Mater.J.* 99 (2002).
- [86] J Dils, G De Schutter, V Boel. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: A review, *Mater.Struct.* 45 (2012) 1673-1683.
- [87] T Hemalatha, KR Ram Sundar, AR Murthy, NR Iyer. Influence of mixing protocol on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Constr.Build.Mater.* 98 (2015) 119-127.
- [88] CF Ferraris. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report, *J Res Natl Inst Stand Technol.* 104 (1999) 461-478.
- [89] F De Larrard, CF Ferraris, T Sedran. Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, *Mater.Struct.* 31 (1996) 494-498.
- [90] HA Barnes. Thixotropy—a review, *J.Non Newtonian Fluid Mech.* 70 (1997) 1-33.
- [91] B Persson. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, *Cem.Concr.Res.* 31 (2001) 193-198.
- [92] K Holschemacher. Hardened material properties of self-compacting concrete, *J.Civ.Eng.Manage.* 10 (2004) 261-266.
- [93] PL Domone. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, *Cem.Concr.Compos.* 29 (2007) 1-12.
- [94] A Leemann, C Hoffmann. Properties of self-compacting and conventional concrete - Differences and similarities, *Mag Concr Res.* 57 (2005) 315-319.
- [95] E Rozière, S Granger, P Turcry, A Loukili. Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete, *Cem.Concr.Compos.* 29 (2007) 626-636.
- [96] UNE-EN 206-1. Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad. (2008).
- [97] AM Neville, *Properties of concrete*, 1995.
- [98] T Sedran, F De Larrard, F Hourst, C Contamines, Mix design of self-compacting concrete, *Proc Int RILEM Conf Product Methods Workability Concr.* (1996) 439-450.
- [99] L Coppola, T Cerulli, D Salvioni, Sustainable development and durability of self-compacting concretes, *Int. Conf. Fract., ICF.* 3 (2005) 2226-2241.
- [100] F Aslani, S Nejadi. Shrinkage behavior of self-compacting concrete, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A.* 13 (2012) 407-419.

- [101] SH Kosmatka, WC Panarese, B Kerkhoff. Design and control of concrete mixtures, (2002).
- [102] R Loser, A Leemann. Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete, *Mater.Struct.* 42 (2009) 71-82.
- [103] A Darquennes, MIA Khokhar, E Rozière, A Loukili, F Grondin, S Staquet. Early age deformations of concrete with high content of mineral additions, *Constr.Build.Mater.* 25 (2011) 1836-1847.
- [104] S Assié, G Escadeillas, V Waller. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability, *Constr.Build.Mater.* 21 (2007) 1909-1917.
- [105] DMB E. Medina, *Armaduras de acero inoxidable*, 1st ed., CEDINOX, Madrid, 2013, pp. 91.
- [106] W Zhu, PJM Bartos. Permeation properties of self-compacting concrete, *Cem.Concr.Res.* 33 (2003) 921-926.
- [107] H Yazici. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete, *Constr.Build.Mater.* 22 (2008) 456-462.
- [108] H Siad, S Kamali-Bernard, HA Mesbah, G Escadeillas, M Mouli, H Khelafi. Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures, *Constr.Build.Mater.* 47 (2013) 1188-1200.
- [109] E Rozière, M Samara, A Loukili, D Damidot. Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure, *Constr.Build.Mater.* 81 (2015) 1-10.
- [110] LA Pereira-de Oliveira, M Nepomuceno, M Rangel. An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates, *Inf.Constr.* 65 (2013) 31-41.
- [111] SC Kou, CS Poon, D Chan. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, *J.Mater.Civ.Eng.* 19 (2007) 709-717.
- [112] ZJ Grdic, GA Toplicic-Curcic, IM Despotovic, NS Ristic. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate, *Constr.Build.Mater.* 24 (2010) 1129-1133.
- [113] SC Kou, CS Poon. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate, *Cem.Concr.Compos.* 31 (2009) 107-113.
- [114] S Tomasiello, M Felitti. EAF slag in self-compacting concretes, *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering.* 8 (2010) 13-21.

- [115] Y Sheen, D Le, T Sun. Innovative usages of stainless steel slags in developing self-compacting concrete, *Constr.Build.Mater.* 101, Part 1 (2015) 268-276.
- [116] ACI committee 363, Report on High-Strength Concrete, American Concrete Institute, USA, 2010.
- [117] G González-Isabel, Hormigón de alta resistencia, Intemac, Madrid, 1993.
- [118] <http://civil-resources.blogspot.com.es/>, High Performance Concrete, (2010).
- [119] UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico, (2013).
- [120] UNE-EN 12457-4:2004. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño), (2004).
- [121] UNE-EN 1097-3. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. (1999).
- [122] UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. (2014).
- [123] UNE-EN 933-3. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas, (2012).
- [124] UNE EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. (2012).
- [125] UNE-EN 933-2/1M. 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, (1999).
- [126] UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación, (2010).
- [127] EN 83112. “Áridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad”, (1989).
- [128] UNE 80103. Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real. (2013).
- [129] UNE-EN 196-6. Métodos de ensayo de cementos. Parte 6: Determinación de la finura, (2010).

- [130] UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos: Determinación de resistencias mecánicas, (2005).
- [131] UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). (2000).
- [132] P. Dinakar, K. P. Sethy, U. C. Sahoo. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag, (2012) 161.
- [133] H. Okamura, M. Ouchi. Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology. (2003).
- [134] UNE EN 12350-8. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento, (2011).
- [135] UNE-EN 12350-2. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento, (2009).
- [136] UNE-EN 12350-10. Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Metodo de la caja en L. (2011).
- [137] UNE EN 12350-9. Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V, (2011).
- [138] UNE EN 12390-2. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. (2009).
- [139] UNE EN 12390-7. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido. (2009).
- [140] UNE 83980. Durabilidad del Hormigón. Métodos de ensayo: Determinación de la absorción, densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. (2014).
- [141] UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, (2009).
- [142] UNE-EN 12390-13. UNE 12390-13 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión. (2014).
- [143] UNE EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas. (2010).
- [144] EN 1338. Concrete pavement blocks. Requirements and tests methods, (2004).
- [145] UNE 83318:1994. Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud, .

- [146] Francisco Fiol Oliván, Estudio experimental sobre propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones estructurales autocompactantes con áridos reciclados y su aplicación a la prefabricación, (2016).
- [147] UNE 112011. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio, (2011).
- [148] UNE 83966. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad, (2008).
- [149] UNE 83981. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido, (2008).
- [150] CARLOS THOMAS GARCIA, JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO, JESUS SETIEN MARQUINEZ, Caudalímetro para la determinación de la permeabilidad de un material a un gas, P201300197. (2012).
- [151] UNE-EN 12390-8. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión, (2009).
- [152] EN 12504-4. Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, (2006).
- [153] UNE-CEN/TS 12390-9 EX. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial, (2008).
- [154] C. Thomas, A. Cimentada, J.A. Polanco, J. Setián, D. Méndez, J. Rico. Influence of recycled aggregates containing sulphur on properties of recycled aggregate mortar and concrete, Composites Part B: Engineering. 45 (2013) 474-485.
- [155] UNE-EN 13295. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación. (2005).
- [156] C Medina, MI Sánchez de Rojas, C Thomas, JA Polanco, M Frías. Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships, Constr.Build.Mater. 105 (2016) 480-486.

Acrónimos

AEN: Arena de escoria de horno eléctrico de arco.

AOF: Arena de ofita.

ASI: Arena de sílice.

CV: Cenizas volantes.

FC: Filler calizo.

FE: Filler de escoria (escoria de horno de cubilote valorizada).

FP: Aditivo superplastificante Fluid Premia (Chryso).

GEN: Gravilla de escoria de horno eléctrico de arco.

GOF: Gravilla de ofita.

GVEN: Grava de escoria de horno eléctrico de arco.

GVOF: Grava de ofita.

HAC: Hormigón autocompactante.

HAR: Hormigón de alta resistencia.

HAP: Hormigón de altas prestaciones.

HEA: Horno eléctrico de arco.

HVC: Hormigón vibrado convencional.

MG: Aditivo superplastificante Master Glenium (BASF).

