



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN
HORMIGÓN DE ALTA DENSIDAD PARA
PROTECCIÓN RADIOLÓGICA UTILIZANDO
MAGNETITA**

**(Design and characterization of a high-density
concrete for radiological protection using
magnetite)**

Para acceder al Título de
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE MINAS**

Autor: Pablo Tamayo Castañeda

Director: Carlos Thomas García

Octubre – 2017

Agradecimientos

La realización del presente trabajo fin de Máster es fruto de las orientaciones, sugerencias, estímulo y confianza del profesor D. Carlos Thomas García, quien me ha conducido durante estos meses con un talante abierto y generoso, guiándome sin ser directivo y mostrando en cada momento una inmejorable disposición ante las dudas que durante la realización del mismo me han surgido, aportando valiosas ideas y observaciones que en todo momento me han guiado en esta investigación.

Deseo agradecer profundamente la oportunidad que LADICIM me ha brindado de colaborar en esta investigación, por los conocimientos y la experiencia adquirida, así como a todos los integrantes del departamento por su especial atención y dedicación.

Y por supuesto a mis familiares, amigos y compañeros, los que están y los que ya no están, que tanto me han ayudado y a los que tanto debo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen.....	1
Abstract	2
1. Estado del arte	3
1.1. Principios sobre la protección frente a la radiación ionizante.....	3
1.1.1. Introducción	3
1.1.2. La radiación gamma	4
1.2. Componentes del hormigón de alta densidad	5
1.2.1. Áridos para la fabricación de hormigones de alta densidad.....	5
1.2.1.1. Introducción	5
1.2.1.2. Método de obtención	6
1.2.1.3. Propiedades generales.....	9
1.2.1.3.1. Áridos gruesos.....	10
1.2.1.3.2. Áridos finos.....	10
1.2.2. Fibras	11
1.2.3. Cementos	12
1.2.4. Agua.....	12
1.2.5. Aditivos.....	13
1.3. Propiedades del hormigón de alta densidad para la protección frente a la radiación....	14
1.3.1. Propiedades físicas.....	14
1.3.2. Propiedades mecánicas.....	15
1.3.2.1. Resistencia a compresión uniaxial	15
1.3.2.2. Módulo de elasticidad.....	16
1.3.2.3. Resistencia a tracción indirecta.....	16
1.3.2.4. Resistencia a flexotracción.....	16
1.3.3. Durabilidad	16
1.3.3.1. Permeabilidad al oxígeno.....	17
1.3.3.2. Permeabilidad al agua bajo presión.....	17
1.3.3.3. Ciclos de humedad-sequedad	18
1.3.3.4. Retracción por secado.....	18
1.3.4. Comportamiento frente a altas temperaturas.....	19
2. Materiales y metodología de ensayo	20
2.1. Caracterización del cemento.....	21

2.1.1. Densidad.....	21
2.1.2. Superficie específica Blaine	22
2.2. Caracterización de los áridos de alta densidad	23
2.2.1. Análisis microestructural y químico	24
2.2.2. Determinación de las propiedades dimensionales y geométricas.....	25
2.2.2.1. Granulometrías	25
2.2.2.2. Índice de lajas.....	26
2.2.2.3. Coeficiente de forma.....	27
2.2.4. Determinación de la densidad de los áridos	28
2.2.5. Comportamiento mecánico	29
2.3. Caracterización de las fibras.....	29
2.3.1. Microestructura y composición química elemental.....	30
2.3.2. Termogravimetría analítica y calorimetría diferencial.....	31
2.3.3. Densidad.....	31
2.3.4. Propiedades geométricas.....	31
2.4. Dosificación del hormigón.....	32
2.4.1. Estimación de probetas necesarias.....	33
2.4.2. Procedimiento de amasado	35
2.4.3. Consistencia del hormigón fresco	37
2.4.4. Preparación y acondicionamiento de probetas	38
2.5. Densidad aparente, densidad relativa, porosidad accesible y coeficiente de absorción. 41	
2.6. Determinación de la durabilidad del hormigón	42
2.6.1. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno.....	43
2.6.2. Permeabilidad al agua bajo presión.....	44
2.6.3. Ciclos de humedad-sequedad	45
2.6.4. Retracción por secado.....	47
2.7. Propiedades mecánicas del hormigón	48
2.7.1. Determinación de la resistencia a compresión uniaxial.....	48
2.7.2. Determinación del módulo de elasticidad	49
2.7.3. Determinación de la resistencia a tracción indirecta.....	50
2.7.4. Determinación de la resistencia a flexotracción	51
2.8. Comportamiento del hormigón a altas temperaturas	52
2.8.1. Proceso de aplicación del choque térmico	52
2.8.2. Determinación de impulsos ultrasónicos del hormigón tratado	53

2.8.3. Resistencia a compresión uniaxial	53
3. Resultados y análisis de resultados.....	55
3.1. Propiedades del cemento	55
3.2. Propiedades de los áridos de alta densidad.....	55
3.2.1. Microestructura	55
3.2.2. Composición química elemental.....	57
3.2.3. Propiedades dimensionales y geométricas.....	58
3.2.3.1. Análisis granulométrico.....	58
3.2.3.2. Índice de lajas.....	59
3.2.3.3. Coeficiente de forma.....	60
3.2.4. Densidad de los áridos	61
3.2.5. Machacabilidad	61
3.3. Propiedades de las fibras	63
3.3.1. Microestructura	63
3.3.2. Composición química elemental.....	64
3.3.3. Análisis térmico (TGA/DSC).....	65
3.3.4. Densidad y propiedades geométricas	69
3.4. Dosificaciones del hormigón	70
3.4.1. Estimación de probetas.....	71
3.4.2. Consistencia del hormigón fresco	72
3.4.3. Inventario de probetas.....	72
3.5. Propiedades físicas del hormigón	75
3.6. Durabilidad del hormigón	76
3.6.1. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno.....	76
3.6.2. Permeabilidad al agua bajo presión.....	76
3.6.3. Ciclos de humedad-sequedad	77
3.6.4. Retracción del hormigón.....	80
3.7. Propiedades mecánicas del hormigón	81
3.7.1. Resistencia a compresión uniaxial	81
3.7.2. Módulo elástico.....	82
3.7.3. Resistencia a flexotracción.....	83
3.7.4. Resistencia a tracción indirecta.....	84
3.8. Comportamiento del hormigón frente a altas temperaturas.....	84
3.8.1. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos.....	85

3.8.2. Resistencia a compresión uniaxial	85
4. CONCLUSIONES	87
5. BIBLIOGRAFÍA	89
5.1. Referencias	90
5.2. Normas	93

RESUMEN

En el presente trabajo se recogen los principales resultados de la caracterización de los componentes de un hormigón estructural para protección frente a radiación ionizante proveniente de instalaciones radiológicas. Este tipo de instalaciones son cada día más habituales y comprenden desde plantas de radioterapia o de medicina nuclear a industrias para producción de materiales o plantas de generación eléctrica nucleares. Los parámetros de diseño establecidos no buscan la obtención de un hormigón de altas prestaciones resistentes sino un hormigón de muy alta densidad cuya fracción integral de áridos esté basada únicamente en utilización de un árido de magnetita (Óxido ferroso diférrico 90%). El uso de este tipo de áridos, de alta densidad, provee al hormigón de un bajo espesor de capa hemirreductora (half-value layer) permitiendo una alta atenuación de la radiación ionizante electromagnética a la vez que la utilización de hormigones de menores espesores.

En la caracterización de este hormigón, se propone un estudio sobre el comportamiento mecánico tras exposición a altas temperaturas mediante ensayos que tratan de emular los efectos a nivel térmico producidos por la radiación y elevaciones extremas en caso de accidente. También se caracteriza el comportamiento físico-mecánico del hormigón tras la exposición frente a agentes externos agresivos para cuantificar la durabilidad del mismo, caracterización que se completa con los ensayos pertinentes que dicta la norma.

En términos de resistencia, el hormigón es sometido a una batería de ensayos normalizados con el objetivo de comprobar el cumplimiento de los requerimientos que plantea la instrucción correspondiente.

El estudio propone la utilización de relaciones de agua/cemento de 0,59 y el establecimiento de una dosificación que emplea tres tamaños de árido (0/2, 0/8, 0/20) y cemento Portland tipo I, atendiendo a una solución de compromiso en que una reducción de cemento permita un aumento de la densidad global del hormigón y un aumento del cemento permita la obtención de mayores resistencias.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible obtener un hormigón estructural suficientemente resistente, de alta densidad y con un comportamiento que permiten su utilización, garantizando su efectividad, frente a las altas temperaturas.

ABSTRACT

In the present study, the main results of the characterization of the components of a structural concrete for protection against ionizing radiation from radiological installations are collected.

These equipments are placed in several kind of facilities, from radiotherapy or nuclear medicine plants to industries for materials production, or nuclear power generation plants, all of them with stringent security requirements, specially in terms of protection against radioactive release. Therefore, they must be built with suitable construction materials, among which structural concrete is the most important.

Its design parameters are not set to obtain a high-performance concrete, but a very high-density one, whose total aggregate fraction is composed only by magnetite aggregate (90% ferrous-ferric oxide). The use of this kind of high-density aggregates may provide a concrete with a low thickness of the half-value layer. This allows higher attenuation of electromagnetic ionizing radiation and, at the same time, the use of smaller concrete thicknesses.

The study also proposes the use of a water / cement ratio of 0.59, attending to a compromise solution between the overall density of the concrete and its resistance, and the establishment of a dosage with three aggregate mean sizes (0/2, 0/8, 0/20) and Portland CEM I.

On the basis of this, this concrete characterization requires a study on its mechanical behavior after high temperatures exposition, by mean of tests that try to emulate the thermal effects radiation and extreme temperature increments would cause in case of accident. The physical-mechanical behavior of the concrete after exposure to aggressive external agents is also investigated, in order to quantify its life expectance. This characterization is accomplished with those tests dictated by the instruction.

In terms of strength, concrete is subjected to a standardized tests battery, so that compliance with the requirements of the corresponding instruction is verified.

The obtained results demonstrate the feasibility of obtaining a suitable structural concrete, strong enough, with high density and a suitable behavior that allows its application in radiological installations, guaranteeing its effectiveness against high temperature shocks.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Principios sobre la protección frente a la radiación ionizante

1.1.1. Introducción

Fue Demócrito, discípulo de Leucipo, nacido en Tracia, quien propuso que la materia estaba compuesta de partículas indivisibles llamadas átomos. Los filósofos griegos no compartían esta teoría y la corriente de pensamiento propuesta por Aristóteles, que aseguraba que la materia estaba compuesta por los elementos fuego, aire, tierra y agua perduró a lo largo de los tiempos por casi 20 siglos. Fueron escasas las referencias a una nueva teoría distinta a la de Aristóteles, como la de Pierre Gassendi en el siglo XVII, cuyas obras no fueron publicadas hasta después de su muerte.

La radiactividad fue descubierta por Henry Becquerel en el 1896 accidentalmente, tras colocar unos cristales con sales de uranio sobre unas fotografías, velándose. Becquerel se dio cuenta de que las sales de uranio emanaban radiación y no eran originadas por ninguna reacción química. Su trabajo lo continuaron Pierre Curie y Madame Curie, descubridora de otro material radiactivo como es el torio. Posteriormente descubre la presencia de otros dos elementos aún más radiactivos que el propio uranio, estos son el polonio y el radio, tras analizar su comportamiento separándolos cuidadosamente del mismo mineral en que se encontraba el uranio: la pechblenda. La extracción del radio fue una tarea compleja e insólita que tuvo sus frutos tras años de trabajo. Finalmente, el matrimonio consigue junto a Becquerel el premio Nobel de física en 1903.

El modelo del átomo fue finalmente propuesto en 1907 por Joseph John Thomson y la primera teoría de la radiactividad fue descrita por Ernest Rutherford en 1902, quien sostuvo que los materiales radiactivos se transforman en otros y la radiación estaba compuesta por 3 componentes: alfa, beta y gamma. El mismo Rutherford propuso el modelo nuclear del átomo tras experimentar con partículas alfa la altamente improbable desviación de las mismas a través de una hoja de papel, estableciendo la presencia de un núcleo pequeño y pesado. Del núcleo descubrió su carácter electropositivo así como la presencia de partículas de carga negativa y finalmente de partículas que hacían estable el átomo llamadas neutrones. Posteriormente, en 1930 los físicos Bothe y Becker descubrieron la radiación neutrónica.

Desde entonces son numerosos los avances alcanzados e innumerables las aplicaciones derivadas de los efectos de la radiación, algunas de estas aplicaciones se sitúan en medicina, como el radiodiagnóstico con rayos X, la radioterapia, o la medicina nuclear, otras aplicaciones se encuentran en la industria para la producción de materiales, detectores de humo, agricultura o alimentación. Sin embargo, la mayor aplicación reside en la generación eléctrica con combustible nuclear en centrales nucleares.

La aplicación de las distintas técnicas de aprovechamiento de la radiación genera una contaminación del material en contacto con la propia radiación. La gravedad de esta contaminación depende de la naturaleza de la misma y es en muchas veces necesaria la implantación de barreras que atenúen y capten las partículas perjudiciales inherentes al proceso.

Las partículas radiactivas emiten radiaciones de diferente intensidad, energía y alcance. Las radiaciones alfa tienen un bajo poder de penetración en la materia y son fácilmente frenadas por una hoja de papel. Las radiaciones beta, sin embargo, atraviesan una hoja de papel pero son incapaces de atravesar una fina lámina de aluminio. Las radiaciones gamma son las más

peligrosas, y es necesaria una placa de plomo o una barrera de hormigón de varios centímetros para interceptarla. Las radiaciones alfa y beta, debido a su corto alcance, son despreciables frente a la radiación gamma y no se consideran en el diseño de protecciones frente a emisiones radiológicas.

1.1.2. La radiación gamma

La radiación gamma, es un tipo de radiación electromagnética ionizante (con energía suficiente como para extraer electrones de los átomos) constituida por fotones. Esta radiación es producida generalmente por la desintegración de isótopos radiactivos y produce tres fenómenos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares.

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de un electrón que ha sido despedido por haber absorbido un fotón, se da en radiaciones gammas de energías inferiores a 1 MeV y la probabilidad de acontecer incrementa con el número atómico del elemento con el que interactúa.

El efecto Compton consiste en la dispersión de un fotón cuando choca con un electrón libre perdiendo parte de su energía y suele predominar en energías que son inferiores a 10 MeV. Fenómeno directamente proporcional al número atómico.

La producción de pares consiste en la conversión del fotón en un electrón y en un positrón cuando el fotón penetra en el campo eléctrico cercano al núcleo del átomo y predomina en energías superiores a 1.02 MeV y su efecto proporcional al cuadrado del número atómico del elemento atenuante.

La atenuación de la radiación gamma al atravesar un cuerpo se realiza de forma exponencial, siendo esto así, se necesitarían espesores infinitos para reducir la radiación a cero, sin embargo, son consideradas atenuaciones aceptables de 10^{10} - 10^{12} para que el efecto de la radiación no sea peligroso (Goicolea, 1958).

Para el diseño de una barrera de protección frente a radiación gamma con hormigón, se hace necesario conocer la ley exponencial a que obedece la atenuación de la radiación gamma. La atenuación de la radiación en función del espesor y del tipo de material de protección es la siguiente (Samarin, 2013):

$$I = I_0 \exp(-x/l_n)$$

donde:

- I_0 es la intensidad inicial de radiación.
- I es la radiación atenuada.
- x es el espesor del material de protección.
- l_n es la constante del material para que la intensidad de la radiación sea reducida n veces (cm).

l_n también es llamado *rango medio*, y es la distancia media que viaja un fotón antes de interactuar. La inversa de este valor es denominada *coeficiente lineal de atenuación* μ (cm).

Este último factor también puede expresarse en función de la densidad del material ρ , definiéndose coeficiente másico de atenuación μ_m (cm²/g) como:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

Otro de los parámetros más utilizados para cuantificar la eficacia de la atenuación de un material es la capa hemirreductora (Half Value Layer-HVL) que expresa el espesor de material penetrado por el 50% de la radiación incidente y es expresado en cm.

$$HVL = 0.693 \cdot l_n$$

En cualquier caso, cada uno de los 3 coeficientes anteriormente descritos depende de los mismos factores de atenuación: energía del fotón incidente, tipo de material (número atómico) y densidad. En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran diferentes valores de Z, HVL y densidad para diversos materiales.

Tabla 1. Diferentes valores de HVL para materiales comunes. (Sayuti, 2011)

Material	HVL (cm)	
	Ir ¹⁹²	Co ⁶⁰
Hormigón	4,82	6,85
Acero	0,87	2,2
Plomo	0,48	1,24
Tungsteno	0,33	0,79
Uranio	0,28	0,69

Tabla 2. Diferentes valores de número atómico y densidad para materiales comunes. (Sayuti, 2011)

Material	Número atómico (Z)	Densidad (g/cm ³)
Hormigón	-	2,3
Acero	-	7,85
Plomo	82	11,35
Tungsteno	74	19,25
Uranio	92	19,05

1.2. Componentes del hormigón de alta densidad

1.2.1. Áridos para la fabricación de hormigones de alta densidad

1.2.1.1. Introducción

Para la elaboración de un hormigón que sirva como protección frente a radiación ionizante se ha de contemplar la utilización de un agregado adecuado que cumpla con las funciones de ofrecer unos niveles de atenuación máximos, así como cumplir otros requisitos como lo son el aseguramiento del suministro, respeto al medio y el cumplimiento de unas restricciones económicas. A este último respecto cabe comentar que la repercusión en el costo total del árido en la fabricación de este tipo de protecciones es tan pequeña, que más que una restricción es una variable a no tener en cuenta.

Son muchos los áridos empleados en este tipo de protecciones, así como muchos los artículos que comparan los distintos tipos de árido en la caracterización de su respuesta frente a la radiación y en la comparación de las propiedades mecánicas que ofrecen en estado de servicio.

Las opciones más comunes que se barajan en la bibliografía contemplan el uso de agregados de magnetita (Fe_3O_4), goethita ($\alpha\text{-Fe(OH)}$), barita (BaSO_4) y serpentinita ($(\text{Mg, Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Cabe mencionar que las características de cada mineral dependen muy directamente de su lugar de procedencia y que los resultados que se puedan discutir sobre cada uno de ellos son siempre relativos. Ahmed S. Ouda (2014) obtuvo en un estudio comparativo un mayor peso específico en el caso del agregado de barita, pero un mejor comportamiento mecánico en cuanto a resistencia a compresión para la magnetita, así como un mejor comportamiento físico-mecánico general. La adición de agregado fino de magnetita en hormigones de gran resistencia también mostró mejoras en la eficacia de la protección frente a radiación gamma para fotones de ^{137}Cs . La escasez de abastecimiento de mineral de barita, unido a las excelentes cualidades del agregado de magnetita suponen parte de la justificación de la utilización de este último como árido conglomerante en la elaboración de un hormigón de alta densidad para protección frente a radiación ionizante.

La magnetita es un mineral metálico, masivo, brillante e isométrico compuesto de óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4). Se presenta en rocas magmáticas, así como en yacimientos pneumatolíticos de desplazamiento y metamórficos, como inclusiones en pizarras de cloritos y talco, en filones hidrotermales, en grietas alpinas. Su origen es magmático, hidrotermal y metamórfico y rara vez sedimentario. (<http://www.mineral-s.com/magnetita.html>)

También es comúnmente utilizado hematita (Fe_2O_3), un polimorfo α de la magnetita, pero posee un peso específico ligeramente menor debido a un también menor contenido de hierro. Los yacimientos más importantes en España están situados en León (Coto de Vivaldi y coto de Wagner). El mineral utilizado en el estudio ha sido extraído de una mina en la zona de Kiruna (Suecia), lugar donde mayor abundancia se conoce de este mineral.

1.2.1.2. Método de obtención

El mineral se extrae de una explotación tanto a cielo abierto como subterránea. El método de extracción subterránea del mineral es el método de minado por hundimiento de subniveles. Este método requiere de condiciones de competencia para que las labores sean estables utilizando la mínima cantidad de elementos de refuerzo. Es aplicable para yacimientos masivos en los que la mineralización es fácilmente separable y distinguible del estéril.

En términos metodológicos, el método consiste en hundimiento por desprendimiento del material estéril, que rellena el espacio dejado por la mineralización. El método acaba con la extracción de todas las capas de mineral produciéndose en la superficie una depresión o cavidad. El cuerpo mineralizado se divide en subniveles que están espaciados de 10 a 20 m, estos subniveles poseen una red de galerías paralelas de unos 10 m. A su vez, estas galerías se sitúan entre las galerías de los subniveles contiguos formando una red de galerías romboidal que cubre toda la sección mineralizada. El proceso de arranque, carga y transporte se realiza de arriba hacia abajo a partir de estos subniveles. En la figura Fig. 1 se muestra la red de galerías descrita:

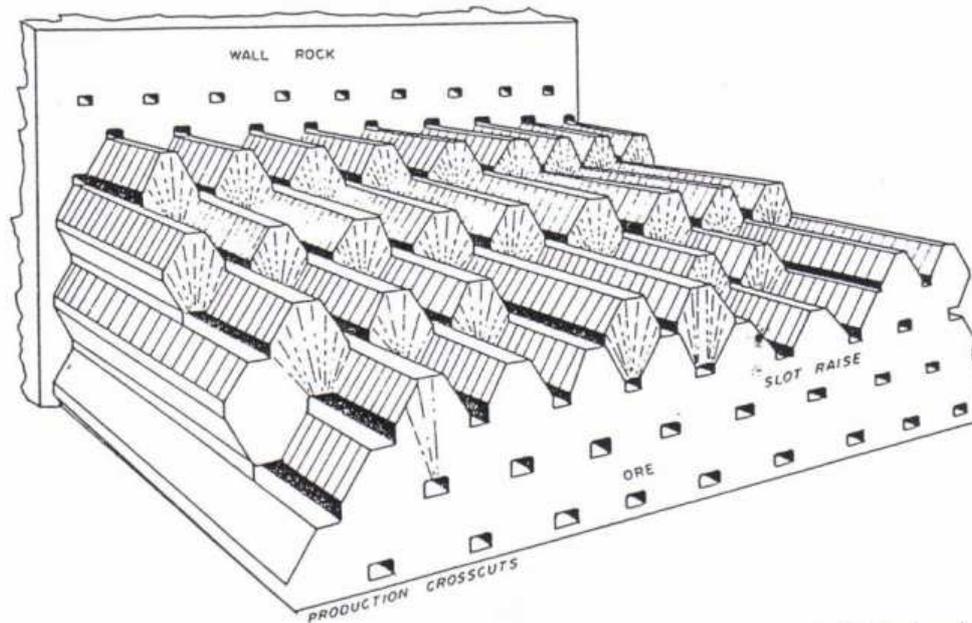


Fig. 1. Minado por hundimiento de subniveles (Ortiz, 2008).

Existe una rampa central que comunica a todos los subniveles, así como una serie de galerías en cada subnivel localizadas en la roca yacente. Existen galerías de arranque y de extracción de material de gran sección en todos los subniveles. La excavación de estas galerías es costosa y puede llegar a representar un 20% de la capacidad productiva total. Por último, se utilizan piques para conectar los distintos subniveles con el objetivo de movilizar el material para su evacuación hasta un nivel inferior donde este es recogido y transportado. El arranque se realiza, en cada subnivel perforando barrenos hacia arriba en una disposición en sección en abanico. Los barrenos pueden tener una longitud de hasta 40 metros y su diámetro puede oscilar de los 50 a los 100 mm.

El método de hundimiento por subniveles (Fig. 2) es un método simple que permite obtener grandes capacidades de producción, permitiendo la operación en sus distintos niveles o áreas de forma independiente y con el uso de maquinaria de gran capacidad. Como contrapartida se encuentra el costo operacional, así como la dilución del mineral en material contaminante.

El procesado del mineral extraído es sometido a diversos procesos mineralúrgicos. El mineral puede ir acompañado de diversos metales como cobre u oro, que pueden ser separados tras una molienda mediante procesos de flotación o mediante concentradores. Durante este proceso la magnetita es liberada pudiéndose recuperar en las colas del concentrador.

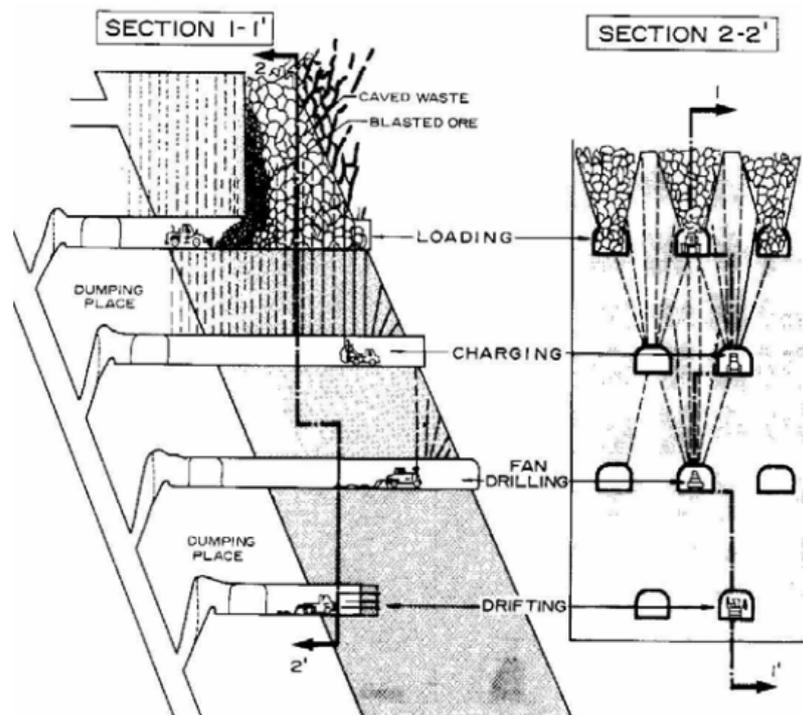


Fig. 2. Sección de galería de método de minado por hundimiento de subniveles (Ortiz, 2008b).

Un proceso típico para la separación o concentración de mineral de magnetita comprende diferentes fases. Una vez han sido separados los metales inherentes al material para su aprovechamiento económico o no, suele ser añadido agua a las colas del concentrador para formar un lodo.

El lodo le da a la mezcla una consistencia adecuada para su tratamiento en el separador magnético en la planta de extracción de magnetita. Este separador está integrado por una batería de tambores giran alrededor de un eje conectado a un imán de alta potencia. A medida que el lodo se va lavando en estos tambores, las partículas magnéticas se adhieren a la superficie del imán permitiendo a la magnetita separarse de la fase no magnética en un lavado de material.

El proceso posterior a la separación magnética suele ser una separación mediante ciclón del abundante material de magnetita que aún no ha sido liberado. El tamaño de las partículas es una variable importante en la liberación de mineral, y los procesos de molienda son de vital importancia y gran parte de la energía utilizada en los procesos de tratamiento de mineral están destinados a procesos de conminución. En el ciclón el material es separado mediante centrifugado, donde las partículas grandes y más densas son desalojadas por su parte inferior. Este material desalojado es magnetita liberada y es de nuevo concentrada en un separador magnético. La cabeza del ciclón es también concentrada mediante un separador magnético de varias etapas.

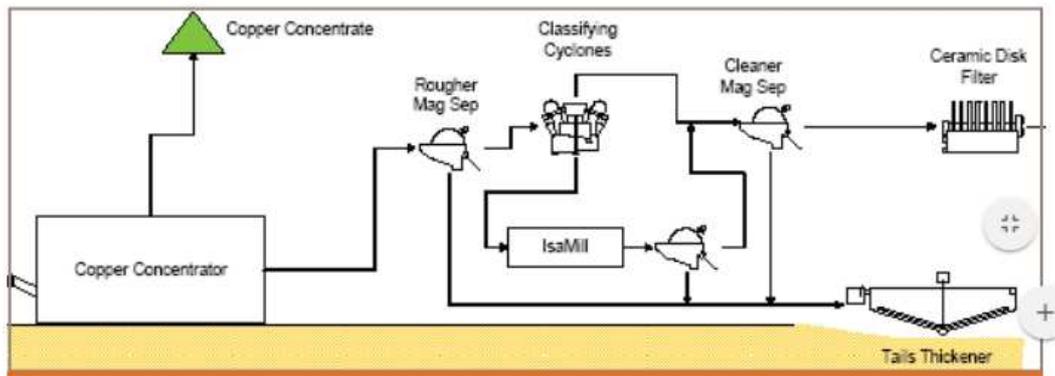


Fig. 3. Ejemplo de proceso de liberación de magnetita (Ernest Henry Mining, 2011).

Finalmente, la magnetita liberada durante todo el proceso es desecada y el agua extraída es reutilizada a fin de minimizar el flujo total de agua utilizada en el proceso.

1.2.1.3. Propiedades generales

Los áridos son parte fundamental de la composición del hormigón, la función de estos es el aporte de resistencias mecánicas a la mezcla disminuyendo drásticamente el consumo del cemento, el componente más costoso. Tanto es esto, que constituyen la mayor parte en volumen de la dosificación del hormigón. La reducción de la cantidad de cemento para el amasado se ve reducida hasta el total recubrimiento de los huecos generados por los áridos en la mezcla.

En la dosificación de un hormigón siempre existe la dicotomía entre la maximización de la cantidad de árido para reducir costos y la maximización del uso de cemento para mejorar resistencias. En el caso que se atañe esta solución de compromiso se complica al considerar otros factores tales como consistencia, porosidad, permeabilidad o densidad.

Los áridos son de naturaleza inorgánica y según su procedencia pueden clasificarse como áridos naturales, artificiales o reciclados. Los áridos naturales son obtenidos de yacimientos solo por procedimientos mecánicos, explotados tanto en depósitos naturales como producidos en canteras mediante procesos de trituración y molienda. Los áridos artificiales son subproductos procedentes de residuos generalmente industriales, tales como escorias de acería o cenizas volantes. Los áridos reciclados por su parte, están experimentando un espectacular auge en su utilización, siendo parte habitual de la conformación del árido del hormigón y procedimiento, principalmente, de residuos de demolición.

Tanto la naturaleza como las propiedades intrínsecas del árido afectan directamente a las propiedades mecánicas del hormigón, en el sentido de mejorar la resistencia, reducir la retracción, reducir la abrasión o incrementar la densidad del hormigón. Ya en su tiempo R. Feret (1896) propuso una relación entre la resistencia del hormigón en función de los volúmenes de áridos presentes en la mezcla, suponiendo las arenas, para una misma dosificación, el componente con una mayor influencia en la resistencia del hormigón, reduciéndolo, debido a tener una mayor superficie específica que las gravas. La introducción de gravas, por su parte, aumenta los defectos en masa del hormigón, aunque la reducción de resistencias es menor que la generada por las arenas.

El árido también influye en el módulo de elasticidad, así como en la retracción autógena e hidráulica y fluencia del hormigón. En cuanto a la geometría de los áridos, influyen tanto en la consistencia del hormigón en estado fresco como en resistencias finales del hormigón. Los áridos

de machaqueo son más angulosos y menos redondeados, ofreciendo menos docilidad y mayores resistencias a flexotracción y menor resistencia que los de forma esférica. Las formas lajosas o irregulares producen otros efectos adversos como estructuras menos compactas que derivan en mayores permeabilidades. Un efecto característico de este tipo de formas es el fenómeno de exudación, consistente en la acumulación de agua entre áridos.

La utilización de áridos con un gran contenido en finos deriva en un aumento del agua de amasado necesario para una misma consistencia, así como un incremento derivado de la cantidad de cemento empleado.

Cuando se utilizan áridos con un elevado tamaño máximo de los áridos, se consigue reducir la relación de agua-cemento, y esta reducción deriva en el aumento de resistencias del hormigón y reducción de la retracción.

Independientemente del tamaño del árido, la superficie de contacto juega un papel importante en la adherencia al hormigón en el sentido de la rugosidad de su textura, afectando a la resistencia e incluso pudiendo afectar al agua requerido por la mezcla.

En cuanto a las características que deben cumplir los áridos según la EHE-08 se contempla la no utilización de áridos que reaccionen con el cemento y que no contengan sulfuros oxidables, entre otros.

1.2.1.3.1. Áridos gruesos

Los áridos gruesos son definidos por la EHE-08 como aquellos que quedan retenidos por el tamiz de 4 mm. El tamaño máximo aconsejable de estos áridos no debe superar los 20 mm y su índice de lajas, según la UNE-EN 933-3 deberá de ser inferior a 35. La EHE-08 también define un tamaño máximo para el árido grueso en caso de utilizar vainas o armaduras y un tamaño máximo de 0,25 veces la dimensión mínima de la pieza en el caso de hormigón en masa.

En el presente estudio se utilizan dos tipos de áridos, con la misma procedencia, pero distinta granulometría:

- Uno de ellos comprende las granulometrías 0/20 mm denominado “grava”,
- El otro comprende las granulometrías 0/8 mm denominado “gravilla”.

Ambos están formados en más del 90% por magnetita y ambos comprenden fracciones de áridos correspondientes a la definición de árido grueso. La utilización de áridos gruesos permite reducir la relación de agua-cemento, pero disminuye la resistencia a compresión, tienen una adherencia inferior a la de los finos, así como una mayor probabilidad de contener fisuras procedentes de su extracción o machaqueo. En general, han de ser limpios, angulosos en su justa medida y forma tendiente a cúbica.

1.2.1.3.2. Áridos finos

Están integrados por arenas, partículas inferiores a 4 mm según la EHE-08. La obtención de tales granulometrías es obtenida mediante molienda o machaqueo. Diferenciando entre las arenas de granos gruesos y de granos finos, las primeras hacen del hormigón más resistente, pero necesitan de mayor cantidad de cemento para rellenar los huecos. Por otro lado, el hormigón obtenido tiene un comportamiento más plástico y en consecuencia poroso.

Los áridos finos deben de tener forma redondeada y una textura lo más lisa posible para minimizar la cantidad de agua empleada en la elaboración del hormigón. El hecho de contar con una mayor superficie específica que los agregados gruesos hace requerir de una mayor cantidad de cemento.

Los áridos finos utilizados en el estudio son los que integran las anteriormente citadas fracciones 0/20 y 0/8 de grava y gravilla de mineral de magnetita al 90% de concentración.

1.2.2. Fibras

Las fibras dotan al hormigón en masa de una mejora en la resistencia a tracción, a la fatiga y en su tenacidad, además de una reducción de la fisuración y de la retracción. Las fibras aptas para su utilización como parte integrante del hormigón están integradas en la norma según la UNE-EN 14889-1: “Fibras para hormigón”. Los hormigones reforzados con fibras son definidos por la EHE-08 como aquellos “hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa”.

La geometría de las fibras juega un papel importante en la respuesta del hormigón frente a sollicitaciones tanto internas como externas. Existe una amplia variedad de fibras de acero, onduladas, con extremos conformados, con ganchos, corrugadas... cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes. Las fibras utilizadas en el presente trabajo son fibras cortas y rectas, específicamente diseñadas para la reducción de la retracción por secado y aumento de la resistencia a tracción, aunque de menor modo.

La efectividad de estas es mayor cuanto mayor sea la adherencia con el propio hormigón, y esta adherencia depende exclusivamente de la geometría de la propia fibra. Así, para definir la geometría de las fibras ha de especificarse tanto la sección como la forma geométrica y dimensiones de las mismas.



Fig. 4. Principales secciones transversales de fibras (Mármol, 2010).

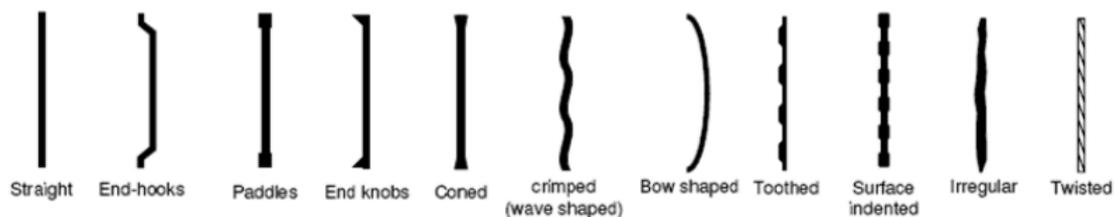


Fig. 5. Principales geometrías de fibras (Mármol, 2010b).

Para llevar a cabo la presente caracterización han de establecerse varios parámetros:

- l : longitud total de la fibra (mm).
- d : diámetro o diámetro efectivo de la fibra (mm).
- e : esbeltez o relación l/d .
- A : área de la sección transversal (mm²)

Las fibras cortas son seleccionadas para trabajar en microfisuras, encomendación para la cual han de emplearse un alto número de fibras y de pequeño grosor. Si l/d es muy grande afecta a la trabajabilidad del hormigón de manera negativa por lo que se prefiere la utilización de fibras más cortas. Por otro lado, las fibras largas se comportan bien frente a grandes fisuras, ya que quedan más adheridas a la matriz, aunque se han de usar en menor proporción debido a baja trabajabilidad de las mismas.

En definitiva, si lo que se busca es una mejora de la tracción y ductilidad del material se ha de preferir la utilización de fibras cortas en grandes proporciones, en cambio, si se busca una mejora tanto en las resistencias como en la ductilidad de la estructura las fibras largas son preferidas y siempre utilizando dosificaciones con una baja proporción (Mármol, 2010c).

1.2.3. Cementos

El cemento es el aglomerante utilizado en la fabricación de hormigones y el elemento más importante de estos. Una vez amasado con agua, el cemento reacciona formando una pasta, estas reacciones de naturaleza físico-químicas exotérmicas conforman el proceso de hidratación del cemento. Las reacciones tienen lugar a nivel de las principales fases anhidras del Clinker: alita, aluminato, belita y ferrito, fases que en combinación con el agua se transforman en fases hidratadas. Al reaccionar se obtiene un material solidificado donde se han generado nuevas fases de hidratos y aglutinado los demás elementos que incorporan el hormigón.

El cemento seleccionado para ejecutar la dosificación planteada corresponde con un cemento CEM I 52,5 N. No existe normativa que exija la elección de un tipo u otro de cemento, en este caso la elección del mismo se debe a consideraciones propias del proyecto. La justificación a este respecto responde a la necesidad de trabajar con un cemento que aporte las mayores capacidades resistentes existentes, debido a la necesidad de minimizar la cantidad de cemento en la dosificación en aras de maximizar la cantidad de áridos en la mezcla para así poder aumentar la densidad conjunta del hormigón. En proyectos en que se busque una protección lo más efectiva posible frente a ambos tipos de radiación, fotónica y neutrónica, se persigue una solución de compromiso en la dosificación del cemento entre densidad e hidrógeno combinado libre.

El Clinker de cemento Portland o cemento tipo I es un material hidráulico cuya composición contiene al menos en 2/3 de su masa silicatos de calcio $((CaO)_{2-3}SiO_2)$ y el resto de su composición combinaciones de óxido de aluminio (Al_2O_3) , óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros. La relación entre óxido de calcio y óxido de silicio ha de ser superior a 2 y el contenido en óxido de magnesio (MgO) está limitado al 5%.

El cemento portland tipo I de resistencia 52,5 MPa es un cemento de prestaciones normales de resistencia inicial. A los 2 días la resistencia inicial se sitúa por encima de 20 MPa mientras que a los 28 días se sitúan por encima de los 52,5 MPa. El tiempo de principio de fraguado es superior o igual a 45 minutos mientras que su expansión queda limitada a menos de 10 mm.

El contenido en sulfatos (SO_3) del cemento ha de ser inferior al 3,5 % mientras que el contenido en cloruros ha de ser inferior al 4 %.

El comportamiento del cemento frente a radiación neutrónica no denota daños significantes en la pasta de cemento debido a que su poca cristalinidad y alta porosidad evitan la acumulación de defectos. Las causas que provocan daños en la pasta de cemento relacionados con la radiación están asociados al aumento de temperatura generado en el proceso, que se traducen en un secado por calentamiento, así como una carbonatación inducida por la radiación (art.10).

1.2.4. Agua

Elemento fundamental en la elaboración del hormigón. El agua es empleada tanto en la fabricación, añadiéndose a la hormigonera tras iniciarse el proceso de amasado, como en el proceso de curado para asegurar una correcta hidratación, como en las diversas operaciones de limpieza de los equipos.

Como componente activo de la mezcla, las propiedades del agua condicionan el comportamiento del hormigón en estado endurecido, del mismo modo que su concentración es

decisiva en las propiedades del hormigón, tanto de consistencia como físicas y mecánicas. Las exigencias que ha de cumplir el agua son estar limpia y libre impurezas, estas son cumplidas sin problema por el agua corriente o potable.

El agua de mezclado posee una triple función, por un lado, producir la hidratación del cemento, por otro mejorar la consistencia o trabajabilidad del hormigón en estado fresco y por otro crear el espacio dentro del cemento para permitir el correcto desarrollo de los productos en la hidratación.

En hormigones con fibras las relaciones de agua/cemento son altas, pudiendo llegar a valores de 0,6. Esta relación de agua cemento determina en gran parte:

- La resistencia del hormigón, debido a la disminución de la compacidad de la pasta de cemento.
- La durabilidad, disminuyendo su resistencia química.
- La porosidad, por la pérdida de compacidad de la pasta
- La retracción, que depende del secado de los productos de hidratación.

1.2.5. Aditivos

Los aditivos son productos químicos que se añaden a la mezcla con el objetivo de modificar las propiedades del aglomerante, y por ende del hormigón, dotando a estos de una mejora de diversas propiedades de forma permanente, para satisfacer unos requisitos restrictivos. Esta mejora es permanente y puede afectar a su estado fresco y/o a su estado endurecido.

El uso de aditivos es cada vez más frecuente fruto de la rápida evolución que han sufrido en los últimos tiempos. Existe una gran variedad de aditivos, todos ellos descritos en la norma UNE-EN 934-2:2010+A1. *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.*

Los aditivos superplastificantes o reductores de agua de alta capacidad permiten reducir la dosificación del agua de un hormigón sin modificar su consistencia en estado fresco o viceversa, aumentar la consistencia sin aumentar la dosificación de agua de un hormigón, o incluso puede producir ambos efectos.

En la práctica, este aumento de la consistencia se traduce en una mejor trabajabilidad, en el sentido de lograr una mejora de la puesta en obra o de la capacidad de bombeo del hormigón.

En el sentido que atañe al proyecto, este tipo de aditivos favorece la ya de por si poca manejabilidad de un hormigón fabricado con fibras metálicas. Además de esto, se consigue no interferir en las resistencias del hormigón ni en su durabilidad, logrando incluso una mejora de ambas propiedades.

Dentro de la gama de aditivos disponibles en el mercado se utiliza el aditivo superplastificante MasterGlenium SKY 604, que es un aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en policarboxilatos para aplicaciones en hormigón preparado, donde se demande alta resistencia inicial. Su excelente poder plastificante y sus elevadas resistencias iniciales, incluso a dosificaciones bajas, hacen del MasterGlenium SKY 604 el aditivo ideal para la industria del hormigón preparado y obra civil.

Este aditivo se adiciona al hormigón con la última parte del agua de amasado en una dosificación entre el 0,3 % y el 1%. Es un líquido amarillento turbio, que tiene un pH a 20 °C de $1,048 \pm 0,02$ g/cm³ y un contenido en cloruros inferior al 0,1 %.

1.3. Propiedades del hormigón de alta densidad para la protección frente a la radiación

1.3.1. Propiedades físicas

Entendiéndose estas como la terna densidad, porosidad accesible y coeficiente de absorción.

En la densidad del hormigón influyen diferentes factores, el más importante es la densidad real de los áridos, puesto que estos son el mayor elemento composicional de la mezcla. Otro factor es la granulometría de los propios áridos, en el sentido de proporcionar un agregado bien graduado, que rellene lo más posible los huecos que se forman entre los propios de las fracciones mayores, aumentando la compacidad. Otro factor importante es la porosidad de la pasta de cemento.

El agua de hidratación empleado es importante, está reflejado en la relación de agua/cemento y afecta más negativamente cuanto mayor es esta relación. Cuanta más agua es empleada más poros se forman después de la hidratación del cemento, poros que están rellenos de aire y reducen la densidad del hormigón.

El empleo de armaduras, o de fibras de acero en este caso, repercute en la densidad en el sentido de que se incorpora un volumen de material con una densidad casi doble que la de los áridos. El otro componente del hormigón que afecta a esta propiedad son los aditivos, existiendo aditivos aireantes que producen un aumento del aire ocluido en el hormigón formando un sistema de burbujas cuasimicroscópico que mejora la trabajabilidad del hormigón.

Definidos todos los componentes, quedan definir los procesos que modifican la densidad del hormigón. Estos procesos son los inherentes a la fase de compactación y puesta en obra, en las que se persigue reducir el volumen de huecos del hormigón en estado fresco, aumentando la compacidad. El nivel de compactación logrado depende de la energía consumida durante el proceso, que es proporcional al tiempo de aplicación, y también depende de la técnica de compactación empleada. El vibrado con barra supone la técnica más arcaica, es ejecutado mediante una varilla y es válido para hormigones de consistencia blandas o fluidas. El apisonado se realiza con capas de hormigón que no superan los 30 cm en hormigones secos y blandos. La compactación por vibrado es el sistema más común y permite el tratamiento de hormigones secos o plásticos. Existen además técnicas que elevan aún más la compactación del hormigón, como el centrifugado, que está destinado sobre todo para el hormigonado de tuberías, y el hormigón proyectado (shotcrete), para hormigones relativamente secos que requieran de una mayor impermeabilidad o la adherencia a una superficie de aplicación para obtener la forma de superficie deseada.

De forma general, a un hormigón denso se le asocian buenas características en términos de durabilidad y resistencia, y la mejora de esta propiedad depende de la dosificación, el modo de compactación, la puesta en obra y su correcto curado.

En términos de protección radiológica, la densidad es una propiedad a maximizar considerando que la atenuación de la radiación gamma depende directamente de la constante del material, y esta a su vez depende de su densidad y su número atómico. Esta situación cambia cuando se pretende diseñar un hormigón que sirva de protección contra la radiación neutrónica, donde también se persigue la presencia de ingredientes que contengan hidrógeno combinado o agua adsorbida, estableciendo una solución de compromiso que satisfaga ambos requerimientos.

Existen estudios que proponen el uso de diversos cuerpos metálicos para conseguir un aumento ostensible de la densidad del hormigón, como el propuesto por Peng y Hwang (2011) que emplea bolas de acero de diversos diámetros para conseguir densidades que alcanzan los 5000

kg/m³ o Sivathanu et al. (2016), que emplea un compuesto formado por agregados de hematita y bolas de un compuesto rico en cromo y carbono que elevan la densidad del árido hasta los 4600 kg/m³.

La porosidad está íntimamente ligada con la densidad del hormigón e influenciada por la relación de agua/cemento además de por la edad del hormigón (Brunauer, 1965). Además, pueden modificarse las propiedades de las microestructuras de poros para definir el progreso de la madurez caracterizado por la hidrólisis, la hidratación y la disposición (Lichtner y Hundt, 1974)

En el caso de hormigones para protección radiológica, se debe de compactar el hormigón al máximo para evitar zonas con aire (vibrar a altas frecuencias), aunque puede ser beneficioso contar con pequeñas cantidades de aire creadas deliberadamente para evitar agua aflore en superficie de hormigón fresco y reteniéndola en el proceso de hidratación. Contar con el 1% del volumen total de poros de tamaño 1 µm no debería de afectar negativamente a la eficacia del blindaje del hormigón de alta densidad (Samarin, 2013b).

1.3.2. Propiedades mecánicas

1.3.2.1. Resistencia a compresión uniaxial

La resistencia a compresión es una propiedad esencial del hormigón estructural. Las variables que son decisivas en la resistencia final del hormigón endurecido son numerosas.

El cemento, como material activo de la mezcla influye en la resistencia del hormigón a cualquier edad. A una mayor dosificación de cemento le corresponde una mayor resistencia a compresión, al igual que influye la clase resistente del propio cemento y el valor de resistencia inicial.

Existe una relación inversamente proporcional entre la relación de agua/cemento utilizada y la resistencia del hormigón. Este parámetro puede definirse como el más crítico en términos de resistencia. La relación de agua/cemento puede aumentar o bien aumentando la cantidad de agua o bien disminuyendo la cantidad de cemento. Es práctica habitual aumentar la cantidad de agua durante la amasada para conseguir los valores de asentamiento buscados, esta práctica debe de evitarse para garantizar la resistencia del hormigón con que fue diseñado.

En cuanto a los áridos empleados en la elaboración del hormigón, han de tener una distribución granulométrica lo más homogénea posible para conseguir una densidad óptima en estado endurecido, propiedad íntimamente relacionada con la resistencia del hormigón.

La forma y textura superficial de los áridos condicionan la forma y el grado en que estos se adhieren a la pasta cementicia, prefiriéndose áridos rugosos de forma cúbica para obtener mayores valores de resistencia. Asimismo, el tamaño máximo de los áridos para hormigones de resistencia intermedia ha de ser mayor para obtener una mayor eficiencia del cemento.

Factores externos que determinan la resistencia del hormigón son principalmente el curado, la edad y la temperatura de curado. Un curado óptimo conlleva una continua hidratación de los granos de cemento, así como una temperatura más alta (sin ser muy alta) conlleva un curado precoz que no afecta a la resistencia final. Más edad conlleva siempre una mayor resistencia.

Existen estudios que analizan la variación de la resistencia a compresión de hormigones que han sido sometidos a radiación gamma. La variación de la resistencia a compresión sólo ocurre a partir de ciertos flujos neutrónicos, los hormigones para protección radiológica experimentan una pérdida acusada en los rangos de $1,0-2,0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$, y la resistencia a compresión residual se sitúa en el 50% de la resistencia inicial para valores en torno a los $2,0 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$. Los mecanismos que afectan a estos procesos de pérdida de resistencia son, por un lado, mecanismos de daño intrínsecos a la pasta de cemento (térmicos y daños inducidos por la

radiación gamma) y por mecanismos de daño inducidos por el árido, como la rotura inducida por restricciones de la deformación (Field et al.,2015).

1.3.2.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón depende del módulo de elasticidad de los áridos y de la matriz de cemento, además de las proporciones presentes de cada uno de ellos. El módulo elástico del hormigón es casi constante cuando es sometido a esfuerzos relativamente pequeños, pero comienza a decrecer conforme las sollicitaciones alcanzan altos valores, valores que inician la rotura de la matriz. Un módulo elástico típico para la pasta de cemento suele rondar los 10-30 GPa, mientras que el módulo típico del agregado se sitúa en el rango de los 45-85 GPa. El módulo medio para un hormigón típico se sitúa en los 30-50 GPa.

El módulo elástico de hormigones irradiados con radiación desciende de menor modo que en la resistencia a compresión o la resistencia a tracción. Al igual que en ambos casos, el módulo permanece invariante para flujos neutrónicos bajos, y se observa una tendencia de pérdida de módulo para valores de $2,0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ (Field et al.,2015b). La pérdida de módulo es justificada por diversos autores debido a dos efectos simultáneos, por un lado, las altas temperaturas y por otro, la exposición a la radiación. El módulo elástico desciende conforme la temperatura de exposición aumenta (Xiao y Konig, 2004).

1.3.2.3. Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta corresponde con un ensayo cada vez más en auge, que determina una propiedad muy relacionada con la resistencia a compresión del material. La configuración de las cargas provoca un esfuerzo de tracción en el plano de prolongación del esfuerzo, esta tracción es la que provoca la rotura diametral de la probeta.

La magnitud de esta propiedad viene determinada, en gran parte, por la adherencia entre áridos y pasta de cemento en la zona de transición, que a su vez depende del tamaño máximo del árido, de su limpieza superficial, de la geometría del mismo y del tipo de cemento.

La motivación principal para la realización de este ensayo es conocer el comportamiento frente a la fisuración, que no es más que el agotamiento de este cuando está sometido a esfuerzos de flexotracción, cortante o de retracción.

1.3.2.4. Resistencia a flexotracción

Propiedad en que el hormigón no destaca, consistente en la actuación de fuerzas en sentido perpendicular al eje del elemento, que tienden a doblarlo provocando su flexión y un esfuerzo de tracción en la cara más alejada al punto de aplicación de la fuerza. Esta propiedad es muy sensible al tamaño de los áridos y a las proporciones de la mezcla, así como a la distribución de las fibras en caso de que las hubiere.

La influencia de la radiación neutrónica sobre la resistencia a flexión del hormigón de alta densidad es mayor que sobre la resistencia a compresión. La resistencia a flexión residual para flujos neutrónicos de $2,0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ es del 25% del valor inicial, comparado con el 50% del valor inicial en el caso de la resistencia a compresión (Field et al.,2015c). Además, esta pérdida de resistencia a tracción es más acusada con el aumento de la temperatura. En cualquier caso, la pérdida de resistencias debido al efecto de la radiación es mucho menor que las debidas al efecto de la temperatura en este caso.

1.3.3. Durabilidad

Entendida como la capacidad que tiene el hormigón de resistir los ataques químicos, físicos y biológicos y cualquier acción del ambiente a la que es sometido y tiende a deteriorarlo. Las

condiciones del entorno definen la clase de exposición, un factor importante a la hora de elegir el conglomerante a utilizar.

Los ataques físicos son principalmente producidos por variaciones de temperatura, de humedad y de radiación. Los efectos que estos producen van desde fisuraciones (en el cemento principalmente) a erosiones y trituración.

Los ataques químicos vienen producidos por el aire y otros gases, así como por aguas con compuestos agresivos en dilución, productos químicos y suelos minerales. Entre los efectos que estos pueden producir están el despegue de las fases pasta-árido, la reacción de diversos compuestos para la formación de otros agresivos o reacciones de ácidos.

Para cumplir unas condiciones en términos de durabilidad lo más eficientemente, el hormigón ha de elaborarse con una correcta granulometría, con un contenido en cemento lo suficientemente rico y con un contenido en agua que debe limitarse a asegurar la impermeabilidad y la compacidad del hormigón, y finalmente, con calidad en cuanto a su compactación y curado (Escorihuela y Fernández-Peña, 1976).

1.3.3.1. Permeabilidad al oxígeno

El ensayo de permeabilidad al oxígeno constituye un ensayo no destructivo que pretende caracterizar la durabilidad potencial de un hormigón dado, midiendo la resistencia que ofrece a la penetración de medios agresivos, tales como cloruros, o la exposición a la carbonatación, ataques químicos o situaciones de hielo-deshielo.

Esta permeabilidad se mide como la facilidad que posee un fluido para atravesar el hormigón cuando está sometido a un diferencial de presión y está relacionada con la porosidad del propio hormigón, aunque no siempre es así. La permeabilidad no depende de la porosidad total sino de la porosidad permeable (*Determinación de la porosidad y la permeabilidad del hormigón endurecido*). La permeabilidad de un material se determina mediante el coeficiente de permeabilidad de la ley de Darcy del flujo de un fluido en un medio poroso.

El desempeño de una función protectora frente a estos agentes agresivos lo realiza una capa superficial de 2 a 5 cm (Torrent, 1999) cuya respuesta frente a agentes externos es determinada por el grado de compactación al que ha sido sometido el hormigón, por las tareas de acabado, grado de curación del hormigón o fenómenos de segregación, entre otros.

En el caso de la permeabilidad al oxígeno, los huecos requeridos para la circulación del fluido no son de grandes dimensiones, por lo que el gas circula con mayor facilidad que los fluidos líquidos.

1.3.3.2. Permeabilidad al agua bajo presión

La justificación de la determinación de la permeabilidad al agua bajo presión es análoga a la descrita para la determinación de la permeabilidad al oxígeno. En este caso el medio penetrante es agua, con una viscosidad dinámica mucho mayor, el hormigón ofrece una permeabilidad mucho menor que al aire.

Fue Klinkenberg quien demostró la correlación entre la permeabilidad de los gases y la de los líquidos, en dicha correlación se demostró que la permeabilidad del gas depende mucho más de la presión y que a bajos valores de esta, los valores obtenidos de permeabilidad son mayores a los de la permeabilidad real, debiendo de realizarse una serie de correcciones.

El agua puede llevar disueltos cloruros u otros químicos que pueden degradar tanto la pasta como las armaduras que incorporan el hormigón. Asimismo, el ingreso de agua en el sistema

capilar puede suponer un riesgo cuando las condiciones de conservación favorecen la congelación del mismo.

Un factor determinante en la permeabilidad del hormigón, además de la compactación, es la relación de agua/cemento. El aumento de esta relación propicia la aparición de poros llenos de agua que, una vez concluida la fase de hidratación de la pasta, se vacían, creándose una red capilar que, estando interconectada conforma una estructura permeable culpable del comportamiento permeable del hormigón.

La EHE establece una penetración máxima de 5 cm para un hormigón con una permeabilidad al agua bajo presión aceptable. Las características específicas de un proyecto concreto pueden justificar la aparición de valores superiores cuando el desempeño del hormigón no es puramente estructural.

1.3.3.3. Ciclos de humedad-sequedad

Los ciclos de humedad-sequedad suponen una de las condiciones más agresivas a las que el hormigón se puede enfrentar. Durante estos ciclos se produce un cambio en la humedad del interior del hormigón, cambio que se da hasta una profundidad límite denominada profundidad de influencia.

Durante los ciclos de humedad, a medida que el hormigón adquiere agua, ocurre un aumento rápido de la humedad del interior en un corto periodo de tiempo para finalmente alcanzar una humedad relativa de entorno al 100%. Durante los ciclos de sequedad, a medida que el hormigón se seca, la humedad relativa no se reduce inmediatamente, sino que se reduce de manera más gradual (Zhang et al., 2012).

La variación de la humedad sucede por hidratación del cemento y por difusión del agua. Esta difusión, se puede producir del hormigón al medio o viceversa, dependiendo de la diferencia de humedades entre ambos. Estos dos fenómenos ocurren tanto en el curado como en los ciclos de humedad-sequedad.

El estudio del contenido en agua de los poros de hormigón que están sometidos a condiciones de humedad-sequedad es importante, en el sentido de predecir y prever la rotura inducida por la retracción, la transmisión de agentes agresivos y para el diseño de un hormigón con una alta durabilidad.

1.3.3.4. Retracción por secado

Constituye una contracción de volumen por la pérdida de agua o secado del hormigón. Este fenómeno ocasiona fisuras cuando el efecto es lo suficientemente acusado, pudiendo tener un carácter permanente o temporal. Existe una larga lista de factores que afectan a la retracción del hormigón.

La utilización de cementos rápidos, reduce drásticamente el tiempo de fraguado del hormigón, que pueden alcanzar el máximo de dureza en tan sólo media hora. En este tipo de hormigones la retracción es mayor.

El uso de cementos finamente molidos, cementos con una finura Blaine de en torno a 800 m²/kg, están compuestos por cemento Portland, escoria granulada de alto horno y adiciones minerales y suele sufrir retracciones mayores.

El incremento de la relación de agua/cemento afecta de manera negativa a la retracción, así como una baja proporción de áridos, que incrementa la contracción de la pasta de cemento. El

incremento del tamaño de la pieza de hormigón disminuye la retracción, pero la retracción se diluye más en el tiempo.

Uno de los factores que afecta positivamente a la retracción es la presencia de una armadura o de fibras, cuyo refuerzo se opone a tensiones de contracción y retracción. Por último, cabe resaltar la importancia que juega la humedad del propio ambiente en que desempeña su vida útil el hormigón, cuanto más humedad contenga el ambiente de menor grado será la retracción que sufra el hormigón.

1.3.4. Comportamiento frente a altas temperaturas

La energía asociada a la radiación gamma corresponde a fotones gamma de una determinada longitud de onda. Para cualquier fotón se puede calcular su energía mediante la relación de Planck:

$$E = hf$$

Donde:

- h es el cuanto elemental de acción o constante de Planck ($h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$).
- f es la frecuencia de la onda electromagnética asociada al fotón ($> 10^{19} \text{ Hz}$).
- E es la energía de un fotón.

Asimismo, esta energía puede convertirse en temperatura absoluta mediante la ecuación de la energía característica:

$$E = k_B T$$

Donde:

- k_B es la constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).
- T es la temperatura absoluta (K).
- E es la energía de un fotón ($\approx 10^6 \text{ eV}$).

Así pues, uno de los efectos de la radiación gamma sobre el hormigón consiste en la elevación de su temperatura, elevación que, en el caso de hormigones de atenuación radiológica en vasijas de centrales nucleares, puede rondar los 250 °C. Otra fuente inequívoca de aumento en la temperatura del hormigón en estado de servicio es la derivada por incendios en accidentes puntuales. Queda justificado pues, un estudio exhaustivo de los efectos de la temperatura sobre las propiedades del hormigón endurecido, enfocado a conocer sus resistencias residuales, así como otras de sus propiedades.

Las principales modificaciones causadas por el efecto de la temperatura en el hormigón son debidas o están influenciadas principalmente por la pérdida de agua. Con temperaturas entre 30 y 120 °C existe una pérdida del agua libre y de una parte del agua adsorbida. A 120 °C toda el agua no ligada se pierde. Entre los 180 y 300 °C comienzan las primeras etapas de desecación del gel C-S-H debido a la pérdida del agua ligada. Es a partir de los 300 °C cuando el hormigón comienza a perder sus resistencias y las primeras fisuras superficiales comienzan a aparecer (*Lion et al., 2005*).

A medida que la temperatura aumenta, lo hace el tamaño de los poros, llegándose a detectar pequeñas micro roturas a temperaturas cercanas a los 250 °C, temperaturas para las cuales la permeabilidad a los gases se septuplica. Este aumento en la permeabilidad se produce por

ambos fenómenos, aparición de micro roturas y pérdida del agua contenido en los poros y del agua ligada (Lion et al., 2005b).

En cuanto a la pérdida de peso, esta es marcada debido al proceso de secado durante la radiación. También se produce pérdida de peso debido a la generación de gases (H, O, N, CO y CO₂ principalmente) en el hormigón debido a la radiólisis del agua evaporándose durante el secado a altas temperaturas (Hilsdorf et al., 1978).

La resistencia a compresión del hormigón es modificada durante su calentamiento. Existen estudios que remarcan la inalterabilidad de la resistencia cuando es sometido a temperaturas máximas de 400 °C. Es en el rango de las temperaturas 400 °C - 800°C cuando el hormigón pierde la mayoría de su resistencia, especialmente a temperaturas superiores a los 600 °C. Este hecho es debido a la deshidratación en un mayor grado del gel C-S-H que a temperaturas inferiores. A temperaturas extremas (>1000 °C) se han reportado mejoras en la resistencia residual debidas a reacciones de sinterización (movimientos de los átomos por el aumento de temperatura (Chang et al., 1999).

Los efectos de la exposición frente a altas temperaturas incluyen la reducción de la resistencia, la fisuración y el *spalling*.

El fenómeno conocido como *spalling* es producido cuando hay presencia de agua libre en el interior de los poros inaccesibles del hormigón. Este agua intersticial aumenta de presión cuando es sometida a altas temperaturas y esto desemboca en un aumento considerable de presión. Este hecho unido a la existencia de tensiones térmicas en el propio hormigón cuando es sometido a temperaturas extremas propicia un derrumbamiento del hormigón que puede llegar a ser explosivo. Hay estudios que aseveran que el *spalling* solo acontece cuando la resistencia a compresión del hormigón es inferior a 60 MPa [Le Pape y Remec, 2015].

La fisuración es producida por la descomposición de los productos de hidratación del cemento, en la que hay roturas a nivel de pasta de cemento, alrededor de las partículas del árido.

Por último, son varios los factores que afectan a la resistencia intrínseca del hormigón. Desde el punto de las condiciones externas, la velocidad de calentamiento y la temperatura de pico son dos factores clave en la variación de las características resistentes del hormigón. El otro punto de vista comprende los materiales constituyentes del hormigón. Para unas condiciones de calentamiento dadas, los factores que disminuyen la resistencia del hormigón son la deshidratación del silicato cálcico hidratado, la incompatibilidad térmica entre agregado y pasta de cemento y la presión de los poros dentro de la pasta de cemento (Peng y Hwang, 2011b).

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

En el presente capítulo se describen cada uno de los ensayos involucrados en el desarrollo del estudio en lo que a metodología o modo de proceder se refiere, así como las mismas en cuanto a especificaciones detalladas de los componentes materiales que son utilizados.

La metodología de muchos de los ensayos realizados está basada en la aplicación directa de la norma correspondiente. En otros casos, debido a la naturaleza del propio hormigón o a la singularidad del árido se opta por procedimientos distintos, desarrollados en el propio laboratorio y que son fruto de la experiencia.

Asimismo, se describe la metodología empleada en cada uno de los ensayos realizados en la caracterización de todos los elementos inherentes al hormigón: cemento, áridos de alta densidad y fibras utilizadas, así como de la determinación de las propiedades esenciales del propio hormigón, desde la planificación de su dosificación y procedimiento de amasado y curado

hasta sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad, extendiéndose hasta su comportamiento frente a altas temperaturas.

2.1. Caracterización del cemento

El aglutinante utilizado en el presente estudio es un cemento Portland CEM I 52,5N. El cemento de Portland es el aglomerante más utilizado en construcción y dentro de los más comunes el más resistente. Además, es el más adecuado a que la cantidad incorporada será la mínima necesaria atendiendo a una solución de compromiso densidad - cantidad de cemento.

2.1.1. Densidad

La densidad es un parámetro físico de alta importancia y lo es más cuando uno de los objetivos del proyecto es lograr elaborar un hormigón del mayor peso específico posible. El cemento, como parte del hormigón, contribuye en el valor final de la densidad global y aunque se debería reducir su dosificación al máximo para maximizar este aspecto.

La densidad se determina mediante el ensayo UNE 80103-2013. *“Métodos de ensayos de cementos. Determinación de la densidad real”*.

El material de laboratorio preciso para la realización del ensayo consta de un horno o desecador, una balanza de precisión con una resolución de 0,01 g), un matraz de Le Chatelier de 24 cm³, una cucharilla y líquido que no reaccione con el cemento, generalmente alcohol.

El ensayo consta de diferentes pasos, según se describe a continuación:

1. Se toma la muestra sobre un cacito adecuándose a la norma UNE-EN 196-7, secada previamente en estufa a 105°C durante 24 horas y se deja atemperar antes de realizar cualquier pesada.
2. Se lava el matraz con agua, se aclara y seca, posteriormente es vertido el propanol en su interior con la ayuda de una botella lavadora hasta alcanzar un nivel inicial de entre 0 y 1 cm³ anotando el nivel que alcanza el borde superior de la burbuja de aire después de sumergir el recipiente en baño termostático, siendo este el volumen inicial v_i . Se toma el peso del cacito con el material p_i .
3. Se introduce con la ayuda de una cucharilla el cemento en el interior del matraz, el vertido se realiza de forma lenta y en pequeñas cantidades, evitando tapones y salpicaduras, sirviéndose de la ayuda de un pequeño embudo, evitando en la medida de lo posible adherencias del mismo en las caras interiores del matraz.
4. Después de verter el cemento se procede removiendo el matraz con un movimiento suave, circular y horizontal e incluso inclinándolo verticalmente previa colocación de su correspondiente tapón, en caso de quedar adheridas cantidades de material en la superficie interior.
5. La adición de cemento finaliza cuando el nivel del fluido ha ascendido hasta algún punto entre las marcas superiores del matraz. Llegado a este punto se procederá a dar unos golpecitos en la parte inferior, previa remoción y anterior a la lectura de la burbuja de aire en su borde superior, después de baño termostático y de haber dejado unos minutos el matraz en reposo. Este valor es el volumen final v_f . Se pesa el cacito después de haber utilizado el material requerido y se pesa siendo este peso p_f .

La diferencia entre las lecturas final e inicial arroja un incremento de volumen que corresponde con el volumen que ocupa el material en el seno del fluido. La diferencia de las masas del cacito en su estado inicial y final corresponde con la masa de material incorporado al seno del fluido. La densidad real d_R se calcula como el incremento de masa entre el incremento de peso:

$$d_R = (P_i - P_f)/(V_f - V_i)$$

2.1.2. Superficie específica Blaine

Ensayo normalizado según UNE-EN 196-6:2010 “*Métodos de ensayo de cementos. Determinación de la finura*”. El equipo utilizado para dicho ensayo consta de célula de permeabilidad, émbolo y disco perforado, dos discos de papel de filtro, un tubo manométrico, líquido manométrico, balanza de precisión y cámara de grabación (Fig. 6).

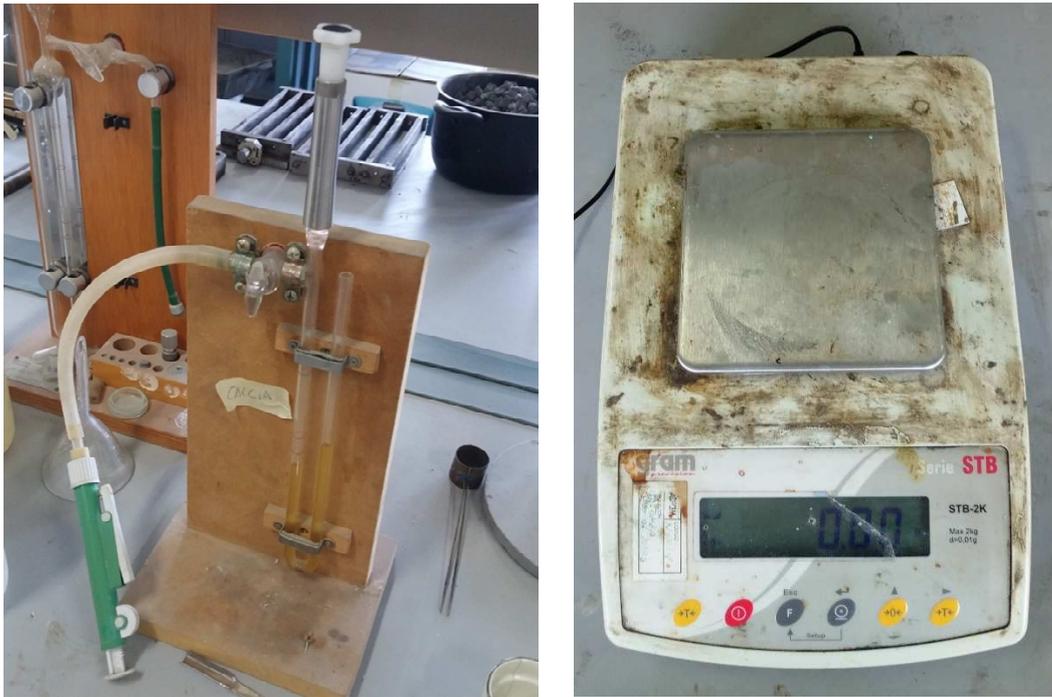


Fig. 6. Permeabilímetro Blaine (izda) y balanza de precisión (dcha).

El valor obtenido en el ensayo refleja la relación entre el área superficial y la masa del sólido y da una idea de la hidraulicidad y del comportamiento del cemento frente al fraguado, ya que la finura influirá proporcionalmente en la velocidad de las reacciones que se produzcan en el seno del cemento.

El proceso de este ensayo comienza con el cálculo previo de la masa de cemento requerida por el propio ensayo. Esta cantidad de cemento requiere del cálculo previo de la densidad del mismo y es calculada a través de la expresión:

$$m = 1,93 * 0,415 * \rho$$

Donde los dos primeros factores corresponden con el volumen de la capa de cemento y la porosidad

La cantidad requerida de cemento se introduce en la célula de permeabilidad, un cilindro abierto en los dos extremos, previa colocación del disco perforado, cuya parte superior queda tapada con un papel filtro.

A continuación, se vierte el material sobre dicho filtro, el cual se sitúa a mitad de la célula, y una vez vertido se coloca otro papel filtro a modo de sello. Posteriormente se coloca el tapón superior de la célula y se presiona hasta que encaja totalmente en el interior del mismo. Se gira

dicha tapa superior 90° a la vez que se presiona levemente y se retira posteriormente. Se retira la tapa superior y se coloca la célula en el permeabilímetro.

Dicho aparato consta de un piezómetro en U que contiene aceite. Un extremo del piezómetro descarga a la atmósfera mientras que el otro extremo acaba en el cilindro metálico que ha sido rellenado con el cemento a analizar. Sobre este cilindro es colocado un tapón de goma con el fin de generar vacío entre la columna de aceite y el propio tapón.

Debajo del cilindro se sitúa una llave de mariposa. Esta pasa de estar en posición cerrada a estar en posición abierta, y conecta el piezómetro con un tubo polimérico en cuyo extremo hay colocado un pipeteador con el que se regula manualmente la presión.

El primer paso operativo es disminuir la presión de dicho tubo extrayendo aire del lado del piezómetro conectado al mismo, y por consiguiente elevando la lámina de aceite del piezómetro a ese mismo lado. Una vez alcanzada la marca superior se cierra la llave mariposa y se retira el tapón colocado en la parte superior del cilindro interrumpiendo el vacío. Ahora la columna de aceite comienza a descender del lado en que está situado el cilindro debido a que su extremo está a presión atmosférica y ambas columnas del piezómetro tenderán a nivelarse.

La velocidad de descenso del aceite es lenta, y proporcional al espacio accesible dentro de la masa de cemento, proporcional a su vez a la superficie específica del mismo.

El proceso es filmado y el tiempo de descenso del aceite entre ambas marcas es tomado en la edición del video. La superficie específica Blaine (cm^2/g) es calculada a partir de la expresión:

$$S_{Blaine} = 524,2 \cdot k \frac{\sqrt{t}}{\rho}$$

k = Constante del aparato = 26,17

t = tiempo medio de flujo (3 series de medida)

2.2. Caracterización de los áridos de alta densidad

Para la caracterización de los áridos utilizados en la elaboración de hormigón se han llevado a cabo ensayos de diversa índole. Entre estos ensayos se encuentran la caracterización composicional, basado en sus características microscópicas, así como una larga caracterización geométrica, determinándose su forma, así como sus dimensiones. Estos ensayos los completan los propios para la determinación de sus propiedades físicas como lo son densidad, porosidad y absorción y la evaluación de sus propiedades mecánicas.

Los áridos incluidos en el estudio son íntegramente magnetita y constan de tres fracciones, 0/2, 0/8S y 0/20S (Fig. 7), de las que sólo se utilizarán las dos últimas, como ya se detallará más adelante. A continuación, se detalla la metodología desarrollada en cada ensayo y la normativa aplicada cuando la hubiere.



Fig. 7. Detalle de los áridos empleados. A la izda. La grava (0/20), a la derecha la gravilla (0/8).

2.2.1. Análisis microestructural y químico

Para la realización de estos análisis se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido (SEM). En comparación con la microscopía óptica se utiliza un haz de electrones que sustituye al haz óptico, consiguiendo una resolución mucho mayor que en ocasiones alcanza el nanómetro.

La metodología de este ensayo consiste en seleccionar una muestra totalmente seca y representativa del árido y colocarla en un recipiente portamuestras que es introducido en el microscopio. Al iniciarse el ensayo se emite un barrido de haz de electrones que incide sobre la muestra, esta ha sido rociada con una fina capa de oro o carbón en un proceso de pulverización con el fin de incrementar sus propiedades conductoras. Cuando el haz de barrido alcanza dicha superficie conductora se generan electrones retrodispersados y electrones secundarios además de radiación electromagnética. Esta energía emitida es captada por unos sensores, estos transforman la energía de los electrones secundarios en imágenes de gran definición, la energía de los electrones retrodispersados en imágenes de superficie de gran contraste, y la radiación electromagnética en espectrografías que permiten obtener la composición química elemental de la muestra.

De este ensayo se obtienen imágenes de la microestructura del árido, donde se pueden apreciar tanto las texturas como las impurezas presentes en su superficie, así como fases cristalinas e incluso fisuraciones. De igual modo se obtienen los espectros composicionales de las superficies de árido seleccionadas, donde se han seleccionado varias superficies con distinto color y textura para cubrir un análisis composicional lo más completo posible. El microscopio está equipado con EDX para determinar la composición química elemental.

2.2.2. Determinación de las propiedades dimensionales y geométricas

Con el objetivo de caracterizar los áridos, se han determinado las propiedades geométricas y dimensionales. En primer lugar, se ha definido la granulometría de cada una de las tres fracciones de áridos. Posteriormente se procede con la caracterización geométrica que provee la determinación del coeficiente de forma e índice de lajas. El apartado concluye con la caracterización de las propiedades físicas consistentes en la determinación de densidad, absorción y porosidad accesible.

2.2.2.1. Granulometrías

El análisis granulométrico se ha realizado según la norma UNE – EN 933 – 1:2012 “*Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*”. En la norma anteriormente mencionada se estipula una cantidad mínima a utilizar correspondiente con el tamaño máximo del árido. En el presente caso de estudio, para un tamaño máximo de 20 mm se establece una cantidad no inferior a 20 kg de material, aunque el árido tratado es muy denso y el volumen es notablemente menor que el de un árido calizo, por ejemplo. Esta cantidad proviene de una saca tal y como es suministrada por el fabricante, el árido es previamente cuarteado y homogeneizado mediante el uso de rifles.

El siguiente paso consiste en la eliminación de la humedad presente en el árido mediante el secado en estufa a 105°C hasta que no exista variación en la masa. Se determina así el peso seco de la muestra y se procede con el tamizado del material mediante una tamizadora de vaivén. (foto)

Sobre dicha tamizadora (Fig. 8) se coloca la serie de tamices de la norma UNE, para cada fracción se coloca la serie desde el tamiz más pequeño hasta el tamiz por el que pasa el 100 % del material. La serie completa la integran los tamices:

0,063-0,125-0,25-0,4-0,5-1-1,25-1,6-2-2,5-4-5-5,6-6,3-8-10-11,2-12,5-14-16

El tamiz superior para cada una de las tres fracciones se establece en 16 mm para el árido 0/20, 8 mm para el árido 0/8S y de 4 mm para el de 0/2.

Una vez colocada la serie de tamices en la tamizadora se procede con el vertido de material y funcionamiento de la misma durante 2 minutos, tras los cuales el contenido de cada fracción, a partir de ahora llamado retenido, es pesado y utilizado para la confección de la curva granulométrica. Esta curva granulométrica representa el porcentaje en masa del retenido en cada fracción, información vital para la confección de la dosificación del hormigón. El retenido en cada fracción puede calcularse como:

$$ret_n(\%) = \frac{m_{ret}}{m_t} \cdot 100$$

Siendo:

- m_{ret} la masa de material retenida en cada fracción.
- m_t la masa total de material.



Fig. 8. Tamizadora de vaivén.

Con los resultados anteriormente obtenidos pueden obtenerse distintos parámetros utilizados tradicionalmente en la caracterización de suelos que definen como están distribuidos diferentes tamaños de árido en la masa. Para ello se define como Coeficiente de Uniformidad D_u a la relación entre el tamaño de tamiz bajo el cual quedan retenidas el 60% de las partículas y el tamaño de tamiz bajo el cual queda retenido el 10% de las partículas.

$$D_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Cuanto menor sea el coeficiente de uniformidad, más uniforme será la granulometría. Otro coeficiente ampliamente utilizado en la caracterización de suelos es el coeficiente de curvatura C_c , de forma similar al anterior indica como de bien graduada está la distribución de tamaños de partícula en la masa, estableciéndose valores entre 1 y 3 para curvas bien graduadas.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

2.2.2.2. Índice de lajas

Existen múltiples opciones para la determinación de la forma del árido que van desde la utilización de técnicas de microscopía y el cálculo del índice de angulosidad hasta la determinación del índice de lajas y el coeficiente de forma.

El índice de lajas se determina mediante el ensayo normalizado descrito por la norma UNE – EN 933 – 3 “Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas”. Para la realización de este ensayo ha de separarse el árido contenido entre los tamices de 4 y 80 mm, el resto es descartado.

Este índice trata de cuantificar la presencia de partículas planas o lamosas existentes en el árido, hallando un promedio del contenido de las mismas.

El primer paso consiste en realizar un tamizado del árido previamente seleccionado, para posteriormente seleccionar los tamices de barras a utilizar en el ensayo. Se han de considerar necesarios los tamices de barras correspondientes con una apertura mitad que el diámetro de la luz de malla del tamiz, según se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Índice de lamosas.

Fracción d/D (mm)	Abertura del tamiz de barras (mm)
16/20	10
12,5/16	8
10/12,5	6,3
8/10	5
6,3/8	4
5/6,3	3,15
4/5	2,5

El árido retenido entre los diámetros señalados se ensaya con el tamiz de barras correspondiente, realizando un movimiento manual horizontal de vaivén durante un minuto. El índice de lamosas se expresa como la relación entre la masa de partículas retenidas en el tamiz de barras P_2 y la masa de material retenido en el tamiz de malla P_1 expresado en tanto por ciento.

$$IL = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

Se define el índice de lamosas total IL_T como el sumatorio del índice de lamosas IL de cada fracción para un mismo árido:

$$IL_T = \sum IL$$

2.2.2.3. Coeficiente de forma

El coeficiente de forma se obtiene según el ensayo UNE – EN 933 – 4 “ *Determinación de la forma de los áridos. Coeficiente de forma*”. Este ensayo trata de determinar la presencia de áridos aciculares o laminares mediante la medición y la relación de sus dimensiones máxima y mínima.

Para determinar este coeficiente ha de separarse el árido en fracciones tales que cumplan la condición de que el tamaño inferior d_i sea al menos dos veces menor que el tamaño superior D_i y la masa mínima de muestra dependerá del tamaño máximo del árido.

Sobre estas fracciones han de ser medidas la longitud L y el espesor o anchura E (el menor de ambos). Las partículas cuya relación longitud/espesor sea superior o igual a tres son consideradas partículas no cúbicas.

$$\text{Si } \frac{L}{E} \geq 3 \rightarrow \text{no cúbica}$$

El coeficiente de forma es definido como la relación entre masa de partículas no cúbicas y la masa de partículas de la fracción correspondiente:

$$CF(\%) = \frac{PNC}{P_1} \cdot 100$$

Se puede definir un coeficiente de forma global promediando ponderadamente con la masa el coeficiente de forma de cada fracción. En general, un árido redondeado o que dispone de una forma cúbica aporta mayores capacidades resistentes al hormigón que uno lajoso o planar.

2.2.4. Determinación de la densidad de los áridos

Dentro del capítulo de propiedades físicas se han determinado las densidades aparente, real y saturada. Cabe mencionar la importancia de la determinación de la densidad de los áridos empleados, pues es una de las principales características que lo hacen ideal para su utilización como agregado para hormigón de protección radiológica. Este tipo de ensayos conviene además realizarlos con el objetivo de cotejar los valores que ofrece el fabricante con los reales.

Los áridos de los que se dispone para formar parte del agregado del hormigón a diseñar constan de tres tamaños:

- 0/2: con fracciones inferiores a 2 mm, a partir de ahora denominado árido fino o arena.
- 0/8S: con fracciones inferiores a 8 mm, a partir de ahora denominado árido medio o gravilla
- 0/20S: con fracciones inferiores a 20 mm, a partir de ahora denominado árido grueso o grava

Para el árido 0/2 o arena, se procede para la determinación de la densidad real del árido de manera análoga a la realizada con el cemento, mediante un picnómetro o volumenómetro de Le Chatelier. Se considera que cada uno de los poros se satura por inmersión en agua al cabo de 48 horas y la densidad obtenida es la densidad real.

El árido 0/8S se ensaya con esta vez con un recipiente distinto, se trata de un matraz aforado de 250 ml. La metodología de este ensayo consiste en, primeramente, introducir agua hasta alcanzar una marca de enrase en el cuello del matraz y seguidamente pesar el conjunto de matraz más agua notándose como P_{r+agua} .

El siguiente paso consiste en introducir el árido, previamente secado en estufa a 105°C hasta peso constante, en el matraz por su parte superior, de forma lenta asegurándose de la no pérdida de material durante el vertido, hasta alcanzar un nivel cercano a la boquilla de ensanche del cuello del propio matraz. Posteriormente se pesa el conjunto matraz, agua y árido y se denota como $P_{r+agua+\text{árido}}$.

Finalmente se extrae el agua del cuello del matraz hasta la marca de enrase del mismo, mediante el uso de un pipeteador. Una vez hecho esto es pesado el nuevo conjunto y se anota como $P_{r+aguaII+\text{árido}}$. Obtenidos estos pesos, se calcula la densidad del árido considerando la densidad como la relación entre el peso de material bruto introducido en el matraz aforado y el peso de agua desalojado del matraz para ese mismo volumen, considerando la densidad del agua la unidad.

$$d_R = (P_{r+agua+\text{árido}} - P_{r+agua}) / (P_{r+agua+\text{árido}} - P_{r+aguaII+\text{árido}})$$

2.2.5. Comportamiento mecánico

La machacabilidad de un árido ofrece una idea de su resistencia a compresión en el sentido de que, estando sometidas a confinamiento, las partículas sobre las que es aplicada una fuerza son transmisoras de esfuerzos hacia sus contiguas.

La carga que es aplicada a las partículas se realiza de forma gradual, estableciendo una velocidad de carga de 40 kN/min hasta alcanzar un valor máximo de 400 kN, valor consigna que se alcanza al cabo de 10 minutos.

El material ha de rellenar un cilindro mecanizado de acero hasta un nivel. Para minimizar el volumen de aire se emplea una barra de compactación con la que se machaca el árido, a fin de lograr un mayor reacomodo del mismo. Este nivel ha de permitir que el pistón conectado al actuador esté a la misma altura que la parte superior del cilindro, encajando perfectamente en él (Fig. 9).



Fig. 9. Representación esquemática del ensayo de machacabilidad.

Una vez finalizado el ensayo se eleva el cilindro sobre unas calzas y debajo de estas se coloca una bandeja, con la ayuda de la prensa es retirado el material ensayado.

El objetivo final del ensayo es la obtención de las curvas tensión-deformación que permiten la caracterización mecánica del material en términos de resistencia y ductilidad, pudiendo determinar las zonas de comportamiento plástico y elástico.

2.3. Caracterización de las fibras

Las fibras de acero empleadas en hormigones han de satisfacer los requerimientos establecidos por la norma UNE-EN 14889-1:2008 en cuanto a características mecánicas, como resistencia a tracción, módulo y ductilidad, y en cuanto a dimensiones y tolerancias.

Las propiedades de las fibras metálicas afectan directamente a las propiedades del hormigón, tanto físicas como mecánicas, aunque este nivel de afección es mayor en el apartado mecánico.

Es aquí donde las fibras juegan un papel importante, sobre todo en el aporte al hormigón de mayor resistencia a tracción, flexotracción y fatiga, así como una reducción de la retracción por secado.

Las fibras de acero presentan una resistencia a tracción claramente superior a la del hormigón, así como un módulo de elasticidad notablemente mayor. Para la caracterización se desarrollan dos apartados, uno referido al análisis dimensional y geométrico de las mismas, y otro al estudio detallado de la composición química elemental.

El apartado dimensional y geométrico cobra importancia en el sentido de que, un mayor grosor afecta a la rigidez y resistencia a tracción del hormigón, así como una mayor longitud aumenta la superficie de adherencia con el hormigón. En la Fig. 10 se aprecian en detalle las fibras utilizadas en el presente estudio.



Fig. 10. Detalle de las fibras metálicas utilizadas.

En el apartado composicional elemental se trata de caracterizar tanto el recubrimiento de las propias fibras, como el cuerpo de las mismas, pues conociendo el material de composición de las fibras se puede llegar a inferir la existencia o no de las mejoras mecánicas deseadas y también los problemas derivados de la propia selección del material.

Se realiza también un análisis térmico con el fin de obtener el comportamiento de las fibras metálicas frente a altas temperaturas en el sentido de conocer la variación de propiedades físicas o químicas del material con la temperatura en una termobalanza.

2.3.1. Microestructura y composición química elemental

De manera análoga a lo referido en la composición química elemental del árido empleado se procede con la caracterización composicional química de las fibras metálicas mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM). En este sentido se realizan sendas mediciones composicionales tanto del recubrimiento metálico como del interior de las fibras.

La composición química de las fibras permite obtener información sobre la afección de su utilización en el hormigón y de su comportamiento frente a ambientes agresivos, aunque este comportamiento es estudiado posteriormente mediante ensayos de durabilidad en ciclos de

humedad-sequedad. Mediante este ensayo se obtiene el porcentaje en peso de cada compuesto, así como el porcentaje atómico del mismo. De igual manera, obtenemos el espectro composicional de la zona de interés previamente seleccionada, en la parte superficial de la misma.

2.3.2. Termogravimetría analítica y calorimetría diferencial

Con este análisis se trata de caracterizar el comportamiento de varias propiedades con el cambio o variación de la temperatura. Las técnicas de análisis empleadas son, por un lado, la termogravimetría y por otro la calorimetría diferencial de barrido. Estas técnicas arrojan valores de las propiedades de masa y de entalpía correspondientemente.

En la termogravimetría se realiza un registro continuo de la masa de la muestra, que está sometida a un programa de temperaturas en una atmósfera controlada, que puede ser aire o un gas inerte. Se emplea una atmósfera de aire cuando, por ejemplo, se desea cuantificar de forma exacta la cantidad de especies orgánicas adsorbidas por óxidos inorgánicos térmicamente resistentes, quemando totalmente dichas especies orgánicas. En atmósfera con gases inertes, como el argón, muchos compuestos orgánicos se descomponen formando carbono sólido que puede sublimar parcialmente a altas temperaturas. Estos sistemas cuentan con una termobalanza, un procesador, una mufla y un sistema de gas de purga. Los cambios de masa reflejados en el termograma son el resultado de procesos físicos o químicos como cambios de fase, descomposiciones, oxidaciones o desorción.

En la calorimetría diferencial de barrido, también denominada DSC, se realiza una medición independiente de los flujos de calor existentes tanto en la muestra ensayada como en un material referencia. El sistema consta de dos platillos, uno con la muestra y otro vacío. Ambos platillos se han de calentar con la misma velocidad específica, hecho que hace necesario un mayor aporte de calor para el platillo que contiene el material. La diferencia de calor entre ambos platillos es el calor adicional medido, y se hace una lectura de este para cada temperatura. La curva que se gráfica representa la temperatura y el calor adicional.

Finalmente, el área que se encuentra debajo de la curva del termograma puede asociarse con la entalpía de transición del material ensayado.

2.3.3. Densidad

De manera análoga al ensayo para la caracterización de la densidad de los áridos medios, para caracterizar la densidad de las fibras se ha procedido con un matraz aforado de 250 ml y bajo la misma metodología. La densidad de las fibras metálicas es bastante superior a la del conjunto árido + cemento, así que contribuye al incremento de la densidad del conjunto, característica a maximizar para propiciar una mayor efectividad en la absorción de la radiación gamma.

2.3.4. Propiedades geométricas

Para determinar las propiedades geométricas de las fibras empleadas ha sido empleado, por una parte, el microscopio electrónico de barrido para la determinación del tipo de sección y diámetro efectivo de la fibra. En este estudio se analizaron 3 fibras, de las que con ayuda de las imágenes proporcionadas por el SEM se obtuvo el diámetro.

Por otro lado, se caracterizó la longitud de las fibras mediante el uso de un calibre digital. Fueron medidas un total de 25 fibras, con esta serie de medidas se obtuvo un valor promedio de la longitud total.

2.4. Dosificación del hormigón

La dosificación del hormigón tiene como objetivo encontrar las proporciones óptimas de los diferentes componentes del mismo, atendiendo a unas necesidades de resistencia, consistencia, durabilidad y densidad, principalmente.

Antes de esclarecer el método de dosificación empleado, cabe mencionar que la dosificación teórica obtenida mediante cualquier método es susceptible de cambio debido a que el comportamiento mostrado por el hormigón no es siempre el deseado debido a la cantidad innumerable de variables que pueden no tenerse en cuenta durante su preparación.

Es así, la definida, una dosificación abierta, que ha estado sujeta a cambios mediante el criterio que proporciona la experiencia, y a través de la realización de varias amasadas. Estas amasadas han sufrido modificaciones tanto en la cantidad de agua como en la dosificación de las fibras y de los áridos empleados, hasta alcanzar una solución de compromiso que ofrezca al hormigón una consistencia adecuada que lo haga trabajable, y un contenido en fibras adecuado para la obtención de una mayor densidad y una mayor protección frente radiación sin que repercuta negativamente en la trabajabilidad del hormigón; todo ello seleccionando una dosificación de agua que permita una buena trabajabilidad con las fibras y cuyo exceso no repercuta negativamente en la resistencia del hormigón.

Por su parte, la EHE-08 establece unas cantidades y proporciones limitantes de los componentes del hormigón. Para la clase de exposición I (no agresiva) para hormigones en masa, se establecen las siguientes limitaciones:

- Máxima relación de agua/cemento: 0,65
- Mínimo contenido de cemento: 200 kg/m³.
- Resistencias a compresión mínimas: 20 MPa.

Los datos de partida para la determinación de la dosificación parten de unas condiciones preestablecidas:

- Densidad.
- Resistencia del hormigón deseada.
- Tipo de cemento, obtenido a partir de la clase de exposición.
- Forma de compactación.
- Tamaño máximo de los áridos.
- Consistencia deseada del hormigón.
- Relación de agua/cemento.
- Granulometría de los áridos empleados.

El método de dosificación empleado corresponde con el método de Fuller. Este método está destinado para estructuras no demasiado armadas integradas por áridos redondeados. El tamaño máximo de dichos áridos queda limitado a 70 mm y la proporción mínima de cemento es de 300 kg/m³. La dosificación de los áridos queda definida mediante la adaptación de la distribución granulométrica a la parábola de Gessner. La función parabólica de Gessner se puede expresar del siguiente modo:

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

- D = Luz de malla que atraviesa el tamaño máximo del árido empleado en la mezcla.
- d = Luz de malla de cada uno de los tamices empleados en la caracterización granulométrica del árido.
- P = porcentaje de material en peso del pasante por cada tamiz de luz de malla d .

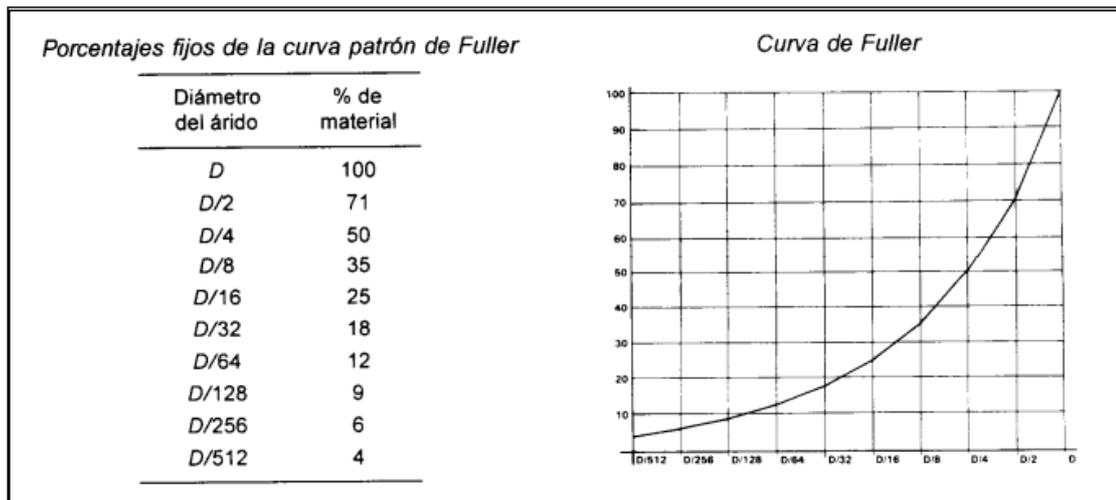


Fig. 11. Curva de Fuller y porcentaje de material pasante (OCW Unican, n.d.).

2.4.1. Estimación de probetas necesarias

Para la caracterización de las propiedades físicas del hormigón en cuanto a su densidad, absorción y porosidad, se han requerido de 12 muestras cilíndricas de 100 mm de altura y 75 mm de radio. Estas han sido obtenidas a partir del corte de 4 probetas normalizadas de 300 mm de altura y 75 mm de radio cortadas mediante una sierra de disco circular con refrigeración por agua. De estas 4 probetas cilíndricas normalizadas, 2 han sido sometidas a temperatura operacional (300°C) mientras que las otras dos han sido sometidas a la temperatura de desecado estándar del horno a 105°C.

Asimismo, para la realización del ensayo de permeabilidad al oxígeno se ha requerido de los tercios centrales (Fig. 12) de las probetas anteriormente citadas, sobre los que han sido previamente determinadas las propiedades físicas de densidad, porosidad y absorción, ensayos que no modifican la estructura microcapilar del hormigón.

Para el ensayo de penetración al agua bajo presión se utilizan las 12 probetas procedentes de la caracterización de las propiedades físicas del hormigón, de las que los tercios centrales han sido anteriormente sometidos al ensayo de penetración al oxígeno. Además, debido a la necesidad de romper la probeta diametralmente en dos partes iguales, se aprovecha para medir la resistencia a tracción indirecta que permite obtener el ensayo de rotura brasileño.

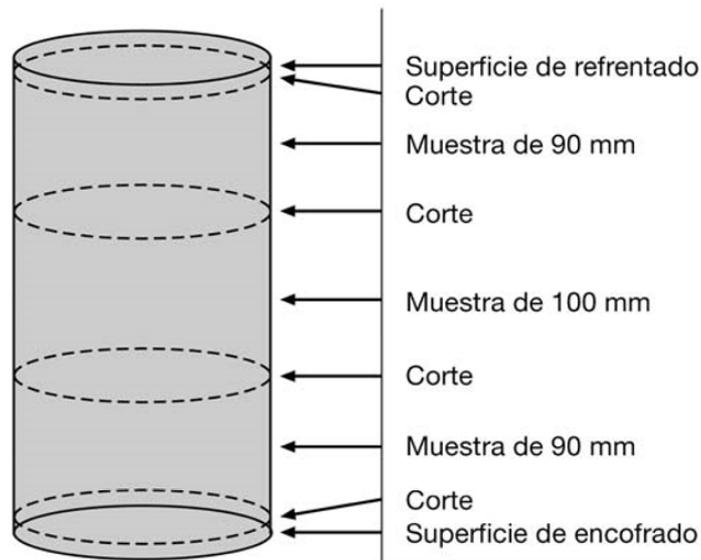


Fig. 12. Representación de cortes para determinación de propiedades físicas (Thomas, 2012).

Para los ensayos de caracterización de las propiedades físicas del hormigón, y en concreto para la determinación de la resistencia a compresión, se emplean 5 probetas cúbicas normalizadas. En el caso de los ensayos de flexotracción, se utilizan 4 probetas prismáticas de sección 10x10 cm y de longitud transversal de 40 cm. Para el cotejo de la afección de las fibras a esta propiedad, también se ensayan 4 probetas prismáticas de idénticas dimensiones sin fibras. Para la determinación de la retracción por secado del hormigón se han utilizados probetas prismáticas de 5x5x28,5 cm.

Para la obtención del módulo de elasticidad se ensayan 2 probetas cilíndricas normalizadas de 300 mm de altura y 75 mm de radio debidamente refrentadas con azufre en su cara superior. En el caso del ensayo de durabilidad mediante ciclos de humedad-sequedad, se han utilizado 10 probetas cilíndricas de 200 mm de altura y 50 mm de radio debidamente refrentadas en su cara posterior, 2 de ellas utilizadas como patrón y las otras 8 utilizadas en sendos ciclos de humedad-sequedad en ambientes marino y con sulfatos, 4 probetas para cada tipo de ambiente.

La caracterización del comportamiento del hormigón frente a altas temperaturas ha requerido de la utilización de 12 probetas cúbicas normalizadas, 2 probetas por temperatura ensayada. El ensayo con pulsos ultrasónicos se ha llevado a cabo con las probetas anteriormente sometidas a gradiente térmico. La caracterización de la resistencia a compresión de probetas sometidas a gradiente térmico se ha llevado a cabo sobre las 12 probetas anteriormente ensayadas, y a posteriori del ensayo con ultrasonidos.

Además, se han fabricado probetas de microhormigones a escala de 40 mm de altura y 10 mm de radio mediante los cuales se han replicado los ensayos anteriormente descritos para la caracterización de la respuesta del hormigón frente a gradiente térmico y frente a ciclos de humedad-sequedad. Estos microhormigones han sido fabricados en una amasadora de morteros y vertidos en unos moldes cilíndricos de PVC, de donde han sido desmoldados a las 48 h y curados bajo lámina de agua durante 28 días.

Se han utilizado 8 microhormigones para la realización de ciclos de humedad-sequedad (4 por cada ambiente) y 12 microhormigones para el estudio del efecto de la temperatura (2 tandas por temperatura consigna ensayada). Además, dentro de cada tanda de 2 microhormigones, uno de ellos ha sido ensayado a rotura por compresión, previo ensayo con ultrasonidos, y otro ha sido sometido a ciclos de humedad-sequedad en ambiente marino.

2.4.2. Procedimiento de amasado

El procedimiento de amasado juega un papel importante en las características finales del hormigón obtenido. Se ha de asegurar en todo momento que la mezcla realizada sea homogénea evitando la formación de cualquier tipo de segregación, favoreciendo el perfecto recubrimiento de los áridos por la pasta y asegurando la perfecta homogeneización del aditivo en el agua. El equipo necesario para la confección del hormigón consiste en:

- Amasadora de hormigón de eje vertical de 50 l de capacidad.
- Báscula de precisión calibrada con una capacidad de 150 kg y una precisión de 20 g.
- Moldes de diversa geometría:
 - Cilíndricos normalizados.
 - Cilíndricos de 200 mm de alto y 50 mm de radio.
 - Cúbicos normalizados.
 - Prismáticos de 400 mm de largo, 100 mm de alto y 100 de ancho.
- Cronómetro digital para el control de los tiempos de la amasada.
- Cono de Abrams, con chapa de acero y barra de compactación de 16 mm de diámetro acabada en punta.
- Cinta métrica con la que se obtiene la medida del descenso del cono de Abrams.
- Cámara de curado con control de humedad, establecida al 95%, y control de temperatura, establecida al $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Utensilios de trabajo: mascarilla, guantes, paletas, capazos, cogedores, manguera de agua y otros.

El paso previo, al inicio de la amasada, consiste en el cálculo de las cantidades adecuadas de áridos, agua, cemento, fibras (en su caso) y aditivo, ajustando la dosificación planteada a los requerimientos en litros de cada amasada (Fig. 13).

El siguiente paso consiste en el pesaje de las cantidades anteriormente establecidas de los materiales involucrados en la amasada. Para el acopio de áridos se utiliza un capazo de 20 l, en el que se introduce y pesa el material. El pesaje del material se procede acopiando los áridos de mayor a menor tamaño. Después del pesaje del agua y del aditivo se añade una pequeña cantidad de agua al recipiente del aditivo con el fin de evitar que el mismo quede adherido a las paredes del recipiente.

Tanto la amasadora como los utensilios que permiten la manipulación del hormigón son previamente humedecidos. Esto es debido al hecho de tener que realizar diversas amasadas una detrás de otra, para facilitar en la medida de lo posible obtener las mismas condiciones de contorno en cada amasada.



Fig. 13. Ingredientes para la preparación de la amasada.

El árido ya pesado se introduce en la amasadora de eje vertical, en el mismo orden de pesaje, con el fin de evitar la segregación del árido o acumulación de finos en el fondo de la hormigonera antes de comenzar el proceso de amasado.

Introducidos los áridos de mayor a menor tamaño (fracciones 0/20 y 0/8), se vierte el cemento en la amasadora y se hace girar ésta dos vueltas completas. Esta remoción facilita la homogeneización de la mezcla. Introducidos áridos y conglomerante se pone en marcha la amasadora. Durante los 15 primeros segundos de amasada se procede con el vertido del agua. Esta primera fase del amasado ha de durar 3 minutos en los que ha de lograrse una perfecta homogeneización de la mezcla. Cuando finalizan estos 3 minutos comienza una segunda fase de reposo. Es incorporada la dosificación de fibras establecida en la mezcla. Las fibras se han de repartir en toda la superficie libre del hormigón evitando en la medida de lo posible zonas de gran concentración y apilotonamientos.

Transcurridos los 3 minutos comienza una tercera fase de 2 minutos de duración, en la que se vierte el aditivo diluido en agua durante los 15 primeros segundos. Durante estos dos minutos se vigilará que no existan zonas de no recirculación, en las que las fibras hagan colapsar el movimiento local de la mezcla. Si esto ocurriera se procedería a remover el área afectada con una paleta.

Habiendo transcurrido los 8 minutos totales de amasada se vierte la tongada en un capazo y a partir de este se rellena el cono de Abrams con un cogedor para determinar el grado de consistencia del hormigón. En la Tabla 4.

Tabla 4. Pasos y tiempos en el procedimiento de amasado

Orden	Fase
1º	Cálculo de la dosificación
2º	Pesaje de los materiales
3º	Vertido del árido de mayor a menor tamaño
4º	Vertido del cemento
5º	Giro de 2 vueltas completas
6º (3 min)	Encendido de la hormigonera y vertido del agua
7º (3 min)	Reposo de la mezcla y adición de fibras
8º (2 min)	Encendido de la hormigonera y vertido del aditivo diluido
9º	Finalización de amasada y cono de Abrams

2.4.3. Consistencia del hormigón fresco

El ensayo de sienta o de consistencia de hormigón fresco del cono de Abrams se realiza de acorde a la norma UNE-EN 12350-2:2009. “*Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*”.

El ensayo comienza con el vertido mediante un cogedor del hormigón fresco dentro del propio molde troncocónico. En el proceso participan dos personas, una de ellas se encarga del llenado del molde mientras que una segunda se encarga de mantener el molde pegado a la chapa metálica donde va apoyado, pisando las aletas metálicas que van soldadas al molde en su base. El llenado del molde se realizará de forma rápida, deteniendo el vertido a 1/3, 2/3 y 3/3 de la altura total del molde. A cada tercio de llenado la persona encargada de mantener el molde pegado a la chapa metálica ha de asir la barra de compactación, mencionada en la descripción del equipo utilizado, y compactar la masa con 25 golpes, procurando actuar a lo largo de toda la superficie libre de la mezcla a lo largo de una trayectoria en espiral de afuera hacia adentro, penetrando desde la superficie hasta el fondo de la capa.

El último tercio corresponde con el llenado total del molde, y después de su compactación el operario que sostiene el molde ha de enrasar la superficie del cono con una paleta. Se ha de limpiar al máximo la chapa metálica sobre la que se apoya el molde, debiendo de estar previamente humedecida para evitar la pérdida de humedad del propio hormigón al circular sobre ella.

El siguiente paso consiste en levantar el molde del cono verticalmente, en un tiempo de 2 a 5 segundos, pero sin generar un vacío que adhiera la mezcla al cono. Realizado lo anterior ha de medirse la pérdida de altura del cono h , para ello se suele utilizar el propio molde utilizando la barra compactadora como guía y midiendo la diferencia de altura entre el molde y el punto más alto del cono con un metro. El cono deberá de ser simétrico o sesgado y se desechará la medición si este se derrumba.

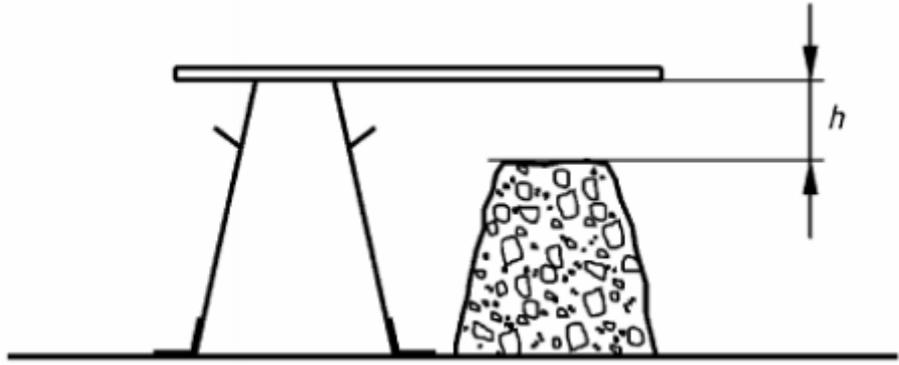


Fig. 14. Cono de Abrams (UNE - EN 12350 – 2, 2009).

Esta pérdida de altura o asiento, es mayor cuanto menor sea la consistencia del hormigón y ambas variables, consistencia y asiento se relacionan tradicionalmente mediante tablas, aunque la norma no especifica el uso de una tabla en concreto. El parámetro consistencia depende del tamaño máximo del árido, de su forma y granulometría, así como de la relación agua/cemento y de la naturaleza del aditivo empleado. La consistencia deseada depende del mecanismo de puesta en obra a utilizar, naturaleza de la obra, así como de la utilización de armaduras, encofrados, etc. En el presente estudio se busca una consistencia correspondiente con un asiento del cono de Abrams de 15 cm.

2.4.4. Preparación y acondicionamiento de probetas

El llenado de los moldes especificados en el capítulo de “*Procedimiento de amasado*” se realizará con el material preparado en la tongada, con excepción del material utilizado para el ensayo de consistencia del cono de Abrams, que será desechado. Los moldes a rellenar deben de haber sido provistos de una finísima capa de aceite u otro tipo de desmoldante que favorezca el desmoldado.

El llenado de las probetas cilíndricas normalizadas se realiza en dos etapas: con el molde lleno a la mitad y con el molde lleno completamente, en la Fig. 15 se pueden observar los moldes llenados. En cada una de las dos etapas la compactación se realiza mediante aguja vibradora. Este procedimiento logra el mayor grado de compactación posible, liberando el mayor volumen de aire retenido dentro de los métodos de compactación más utilizados. El uso de este método está justificado pues se quiere obtener un hormigón con la máxima densidad posible, sin repercutir negativamente en la homogeneidad de los áridos en la mezcla.

La compactación con aguja se realiza mediante la inserción de la aguja de forma vertical y rápida hasta el fondo del molde sin llegar a tocarlo y mantener esta posición durante 10-15 segundos, cuando se pueda apreciar que dejan de aflorar burbujas de aire en la superficie libre del hormigón y la superficie se torne brillante. La extracción de la aguja deberá de realizarse con un movimiento lento, favoreciendo que el agujero que deja el propio cabezal se vuelva a rellenar por sí mismo.

Tanto en el caso de las probetas cúbicas normalizadas, como en el de las probetas prismáticas y en el de las probetas cilíndricas de pequeño diámetro descritas con anterioridad se realizará un vibrado de la superficie exterior del molde, aprovechando el hueco que dejan libres las asas. Esta metodología de vibración es debida a que al ser moldes de pequeña sección, la introducción de la aguja puede suponer un vaciado importante del material.



Fig. 15. Probetas con hormigón en estado fresco.

Después de realizar la compactación se ha de enrasar el molde con una paleta mediante movimientos circulares y un alisado posterior de la superficie mediante movimientos de vaivén. Los moldes han de ser colocados en una superficie lo más llana posible y permanecerán así durante 24 horas desde su amasada (Fig. 16).



Fig. 16. Probeta con 24 horas de edad recién desmoldada.

A las 24 horas las probetas son desmoldadas en las condiciones ambientales en que fueron fabricadas. Tras esto son etiquetadas mediante un código que sigue el patrón:

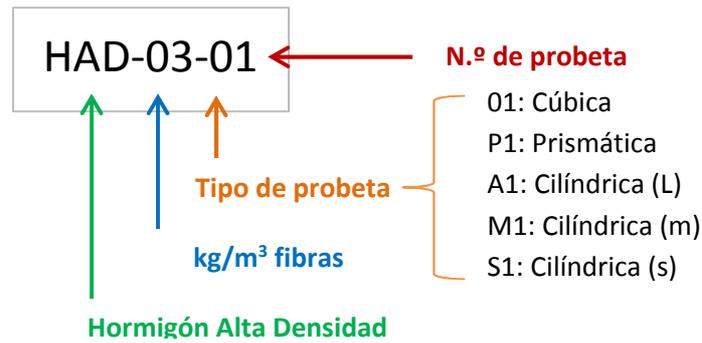


Fig. 17. Patrón de etiquetado.

Además de esta etiqueta todas las probetas llevan marcada la fecha en que fueron amasadas.

El curado se realiza en cámara con control de humedad y temperatura (Fig. 18), estableciéndose estas en el 95% y en los $20 \pm 2^\circ\text{C}$ respectivamente. El sistema cuenta con un sistema de aspersores que crean una neblina permanente que mantiene el nivel de humedad de la cámara y favorece la correcta hidratación y curado óptimo de las probetas.

Las probetas que van a ser utilizadas en ensayos donde se vayan a comparar los efectos producidos por una elevación de la temperatura de exposición a 300°C , serán introducidas en la mufla a los 28 días de curación y sometidas a 300°C . Tras ser templadas por convección natural serán ensayadas ese mismo día.



Fig. 18. Cámara de curado con control de humedad y temperatura.

Para los ensayos de determinación de la densidad aparente, relativa, así como la porosidad del hormigón endurecido se procedió a cortar transversalmente probetas normalizadas (150 mm de diámetro x 300 mm de altura) con una sierra de disco. Se obtuvieron tres partes (dos de 90 mm de altura, y otra de 100mm). Tanto los 10 mm de la cara superior como los 10 mm de la cara inferior fueron desechados.

2.5. Densidad aparente, densidad relativa, porosidad accesible y coeficiente de absorción.

Para calcular propiedades físicas del hormigón tales como densidades y porosidades se fundamentó en la norma UNE-EN 12390-7:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*. Para ello se tomaron cuatro probetas de la dosificación propuesta que fueron cortadas transversalmente a su vez en tres partes de acuerdo a lo citado anteriormente.

La maximización de la densidad es una de las funciones objetivo del presente proyecto, pues forma parte de la terna de variables que influyen en la capacidad de atenuación de fotones de cualquier material, junto al espesor y al número atómico del mismo.

Para el cálculo del peso seco (P_s) se mantuvieron las probetas hasta peso constante en una estufa a 105°C. Dos de las cuatro probetas fueron posteriormente calentadas con posterioridad hasta una temperatura de 300°C, con el fin de obtener más datos acerca de la influencia de altas temperaturas en las propiedades físicas.

Para el cálculo del volumen aparente (V_a) se colocaron las muestras de las probetas en vacío durante 24 horas con el fin de extraer todo el aire de los poros (Fig. 19). Luego se procedió al llenado del recipiente con agua, que junto con la sobrepresión generada por el vacío hace que los poros se llenen de agua. Finalmente se dejaron otras 24 horas sumergidas en agua a presión atmosférica. Transcurrido todo el proceso, que dura 72 horas, se secan las muestras superficialmente y se pesan con lo que se obtiene el peso saturado con superficie seca (P_{sss}).



Fig. 19. Tanque de vacío para la determinación de las propiedades físicas.

El volumen de poros accesible (h_a) ya se puede obtener por diferencias entre peso saturado superficie seca y peso seco.

$$h_a = P_{sss} - P_s$$

La relación entre el volumen de poros accesible y el volumen aparente de la muestra en tanto por cien proporciona la porosidad accesible del material.

$$\text{Porosidad} = \frac{h_a}{V_a} \cdot 100 \text{ (\% volumen)}$$

Una vez pesadas las muestras también se sumergen en agua, con lo que se determina el volumen aparente. Para el cálculo del volumen aparente se utilizó una balanza en el que se sumergieron las muestras con la ayuda de un cordel. La balanza fue tarada con el recipiente de agua y el cordel sumergido antes de cada medición.

Asumiendo que la densidad del agua en el laboratorio es de 1 g/cm³ se obtienen las densidades aparentes y relativas por medio de la siguiente formulación.

$$V_r = V_a - h_a$$

$$d_a = \frac{P_s}{V_a}$$

$$d_r = \frac{P_s}{V_r}$$

La porosidad es una propiedad que está íntimamente relacionada con la densidad aparente y su minimización mediante técnicas de vibrado hará posible la maximización de los valores de densidad, necesitados para la disipación de la radiación gamma en estado de servicio.

La capacidad de absorción de agua de un hormigón se puede determinar según el procedimiento descrito en el apartado 2.6.1.

Una vez conocida la porosidad accesible (h_a) y el peso seco (P_s) se calcula la absorción por medio de la siguiente formulación expresada en tanto por ciento.

$$\text{Absorción} = \frac{h_a}{P_s} \cdot 100 \text{ (\% peso)}$$

2.6. Determinación de la durabilidad del hormigón

Los poros o espacios ocupados por aire son uno de los principales factores que afectan a la durabilidad del hormigón. Estos espacios pueden estar interconectados entre sí pudiendo llegar a formar una red interconectada compleja que permita la circulación del agua, o cualquier otro agente, pudiendo ser este más o menos agresivo.

La durabilidad del hormigón define en este sentido, la capacidad del mismo a resistir la penetración de dichos agentes externos a lo largo del tiempo. Los parámetros principales a tener en cuenta son la porosidad y la absorción de agua. La absorción del agua determina la permeabilidad del hormigón, a su vez influenciada por la presencia de poros y discontinuidades, tamaño y distribución.

La presencia de agua en los intersticios del hormigón es perjudicial para su durabilidad en el sentido en el que puede contener agentes que deterioran el propio hormigón, situación que lo puede degradar prematuramente y más aún en el caso de haber fibras o armaduras.

En el presente estudio se caracteriza el comportamiento del hormigón determinándose la permeabilidad del mismo tanto al oxígeno como al agua, así como estudiando el comportamiento del hormigón frente a dos agentes patológicos externos, como lo son los electrolitos cloruro contenidos en el agua de mar y la exposición a sulfatos. Por último se determina la estabilidad dimensional del hormigón mediante la medición de la retracción por secado del mismo.

2.6.1. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno

El acondicionamiento de las probetas de hormigón para este ensayo se realiza de acuerdo a la norma UNE 83966:2008: *“Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad”*. El procedimiento de ensayo sigue las instrucciones referidas por la norma en UNE 83981:2008: *“Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido”*.

El ensayo ha sido realizado en cada uno de los dos tercios centrales de las probetas cilíndricas utilizadas en los ensayos destinados a obtener las propiedades físicas, para dos temperaturas: 105 y 300°C. Las probetas a ensayar son retiradas de la estufa, donde han permanecido a 105°C durante una serie de días hasta alcanzar peso constante ($\Delta m \leq 0.005g$), después de haber anotado el peso seco (para completar las propiedades físicas) se han dejado enfriar y posteriormente se ha procedido con su recubrimiento lateral mediante siliconado en dos capas, a fin de poder sellar la misma para evitar fugas de caudal en el ensayo.

Para la realización del ensayo, es abierta ligeramente la válvula de la botella de oxígeno que alimenta la entrada del dispositivo que cierra herméticamente la probeta. Antes de contactar con la probeta, el oxígeno atraviesa dos válvulas con sendos manómetros. El ensayo consta de dos partes: una lectura a ≈ 2 bares y otra a ≈ 3 bares. Es importante no utilizar presiones de ensayo demasiado elevadas que aumenten la capilaridad del hormigón.

La probeta es colocada en el dispositivo previa colocación de una junta de goma en el lateral de la misma, y va encajada en un soporte metálico inferior. Es colocado un soporte metálico superior que es apretado mediante la acción de un gato hidráulico. Realizado esto, la probeta está lista para ensayar. Se conecta después la salida del dispositivo mediante una goma con un caudalímetro digital, que registra las lecturas de caudal de oxígeno pasante por la probeta a tiempo real.

Para cálculos posteriores son necesarios varios datos. Cuando comienza el ensayo la lectura del caudalímetro aumenta progresivamente, en la metodología de ensayo propuesta se ha de esperar media hora para que este valor de caudal se estabilice. Este valor es anotado, y también es anotado el valor inicial del caudalímetro, desconectado el tubo que lo conecta en el dispositivo. Este valor será utilizado para corregir el valor obtenido de la lectura previa. El equipo utilizado se puede visualizar en la Fig. 20.

Se repite todo el proceso elevando la presión del manómetro de entrada de 2 a 3 bares. En el caso del ensayo de las probetas correspondientes a una temperatura de 300°C, estas son sometidas a un proceso de calentado mediante mufla. Este calentamiento se mantiene durante 20 minutos una vez alcanzada la temperatura de consigna.



Fig. 20. Equipo para la determinación de la permeabilidad al oxígeno.

Mientras han sido ensayadas las 6 probetas cilíndricas correspondientes con una temperatura de 105°C se sometían a un proceso de calentamiento a 300°C a las otras 6 restantes.

También es tomado el valor de la altura de cada probeta, medida tomada con un calibre para la realización de cálculos posteriores.

La expresión que permite determinar la permeabilidad del hormigón parte de la ecuación de Darcy. El único cambio que se realiza es convertir las columnas de agua a presiones de gases obteniendo la siguiente expresión:

$$K_{O_2} = \frac{2 P_1 R L \eta}{A(P_2^2 - P_1^2)}$$

}

$\eta_{aire} = 2,02 \times 10^{-10} (N \cdot s/m^2)$

$P_1 = 1bar$

$R = \text{caudal de salida } (m^3/s)$

$P_2 = \text{presión de salida } (bar)$

$L = \text{longitud } (m)$

$A = \text{área } (m^2)$

$K = \text{coeficiente de permeabilidad } (m^2)$

2.6.2. Permeabilidad al agua bajo presión

Con los tercios centrales utilizados en el ensayo de permeabilidad al oxígeno y los tercios superior e inferior utilizados en los ensayos de la determinación de propiedades físicas, se determina la permeabilidad al agua bajo presión.

La metodología empleada está descrita en la norma UNE-EN 12390-8:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración al agua bajo presión.*

El ensayo consiste en la colocación de las probetas sobre unos soportes que evitan el contacto de la superficie inferior de la probeta con el dispositivo de ensayo, y la colocación en la parte superior de las mismas de un tubo de metacrilato, abierto en sus extremos y con sendas juntas de goma colocadas en su parte posterior e inferior, como puede observarse en la Fig. 21. Se ha de introducir agua en dicho tubo a la vez que se ejerce presión hacia abajo sobre el mismo para evitar el derramamiento del líquido. Posteriormente se coloca encima del tubo con agua una placa perforada a través de la cual solo ingresa el aire desde una entrada lateral, conectada a aire a 5 bar de presión. Esta placa es ajustada mediante presión, y una vez abierta la toma de aire a presión, el ensayo tiene una duración de 72 horas.



Fig. 21. Equipo para el ensayo de permeabilidad al agua a presión.

Al finalizar el ensayo las probetas son sometidas a un ensayo de tracción indirecta. Este ensayo mide de forma indirecta la resistencia a tracción del material y además separa a la mitad los tercios de probetas para la medición de la huella de humedad del agua que ha penetrado en el ensayo de permeabilidad al agua a presión.

Se marca el contorno de la huella de humedad que ha penetrado con un rotulador permanente y se mide la máxima distancia a la cara de penetración del agua.

Los factores que más repercuten en la permeabilidad del hormigón son la relación de agua/cemento, la proporción y el tipo de cemento, el curado y el sistema de compactación.

2.6.3. Ciclos de humedad-sequedad

Las propiedades mecánicas, junto a la durabilidad, conforman las dos propiedades más importantes del hormigón, y esta última se asocia a la vida útil de la estructura sometida a ambientes especialmente agresivos. La durabilidad en este sentido es comprendida como la capacidad de resistir ataques de naturaleza física (gradientes térmicos) o química. Los procesos químicos suelen estar causados por ataques de sulfatos, ácidos o agua entre otros.

El componente del hormigón más susceptible a ataques son las armaduras metálicas y fibras, pues los procesos de deterioro de las mismas están asociados a fenómenos de corrosión. En el presente estudio se trata de caracterizar el comportamiento del hormigón con fibras frente a dos ambientes agresivos: agua marina y sulfatos.

El ataque por sulfatos es característico de zonas de exposición correspondientes a aguas subterráneas o suelos que contienen sulfatos. El efecto negativo de este tipo de ataque consiste en la reacción de los iones de sulfato con la matriz de cemento, provocando la expansión del propio hormigón. El proceso consiste en una pérdida de resistencia de la pasta que favorece una pérdida de cohesión del material, que genera discontinuidades y facilita la mayor penetración de agentes agresivos que agravan el proceso.

Las reacciones más comunes de este tipo de degradación son las producidas entre el hidróxido de calcio presente en el cemento y los iones sulfato para formar yeso y la reacción entre aluminato de calcio y iones de sulfato para formar etringita. La reacción para la formación de etringita es sumamente peligrosa debido a su gran expansividad.

El ataque por cloruros procede casi siempre del agua de mar presente en suelos los afectados por ambientes marinos. Los cloruros que penetran en el hormigón se clasifican en cloruros libres y enlazados. Los cloruros enlazados reaccionan con el aluminato tricálcico para formar "sal de Friedel" que no es expansiva. Los cloruros libres son los más peligrosos puesto que al penetrar el hormigón reaccionan con las armaduras o fibras metálicas corroyéndolas.

En la metodología propuesta se llevan a cabo dos ensayos de ciclos de humedad-sequedad con los ambientes propuestos: agua de mar y sulfatos. Para ambos casos se establecen los mismos tiempos.

Las probetas utilizadas tienen unas dimensiones de 50 mm de radio y 200 mm de altura. Las probetas han sido secadas hasta peso constante en un horno a 105 °C. Se ha utilizado un número total de 10 probetas, 4 de ellas para cada tipo de ambiente y 2 de control para cotejar la evolución de las demás.

Los ciclos de humedad-sequedad propuestos constan de un periodo de 16 horas de sumersión en un recipiente con una solución acuosa de potasio sulfato en una concentración del 5% para el ambiente con sulfatos y un recipiente con agua de mar para el ambiente con cloruros. Los recipientes han de tener la capacidad de almacenar todas las probetas en un único nivel y estas tendrán la cara lateral libre de cualquier contacto. La lámina de líquido estará al menos 2 cm por encima de la cara superior de las probetas.

Al ciclo de humedad de 16 horas lo precede un proceso de secado de la superficie de la probeta con el fin de obtener el peso con superficie seca. Una vez obtenido, las probetas son introducidas en un horno donde permanecerán a 60 °C durante 8 horas. Cada ciclo completo comprende un ciclo de humedad y otro de sequedad estableciéndose un número total de 20 ciclos.

Al finalizar los 20 ciclos, 2 probetas de cada ambiente y una de control han sido sometidas al ensayo de caracterización de las propiedades físicas descrito en el *Capítulo 2.5.* del presente documento.

Por último, las 10 probetas son sometidas al ensayo de compresión uniaxial para determinarse su resistencia a la compresión.

Con estos ensayos se pretende hacer un seguimiento de la evolución de los pesos tanto seco como húmedo a lo largo de los ciclos, así como caracterizar la pérdida global de resistencia y densidad al finalizar los 20 ciclos.

2.6.4. Retracción por secado

Es un método que sirve para determinar las modificaciones volumétricas del hormigón debidos a cambios de humedad en hormigones hidráulicos. Este ensayo se ha determinado de acuerdo a la normativa EN 12617-4:2002. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Parte 4: Determinación de la retracción y de la expansión.*

Para la realización del ensayo se cuenta con probetas prismáticas de 285 mm de longitud y 50 mm de lado. El equipo de ensayo consta de un comparador digital con precisión de 0,001 mm, una barra para calibración metálica de bajo coeficiente de expansión, índices de acero inoxidable, cuerpo metálico y mordazas para la sujeción de comparador al cuerpo metálico (Fig. 22).



Fig. 22. Equipo utilizado para la medición de la retracción.

Antes de comenzar el proceso de medida se ha de calibrar el aparato empleando mediante una barra de calibración metálica, con cuya medida el comparador se pondrá a cero, para cotejo posterior de las mediciones realizadas sobre las probetas con la propia barra de calibración.

El procedimiento de medida consiste en la colocación de la probeta entre los índices de medida del aparato y el posterior giro de la probeta sobre su eje. Durante una vuelta completa la medida que marca el comparador no debe de variar más de 0,001 mm, procediendo a la limpieza de los índices de medida cuando esto acontezca.

La toma de medidas se realiza cada 24 horas durante el tiempo requerido para el que no se observe evolución en la variación de la medida. Los resultados se expresan en términos de deformación relativa del siguiente modo:

$$c = \frac{\Delta L \cdot 1000}{L_g}$$

Siendo:

- c la contracción de la probeta en mm/m.
- ΔL la variación de la longitud con relación a la longitud referencia L_g .
- L_g longitud de referencia en mm.

2.7. Propiedades mecánicas del hormigón

2.7.1. Determinación de la resistencia a compresión uniaxial

Para la determinación de la resistencia a compresión uniaxial de las probetas normalizadas de hormigón, se han seguido las premisas establecidas en la norma UNE-EN 12390-3:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

Las probetas elaboradas se corresponden con probetas cúbicas de 10 cm de lado. Tras su elaboración, las mismas fueron almacenadas en cámara húmeda (humedad y temperatura controladas) hasta el momento del ensayo, el cual tuvo lugar a los 28 días de edad.

Con el objetivo de lograr una superficie de carga uniforme y paralela con la inferior, las probetas cilíndricas se refrentaron con azufre puro en su cara superior. En tanto que las probetas cúbicas se ensayaron con su cara abierta dispuesta en el lateral.

Para llevar adelante los ensayos se utilizó una prensa servohidráulica universal (Fig. 23). Todas las probetas fueron ensayadas aplicando la carga linealmente hasta rotura. La velocidad de aplicación de la carga fue la correspondiente para una velocidad de aplicación de la tensión de 0,5 MPa/s.

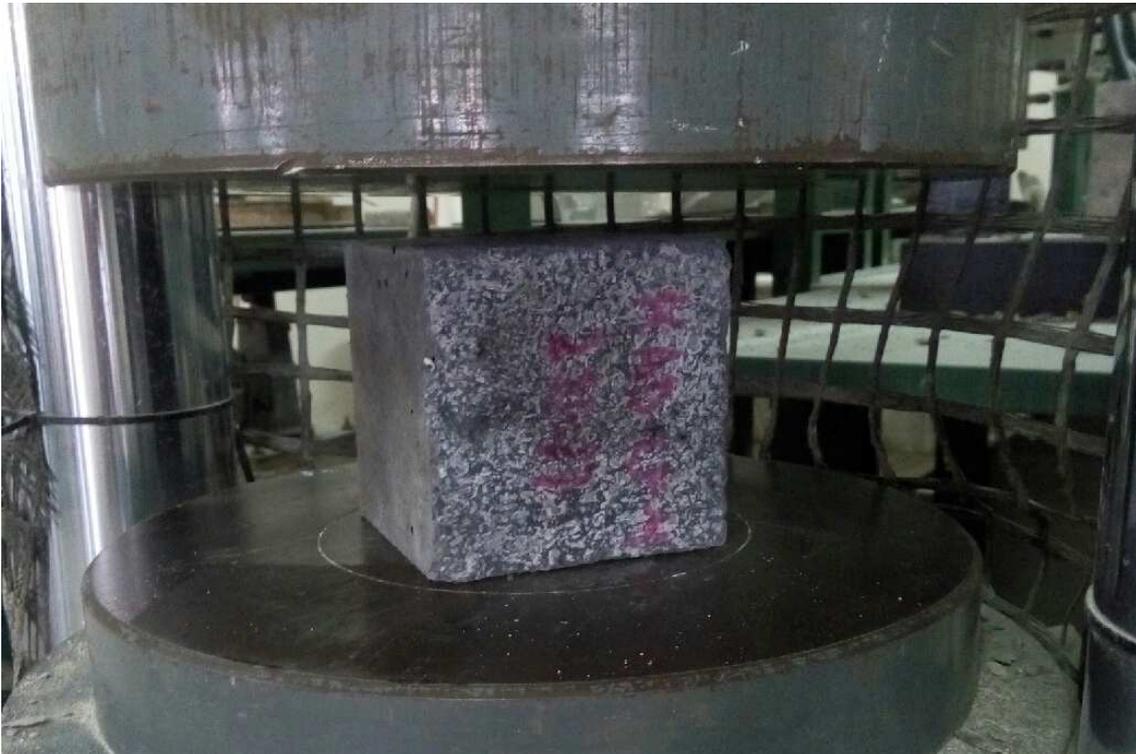


Fig. 23. Equipo utilizado en el ensayo de resistencia a compresión.

La resistencia a compresión simple del hormigón de probetas cilíndricas normalizadas se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi(D/2)^2} \quad (\text{para probetas cilíndricas})$$

$$R_c = \frac{F}{S} = \frac{F}{L * L} \quad (\text{para probetas cúbicas})$$

Donde:

- F es la carga máxima, expresada en N, resistida por la probeta.
- S es la superficie de aplicación de la carga en mm².
- D es el diámetro, en mm, de la probeta: 150 mm (S=17671 mm²).
- L es el lado, en mm, de la probeta: 100 mm (S=10000 mm²).
- R_c es la resistencia a compresión expresada en MPa.

2.7.2. Determinación del módulo de elasticidad

Para la determinación del módulo elástico se usaron probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y 30 cm de altura y se siguieron las indicaciones establecidas en la norma UNE-EN 12390-13:2014: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión, siguiendo para ello el método B.*

Las probetas se prepararon y refrentaron tal como se indicó en el apartado anterior, aplicándose la tensión a una velocidad de 0,5 MPa/s. A fin de adquirir un registro continuo del acortamiento experimentado por el hormigón a medida que se aplica la carga, fueron instrumentadas utilizando galgas extensométricas. En todos los casos, se colocan 2 galgas paralelas, dispuestas enfrentadas diametralmente, para, a la hora de realizar los cálculos, promediar la deformación registrada en la probeta. Para ello se han utilizado galgas de 120 mm de longitud, modelo PL-120-11-1L de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. Las galgas se adhieren a las probetas mediante un pegamento bi-componente de resina epoxídica.

Una vez terminado el proceso de preparación de las probetas se procede a su colocación en la máquina de ensayo según se observa en la Fig. 24 y a la conexión de ellas con la toma de datos. 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. Del promedio de la pendiente de los tramos de carga y descarga, en unidades de tensión, se obtiene el módulo de elasticidad del hormigón. Es conveniente descartar el primer ciclo de carga y descarga puesto que se trata de un periodo en el que todo el sistema (máquina, rótulas, probeta, galgas) se encuentra en proceso de ajuste.



Fig. 24. Equipo para la determinación del módulo elástico.

2.7.3. Determinación de la resistencia a tracción indirecta

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

Para la realización de los ensayos, se utilizó una prensa servohidráulica universal. Todas las probetas fueron ensayadas aplicando la carga homogéneamente hasta rotura. La velocidad de aplicación de la carga es de 0,5 MPa/s. Las probetas ensayadas son los tercios de las probetas cilíndricas ensayadas en el ensayo de la determinación de la permeabilidad al agua bajo presión.

Una vez realizado el ensayo, obtenida la carga de rotura a tracción indirecta y tras haber caracterizado geoméricamente la probeta, la resistencia a tracción indirecta se calcula según:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

Donde:

- F es la carga máxima, expresada en N (Newtons), resistida por la probeta.
- L es la longitud de la línea de aplicación de la carga en mm.
- d es el diámetro en mm, de la probeta: 150 mm.
- f_{ct} es la resistencia a tracción indirecta expresada en MPa.

2.7.4. Determinación de la resistencia a flexotracción

Para la determinación de la resistencia a flexotracción de las probetas de hormigón, se han seguido las premisas establecidas en la norma UNE-EN 12390-5:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas*, con la variante de utilizarse dos rodillos de carga, se ha utilizado solamente uno (Fig. 25); además el diámetro de los cilindros inferiores utilizados fue de 25 mm y el del superior fue de 40 mm.



Fig. 25. Equipo para la determinación de la resistencia a flexotracción.

Las probetas elaboradas se corresponden con probetas prismáticas de 10 cm de lado y 40 cm largo. Tras su elaboración, las mismas fueron almacenadas en cámara húmeda (humedad y temperatura controladas) hasta el momento del ensayo, el cual tuvo lugar a los 28 días de edad.

La velocidad de aplicación de la carga está definida en la norma y es calculada mediante la siguiente expresión:

$$R(\text{inc. tensión}) = \frac{2s \cdot d_1 \cdot d_2^2}{3l}$$

Donde:

- s es el incremento de tensión en MPa.
- d_1 es la dimensión correspondiente con la profundidad de la probeta en mm.
- d_2 es la dimensión correspondiente con la altura de la probeta en mm.
- l es la distancia entre los centros de los rodillos en mm.
- R es el incremento de la carga en N/s.

Para la realización de los ensayos, se utilizó una prensa servohidráulica universal. Todas las probetas fueron ensayadas aplicando la carga homogéneamente hasta rotura.

$$\sigma = \frac{3F \cdot l}{2d_1 \cdot d_2^2}$$

Donde:

- F es la carga máxima, expresada en N (Newtons), resistida por la probeta.
- L es la longitud de la línea de aplicación de la carga en mm.
- d es el diámetro en mm, de la probeta: 150 mm.
- f_{ct} es la resistencia a tracción indirecta expresada en MPa.

2.8. Comportamiento del hormigón a altas temperaturas

Los ensayos descritos tienen por objetivo el conocimiento del comportamiento del hormigón frente a accidentes o imprevistos que conlleven elevaciones de temperatura durante cortos periodos de tiempo.

Para llevar a cabo los ensayos de caracterización del comportamiento del hormigón frente a choque térmico se han utilizado un total de 12 probetas cúbicas normalizadas. Se ha planteado una fase experimental que incluye la exposición a 6 temperaturas y la utilización de 2 probetas por temperatura. Las exposiciones a realizar comprenden las siguientes temperaturas:

$$105\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C} - 500\text{ }^{\circ}\text{C} - 700\text{ }^{\circ}\text{C} - 1000\text{ }^{\circ}\text{C} - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Las probetas ensayadas poseen 28 días de edad y han sido curadas en cámara con control de humedad y temperatura. La metodología empleada comprende 3 fases.

2.8.1. Proceso de aplicación del choque térmico

En la primera fase se retiran las probetas del horno en el que han estado sometidas a 105°C hasta alcanzar peso constante. Una vez las probetas han perdido toda su humedad han sido colocadas en el interior de una mufla (Fig. 26) donde han sido calentadas hasta alcanzar su temperatura de consigna, momento a partir del cual se han contabilizado 20 de exposición.

Las probetas son atemperadas dentro de la mufla apagada, por convección natural, hasta alcanzar la temperatura ambiente, momento en que comenzara la segunda fase del ensayo.

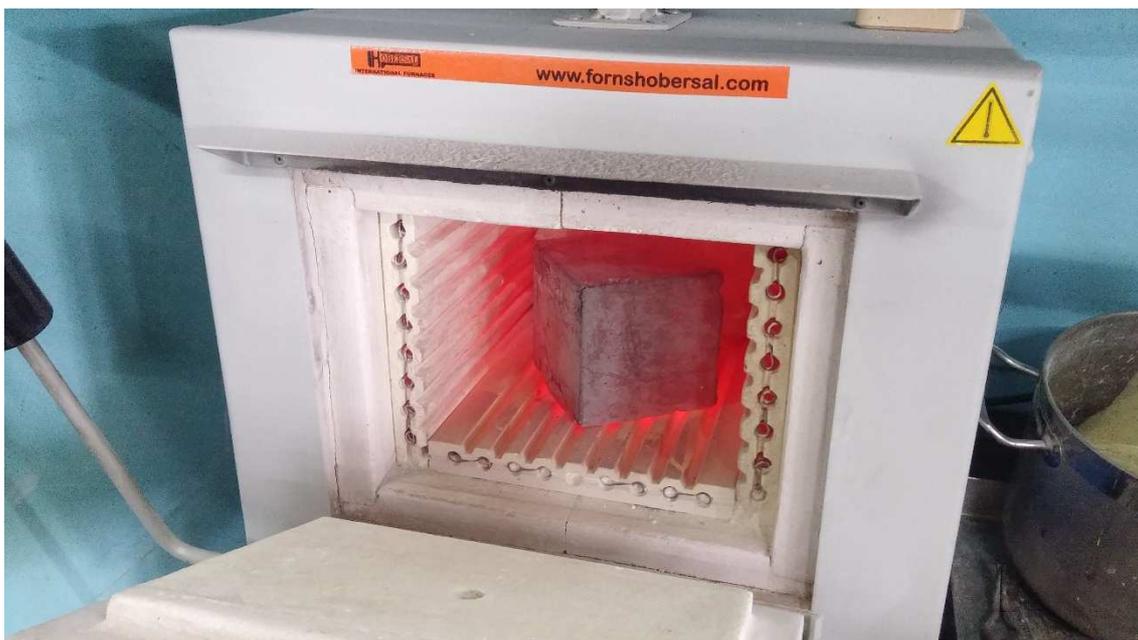


Fig. 26. Aplicación de gradiente térmico.

2.8.2. Determinación de impulsos ultrasónicos del hormigón tratado

La segunda fase consiste en la determinación de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos a través del hormigón tratado. El objetivo principal del ensayo no es otro sino comparar y relacionar la velocidad de estos impulsos con diversas propiedades físicas y mecánicas.

Los ensayos se han realizado según las directrices que marca la norma UNE-EN 12504-4:2006. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.*

El método consiste en la medición del intervalo de tiempo desde el comienzo de la onda del impulso generado en un transductor de entrada y el comienzo de la onda a su llegada al transductor receptor. El impulso se convierte en una señal eléctrica mientras que el equipo electrónico mide el tiempo de tránsito del impulso.

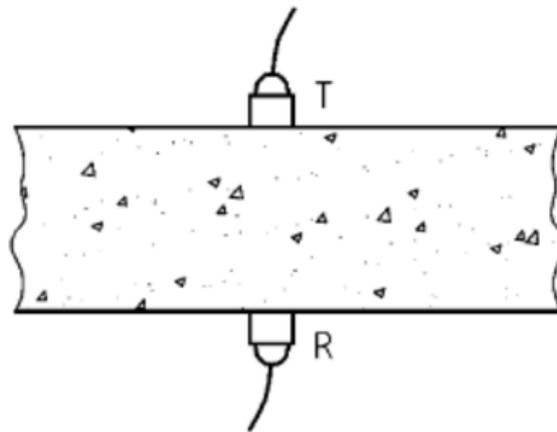


Fig. 27. Disposición de los palpadores en transmisión directa (UNE - EN 12504 – 4, 2006).

Dentro de las variantes que permite la norma, el ensayo ha sido realizado con un único transmisor y un receptor, en transmisión directa (Fig. 27). La longitud de la trayectoria es la distancia más corta entre palpadores y deberán realizarse varias lecturas del tiempo de recorrido hasta obtener un valor mínimo.

La norma establece el uso de un medio de acoplamiento adecuado a fin de obtener un buen contacto de acoplamiento acústico entre hormigón y palpador. En este caso es utilizada vaselina. En transmisiones directas la velocidad del impulso ultrasónico se calcula mediante la expresión:

$$v = \frac{l}{t}$$

donde:

- v : velocidad del impulso ultrasónico (km/s).
- l : longitud de la trayectoria recorrida, medida con un calibre (mm).
- t : tiempo que tarda el impulso en completar la trayectoria (μ s).

2.8.3. Resistencia a compresión uniaxial

La tercera fase consiste en la determinación de la resistencia a compresión uniaxial de las probetas sometidas a choque térmico.

El ensayo se realiza conforme a la metodología descrita por la norma UNE-EN 12390-3:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.* El ensayo ha sido descrito en el *Capítulo 2.7.1.* del presente documento.

Para la realización del ensayo se ha determinado la velocidad de carga constante, estableciendo una velocidad de variación de la tensión de 0.5 MPa/s.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Propiedades del cemento

La Tabla 5, muestra los resultados obtenidos en la caracterización del cemento.

Tabla 5. Propiedades del cemento

Cemento	Densidad [g/cm ³]	Superficie específica Blaine [cm ² /g]
CEM I 52.5N	3,04	4447

El cemento utilizado corresponde con un cemento clasificado como CEM I 52.5 N. Los cementos de tipo I deben de tener un contenido en clínker de Portland de al menos el 95%. Este cemento ha de tener una resistencia de al menos 52,5 MPa a los 28 días y de 20 MPa a los 7 días de edad. El identificador “N” designa que es un cemento de resistencia inicial normal.

La justificación del uso de este cemento corresponde con la necesidad de minimizar la dosificación de cemento para obtener una densidad superior y de garantizar la ausencia de partículas no deseables. Al ser el mejor aglomerante existente el mercado, se pueden conseguir las mismas capacidades resistentes que con un aglomerante inferior, utilizando menos cantidad de cemento total. Por otro lado, la ausencia de un medio físico agresivo que deteriore el hormigón, evite que sea necesario el uso de un cemento de protección específico.

La densidad obtenida es muy ligeramente superior a los 3 g/cm³, cifra que concuerda con la densidad teórica de un cemento de estas características.

La superficie específica Blaine obtenida, es del orden de magnitud, e incluso ligeramente superior, a otros cementos de igual clase a las que se ha podido tener acceso. La normativa española no establece unos valores estándar en cuanto a la finura del cemento, pero la ASTM establece una finura mínima de 2800 cm²/g para los cementos tipo I.

3.2. Propiedades de los áridos de alta densidad

3.2.1. Microestructura

La microscopía ofrecida por el microscopio electrónico de barrido permite visualizar los componentes principales contenidos en la superficie de los áridos. En las imágenes pueden distinguirse dos fases: una brillante de un color más claro y una fase de color oscuro. La fase brillante la conforman cristales de óxido de hierro, es más clara y brillante porque es una fase más densa. La parte más oscura la conforman trazas de diversos materiales pétreos, mayormente contenidos por silicatos de alúmina.

El microscopio electrónico de barrido arroja una imagen donde se observa una estructura más amorfa de la fase pétreo, donde incluso se pueden apreciar inclusiones planares o lajosas. La fase metálica presenta formas más regulares, con caras planas en parte de su superficie, denotando una estructura cristalina y más ordenada.

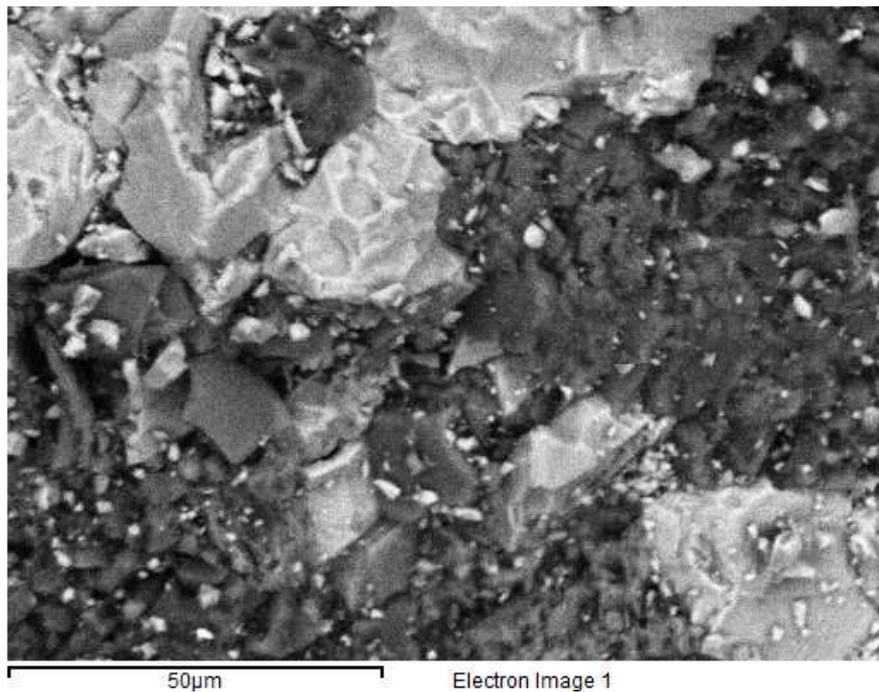


Fig. 28. *Detalle de la microestructura del árido de magnetita mediante SEM.*

Para una región de análisis mayor, como la mostrada en la Fig. 29, se aprecia mejor la distribución de las fases en la matriz del agregado. La fase metálica conforma el 70 % del volumen analizado. Esta fase posee un peso específico mucho mayor que la fase pétreo, y en términos de masa supone más del 90 % de la masa total del árido.

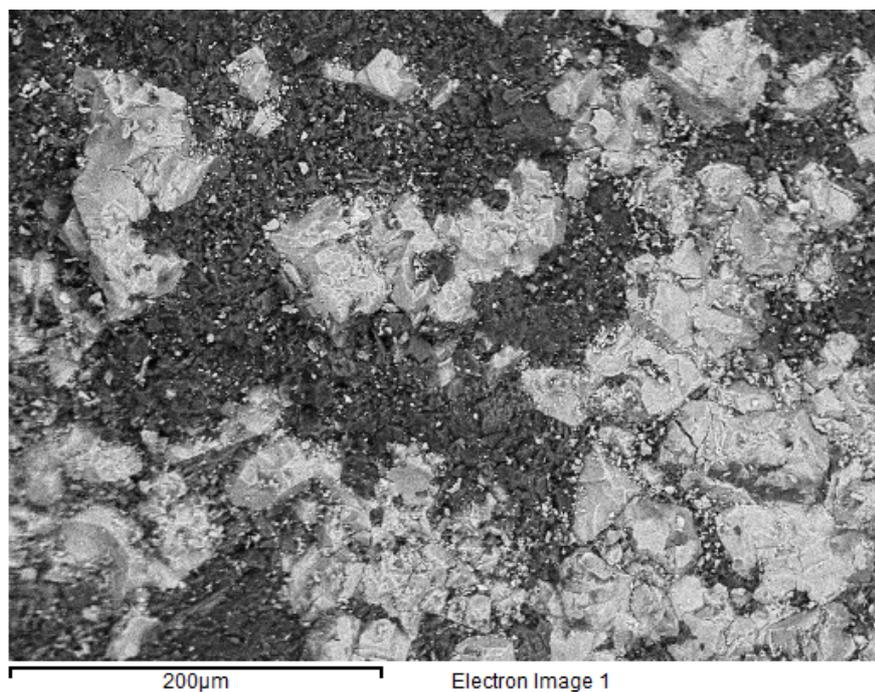


Fig. 29. *Detalle de la microestructura del árido de magnetita mediante SEM.*

3.2.2. Composición química elemental

La Tabla 6 muestra la composición química de la región de análisis 1 de la magnetita.

Tabla 6. Composición química de la región 1.

Elemento	Peso %	Atómico %
Mg	0,98	0,85
Al	12,77	9,96
Si	18,45	13,82
K	8,76	4,71
Fe	7,44	2,8

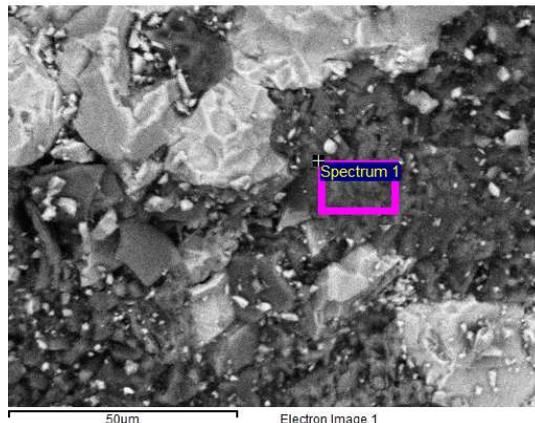


Fig. 30. Región de análisis 1.

El espectro mostrado por el EDX para la región de análisis 1, muestra un contenido alto en silicatos de aluminio, así como una gran presencia de potasio y partículas de hierro en forma de óxidos. También se muestran trazas de magnesio.

La Tabla 7 muestra la composición química de la región de análisis 2 de la magnetita.

Tabla 7. Composición química de la región 2.

Elemento	Peso %	Atómico %
Si K	0,63	0,73
Fe K	71,09	41,56

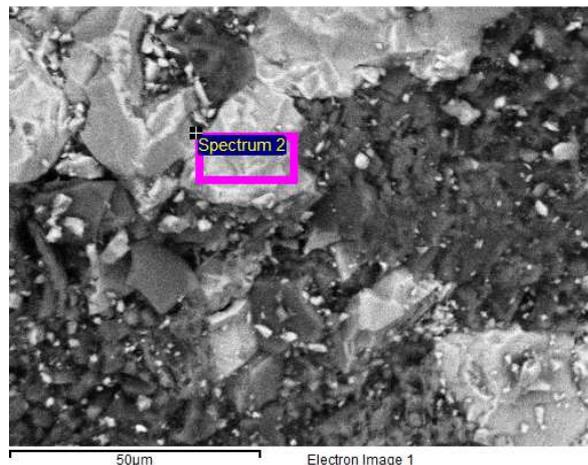


Fig. 31. Región de análisis 2.

El espectro mostrado de la región de análisis 2 analiza el contenido elemental de la fase metálica del árido. En la superficie analizada se muestra un alto contenido en hierro en forma de óxidos, así como trazas de silicatos.

En la Tabla 8 se muestra un detallado análisis composicional de otra región de estudio.

El espectro recoge una zona global de la superficie del árido e incluye las dos superficies anteriormente mencionadas. El compuesto con mayor presencia es el óxido de hierro (magnetita) seguido de óxido de silicio (sílice).

Tabla 8. Composición química de la región 3

Elemento	Peso %	Atómico %	Compuesto %	Fórmula
Na	3,47	4,09	4,68	Na ₂ O
Mg	1,53	1,7	2,53	MgO
Al	4,44	4,45	8,38	Al ₂ O ₃
Si	11,91	11,47	25,47	SiO ₂
K	0,89	0,62	1,08	K ₂ O
Ca	0,97	0,65	1,35	CaO
Ti	0,41	0,23	0,68	TiO ₂
Fe	43,39	21,02	55,82	FeO

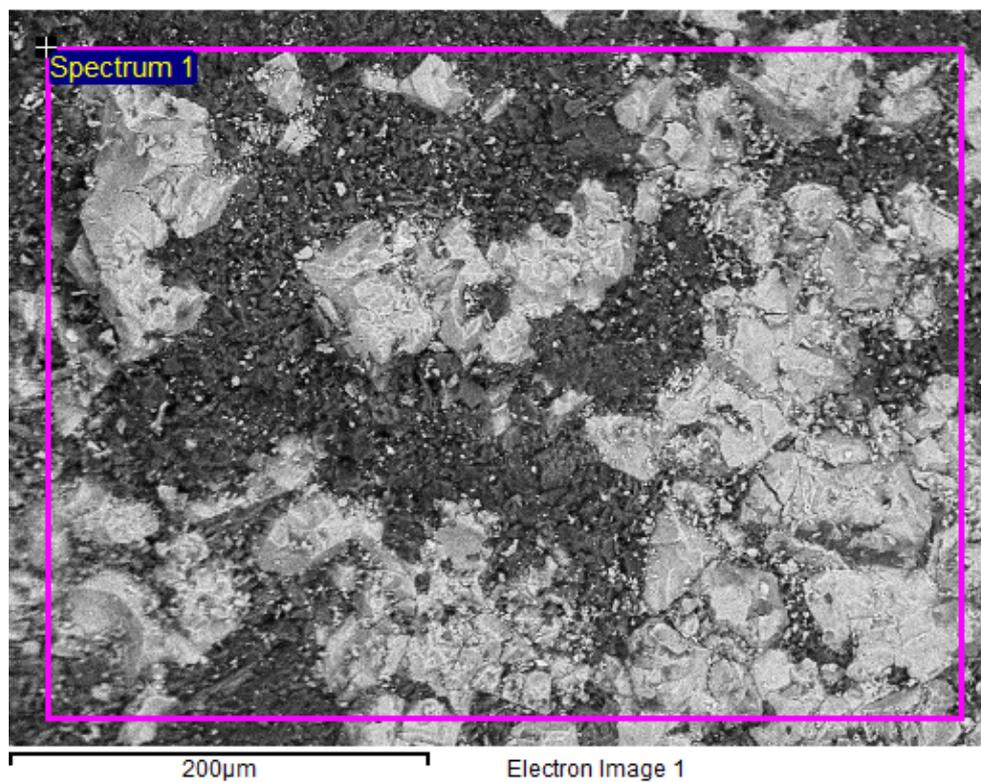


Fig. 32. Región de análisis 3.

3.2.3. Propiedades dimensionales y geométricas

A continuación, se presentan los análisis derivados de los resultados obtenidos para la caracterización de las propiedades dimensionales y geométricas de los áridos.

3.2.3.1. Análisis granulométrico

En la figura siguiente se muestran las curvas granulométricas del árido de alta densidad para cada una de sus tres fracciones.

Tabla 10. Índice de lajas para la grava y la gravilla.

Tamiz		Índice de lajas (IL)	
Malla (mm)	Barras (mm)	Grava (0/20)	Gravilla (0/8)
16	8	0	-
14	7,2	0	-
12.5	6,3	0	-
10	5	0,273	-
8	4	0,075	0
6,5	3,15	0,161	1,881
4	2,5	0,924	1,662

La normativa en la instrucción EHE-08 establece un índice de lajas máximo en el caso de los áridos gruesos, fijado en un 35% por lo que el árido tratado en el estudio cumple más que holgadamente los requisitos de forma que establece este parámetro, en su utilización con fines estructurales.

3.2.3.3. Coeficiente de forma

Coeficiente muy relacionado con el anterior, describe cuanto la forma del árido propende a ser cúbica. El material grueso carece de partículas no cúbicas entre sus finos, no así en las fracciones que abarcan los tamaños de 4 a 8 mm, donde el coeficiente de forma crece hasta el 10 %. Con el árido medio sucede justo lo contrario, el porcentaje de partículas no cúbicas es casi inexistente entre los tamaños de 4 a 8 mm, mientras que en la fracción fina se eleva hasta un 20 %. El coeficiente de forma de ambos áridos, medio y grueso, se sitúa en ambos casos entorno al 3%.

La antigua norma UNE 7238:71 establecía un coeficiente de forma límite inferior para el árido grueso del 0,20 % pero no sucede así con la instrucción vigente, la UNE-EN 933 – 4 sólo establece coeficientes de forma límite superiores de entorno al 27%, en todo caso muy superior a los coeficientes de forma manejados en el capítulo de resultados.

De cualquier modo, el árido objeto de estudio cumple con cualquier requisito dimensional exigido para un árido que cumpla funciones estructurales. En la Tabla 11 se muestran los coeficientes de forma tanto para la grava como para la gravilla.

Tabla 11. Coeficiente de forma de la grava y la gravilla.

Material	d a D (mm)	CF (%)	Promedio
0/20	2 a 4	0,00	3,41
	4 a 8	9,09	
	8 a 16	2,67	
0/8	2 a 4	19,74	2,24
	4 a 8	0,93	
	8 a 16	0,00	

3.2.4. Densidad de los áridos

La densidad de los áridos empleados en el estudio según la consulta en diversas fuentes bibliográficas se sitúa en la horquilla de 5-5,2 g/cm³, cifra muy parecida a la obtenida para el árido fino, situada en los 5,16 g/cm³. Esta diferencia ínfima puede deberse al contenido de magnetita en el mineral, que se sitúa en el 95% en masa. Los resultados obtenidos para los áridos medio y grueso se sitúan ligeramente por debajo de 5 g/cm³. Esta característica hace idóneo el uso de este árido para la fabricación de un hormigón de alta densidad.

La densidad de otros áridos comúnmente utilizados oscila. La barita tiene una densidad estandarizada de 4,2 g/cm³, mientras que la hematita se sitúa sobre los 5,2 g/cm³, asimismo la goethita tiene una densidad de 4 a 4,4 g/cm³ y la limonita una densidad de 3,6 a 4,4 g/cm³.

En la Tabla 12 se muestran las densidades obtenidas para cada una de las tres fracciones de árido.

Tabla 12. Densidad para cada una de las fracciones de magnetita.

Fracción	$d_R \left(\frac{g}{cm^3} \right)$
0/2 - arena	5,16
0/8 - gravilla	4,76
0/20 - grava	4,76

3.2.5. Machacabilidad

El estudio de la machacabilidad tiene como objetivo de conocer el comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de compresión, y más en concreto, el comportamiento de los áridos que conforman el hormigón como parte transmisora de esfuerzos en la matriz del propio hormigón. En el siguiente gráfico (Fig. 34) se muestra el comportamiento del árido grueso en términos de tensión-deformación.

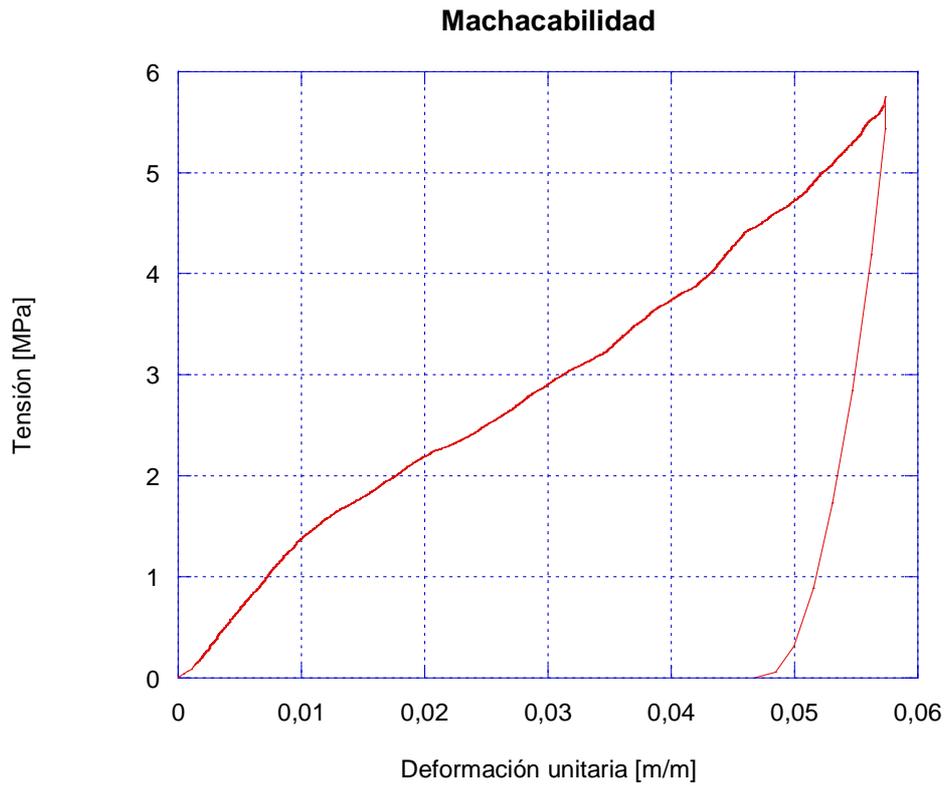


Fig. 34. Curva tension deformación para la fracción 0/20S.

A continuación (Fig. 35), se muestra el mismo comportamiento, pero de la mezcla de áridos correspondiente con la utilizada en la dosificación final del hormigón, correspondiente esta con un contenido relativo de árido medio del 73 % y de árido grueso del 27 %.

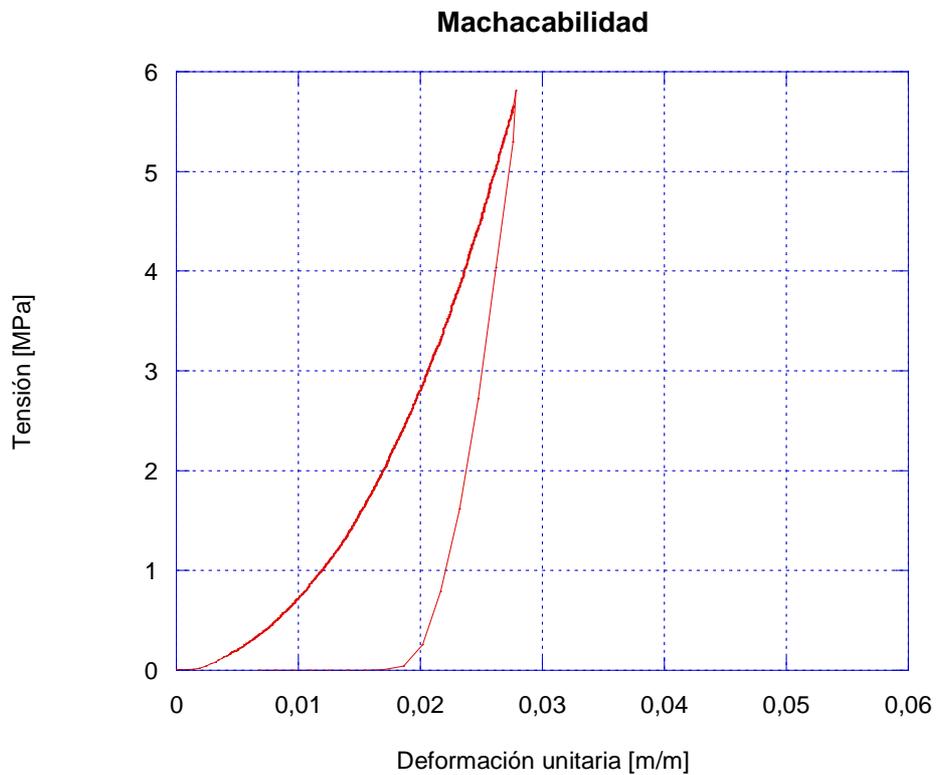


Fig. 35. Curva de tensión-deformación para la dosificación final de áridos.

Cabe realizar un análisis comparativo entre ambas gráficas. Puede observarse una deformación doble para la misma tensión aplicada en el caso del árido grueso. Este hecho puede explicarse debido a la existencia de un volumen de huecos mucho mayor, huecos que no pueden rellenarse con partículas contenidas en la granulometría de dicho árido, debido a su pobre graduación. En el caso de la figura correspondiente a la dosificación de áridos empleada para la mezcla, se observe un comportamiento deformacional mucho menor, debido al buen acomode de las partículas empleadas en el sentido de lograr un buen relleno de los huecos existentes entre las partículas de tamaño mayor.

3.3. Propiedades de las fibras

A continuación, se reflejan los resultados obtenidos en la caracterización de las fibras metálicas utilizadas como refuerzo para el diseño del hormigón de alta densidad planteado en el estudio.

3.3.1. Microestructura

En las siguientes figuras (0 y Fig. 37) se muestran las imágenes obtenidas con el SEM tanto de la sección de la fibra como del recubrimiento de la misma.

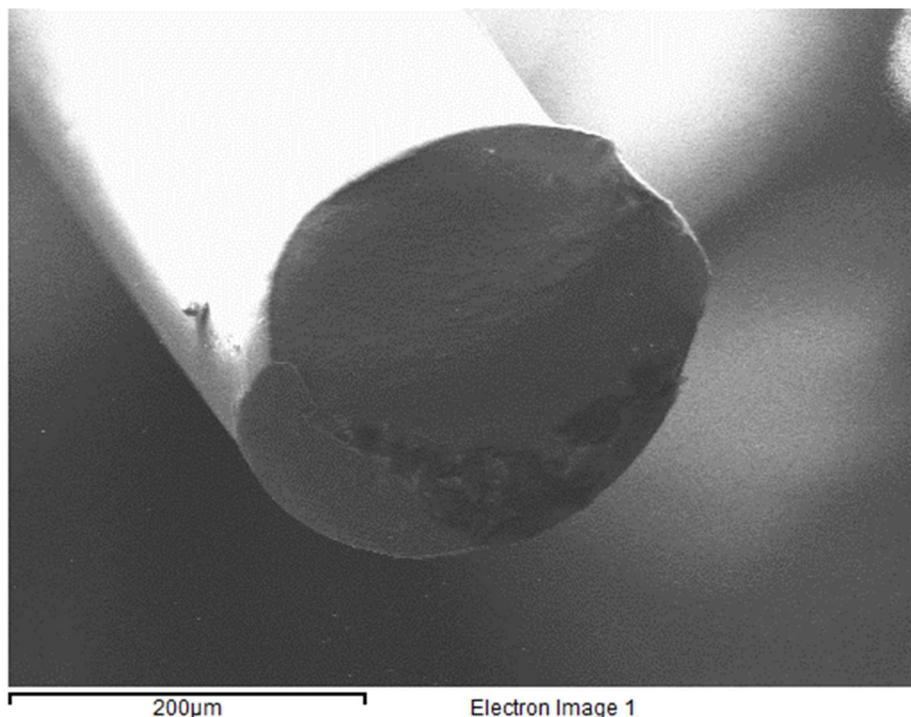


Fig. 36. *Detalle microestructural de la sección de una fibra*

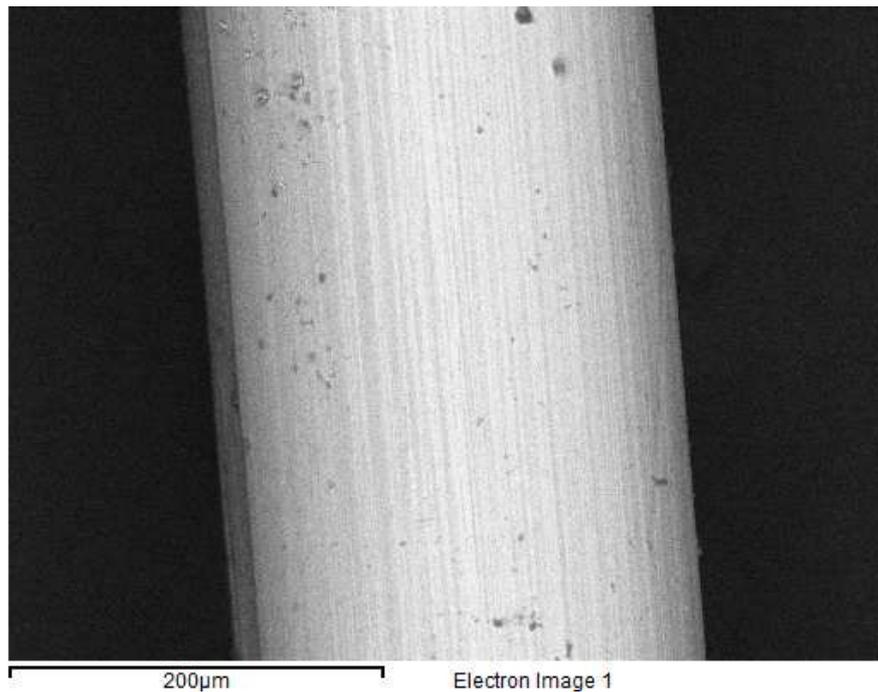


Fig. 37. Detalle microestructural de de una fibra.

De la imagen correspondiente con la sección de la fibra puede observarse una forma transversal circular, así como establecerse un diámetro de la sección de la fibra de 250 micras y observarse en detalle el corte por cizalla producido para la separación de la misma.

En la segunda imagen se ofrece una vista de la superficie exterior de la fibra, superficie impregnada por un recubrimiento que hace las veces de protección frente a la corrosión y donde también puede apreciarse el diámetro real de la sección transversal circular.

3.3.2. Composición química elemental

En la Tabla 13 se muestra el análisis composicional del recubrimiento de las fibras de acero obtenido por el EDX.

Tabla 13. Composición química del recubrimiento de las fibras de acero.

Elemento	Peso %	Atómico %
Fe K	59,33	62,61
Cu K	28,08	26,04
Zn K	12,59	11,35
Total	100	100

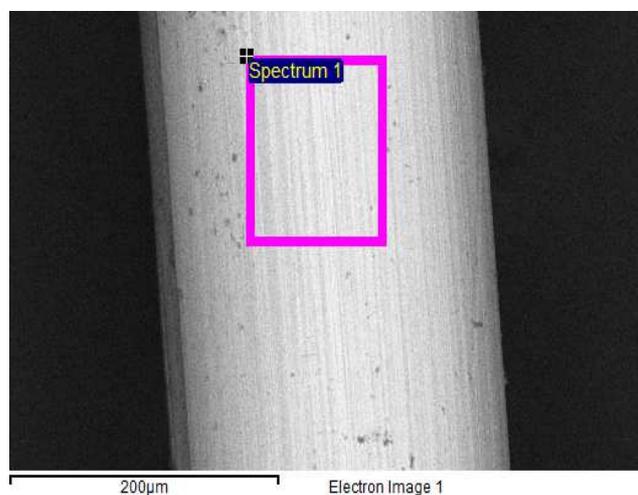


Fig. 38. Recubrimiento de fibras de acero.

Del análisis elemental del recubrimiento de la fibra de acero (Fig. 38) se extrae una grande presencia de hierro, que es completada por la presencia de una aleación de cobre-zinc (latón) de proporciones 70-30, un latón generalmente empleado para embuticiones profundas, con gran respuesta frente a la corrosión.

Sección de una fibra de acero:

En la Tabla 14 se muestra el análisis composicional del interior de las fibras de acero .

Tabla 14. Composición química del interior de las fibras de acero.

Elemento	Peso %	Atómico %
Fe	100	100
Total	100	100

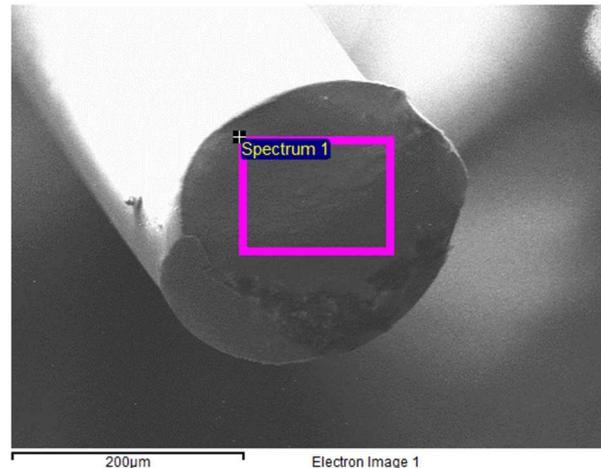


Fig. 39. Sección de una fibra de acero.

El alma de la fibra es casi totalmente de hierro (Fig. 39), con un contenido ínfimo en carbono que no llega a reflejar la tabla mostrada. Este tipo de fibras han demostrado un comportamiento francamente malo frente a la corrosión, incluido el recubrimiento, el cual al tener un contenido tan alto en hierro se ha corroído y despegado totalmente de la fibra al cabo de escasas 24 horas después de realizada la correspondiente amasada.

3.3.3. Análisis térmico (TGA/DSC)

Fibras de acero en atmósfera de argón

A continuación (Fig. 40), se muestran los resultados del ensayo TG-DSC realizado sobre las fibras de acero bajo una atmósfera inerte de argón. Queda reflejado, según la línea verde, la variación de la masa. Esta variación de masa es positiva, este caso es excepcional y puede deberse a dos situaciones: reacciones con los componentes gaseosos del gas de purga, que en este caso es inerte, o transformaciones físicas como la adsorción de productos gaseosos en las muestras.

Esta ganancia de masa se produce hasta alcanzar el punto de fusión del recubrimiento, que es de una aleación de latón. La ganancia de masa total se sitúa en torno al 1,5 %. A partir del punto de fusión del recubrimiento, de unos 750 °C, la fibra comienza a perder masa. Esta pérdida de masa es del 0,3 % desde la temperatura de fusión del recubrimiento hasta los 900 °C.

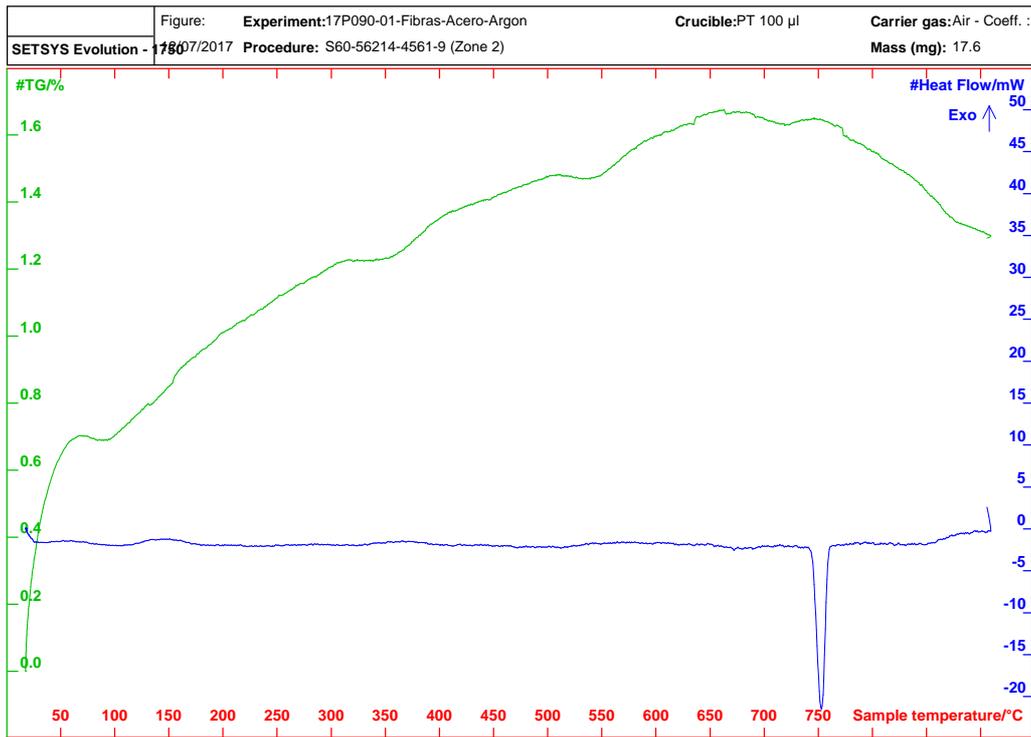


Fig. 40. TGA y DSC (subida).

En la figura Fig. 41 se visualiza en detalle la curva del ensayo de DSC.

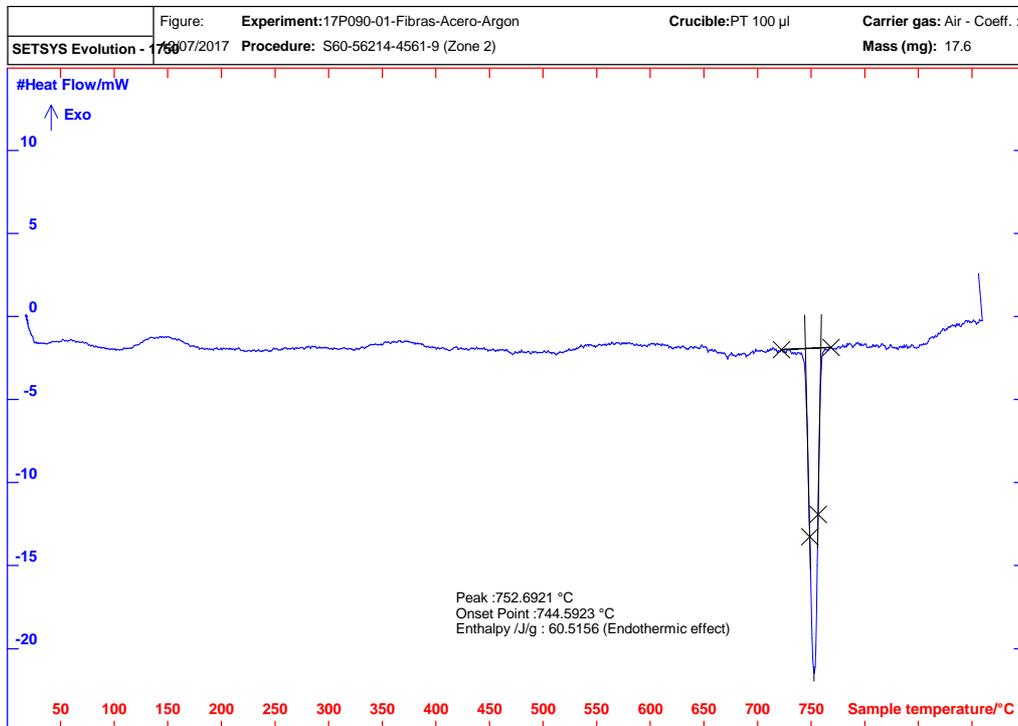


Fig. 41. DSC (subida).

La fusión del recubrimiento se detecta a los 744,59 °C y el pico de fusión se detecta a 752.69 °C. La fusión se produce en un proceso endotérmico con una entalpía de 60,51 J/g.

En bajada (Fig. 42), la temperatura de inicio de fusión se detecta a los 669,27 °C y el pico de fusión se detecta a los 686,05 °C. La entalpía de fusión se sitúa en los -77,81 J/g, proceso exotérmico, valor correspondiente con la integral definida entre los valores de pico, inicio y final de la fusión, conocida la masa de la muestra. Se comprueba como la entalpía es mayor en un proceso exotérmico que en un proceso endotérmico.

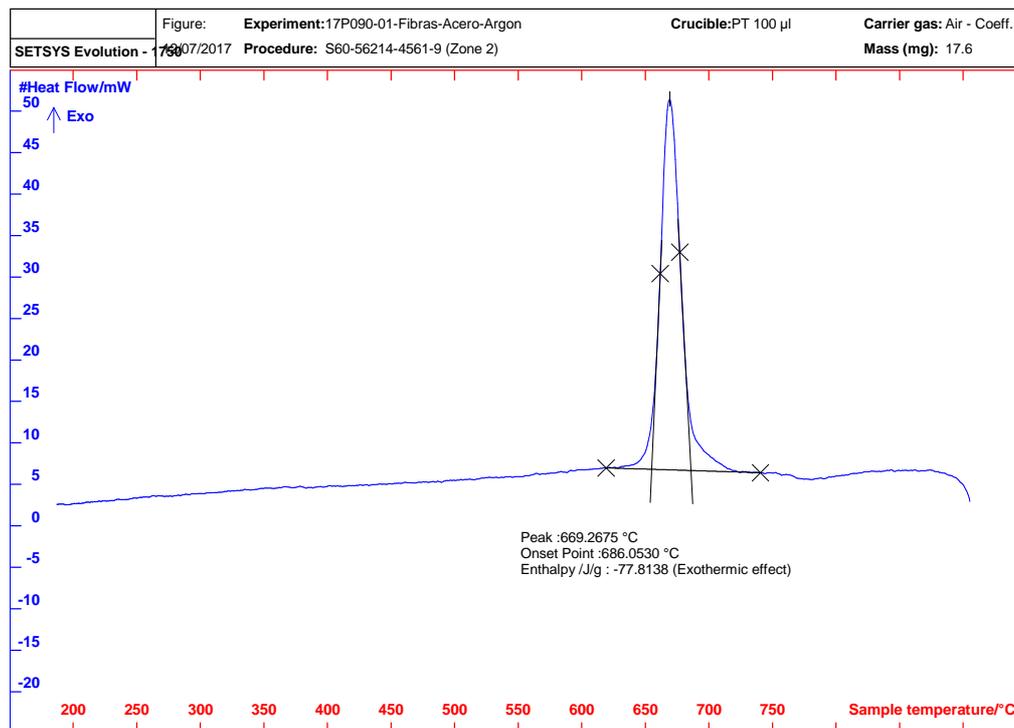


Fig. 42. DSC (bajada).

También se ha realizado un análisis térmico de las fibras de acero empleando aire como gas de purga. Normalmente se emplea aire cuando se desea cuantificar de forma exacta la cantidad de especies orgánicas adsorbidas por óxidos inorgánicos térmicamente resistentes, quemando totalmente dichas especies orgánicas.

En el análisis del ensayo de TG-DSC se muestra en la Fig. 43, donde puede verse acusado el fenómeno de desorción descrito con anterioridad, esto es debido a la naturaleza de la atmósfera empleada, cuyos componentes gaseosos; como el O₂ o CO₂, pueden reaccionar con algún componente de la propia fibra.

En la TG puede observarse como el aumento de masa de la fibra se eleva hasta el 6 % en masa hasta los 900 °C. Existe un aumento de masa inicial grande que puede ser debido a la adsorción de partículas contenidas en el agua evaporada. Este efecto es también acusado a los 800 °C

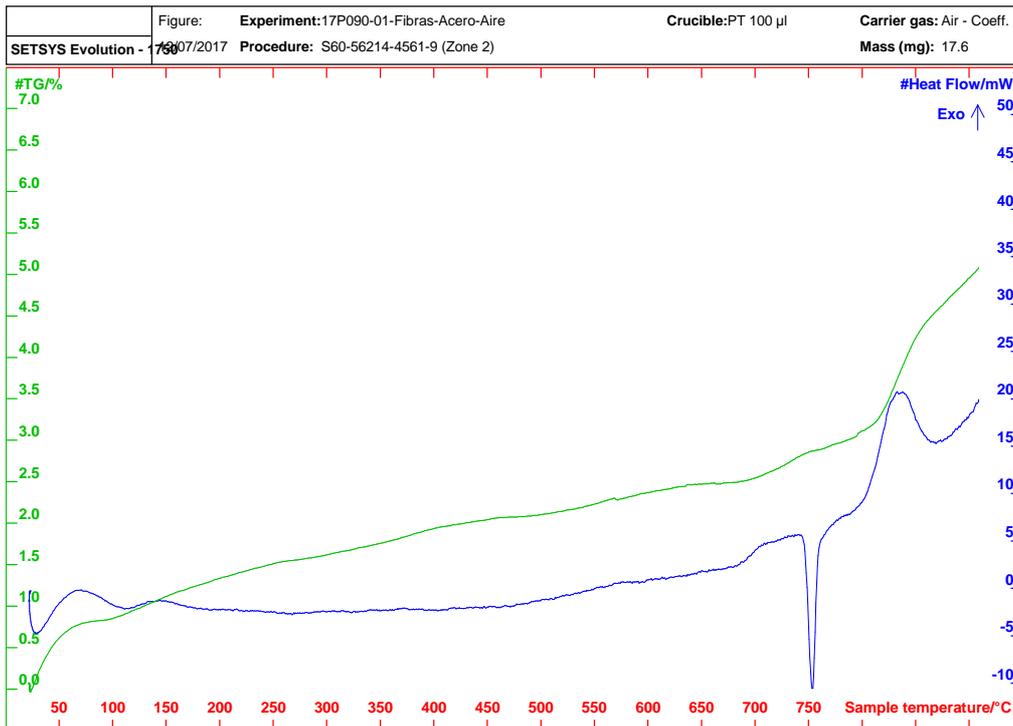


Fig. 43. TGA y DSC (subida).

En la Fig. 44 se visualiza el resultado de la DSC. Se observa el inicio del proceso de fusión del recubrimiento a 746,38 °C y el pico de fusión tiene lugar a 753,51 °C. El proceso es endotérmico y la entalpía de fusión es de 50,45 J/g, menor que en el ensayo realizado con atmósfera de argón.

Asimismo se vuelve a comprobar que en el proceso de bajada, la entalpía asociada al proceso de fusión exotérmico -62,69 es ligeramente mayor a la mostrada cuando el proceso es endotérmico, proceso caracterizado por unas temperaturas de inicio y de pico de 672,28 °C y 683,02 °C respectivamente. Este efecto puede visualizarse mejor en la Fig. 45.

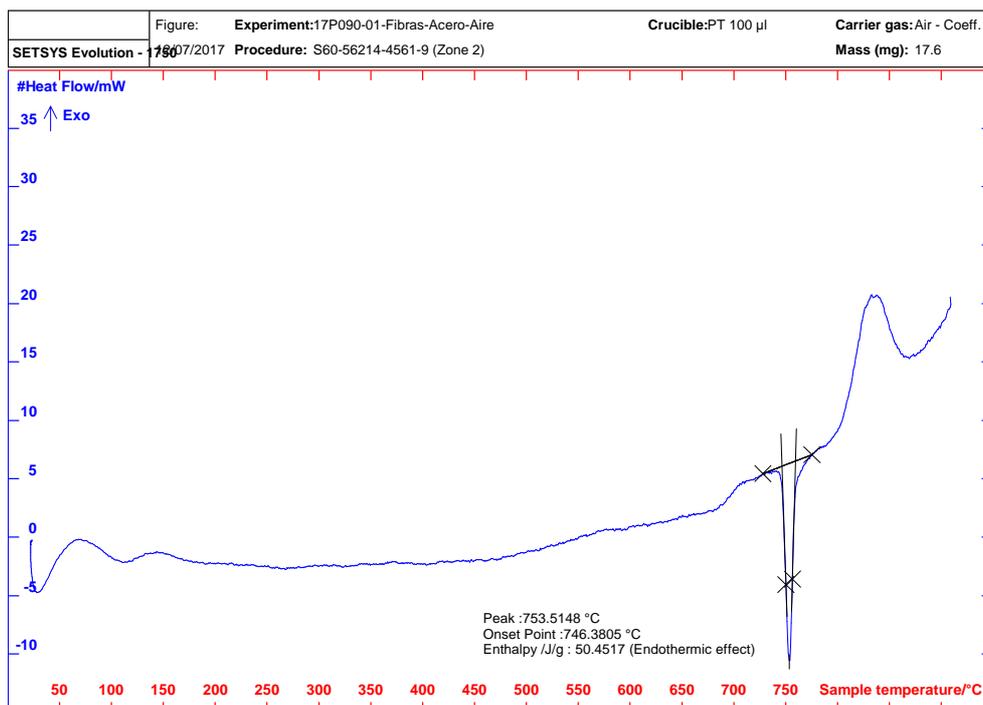


Fig. 44. DSC (subida).

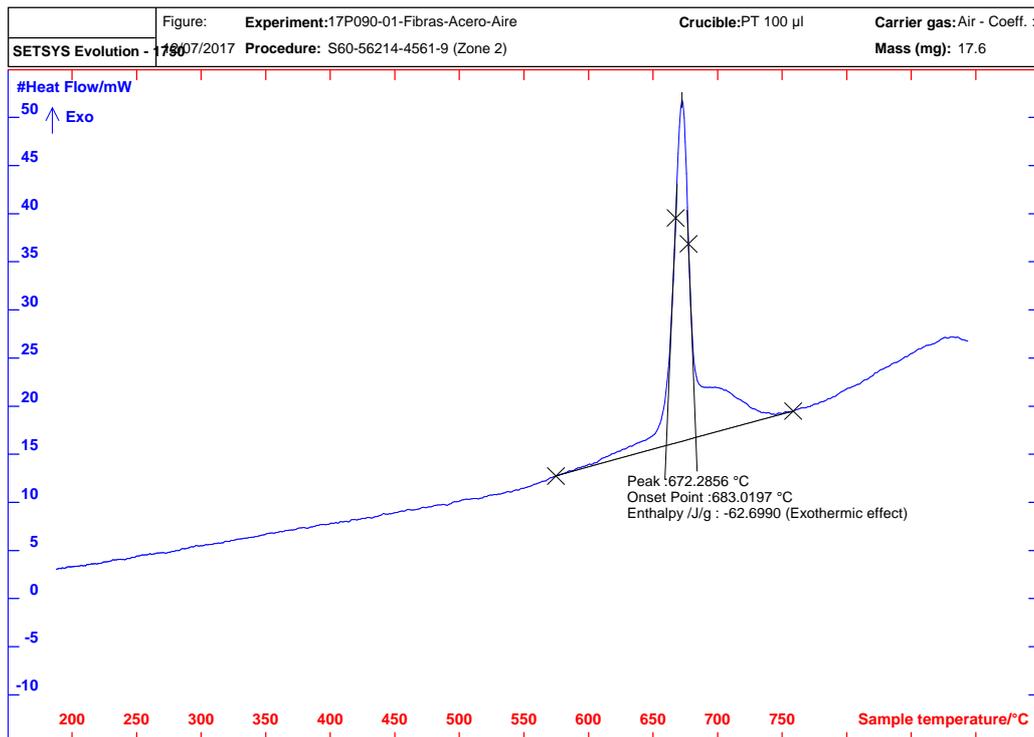


Fig. 45. DSC (bajada).

En cualquier caso, las temperaturas que permite alcanzar el equipo de termogravimetría no permiten determinar el comportamiento térmico del interior de la fibra de acero.

3.3.4. Densidad y propiedades geométricas

A continuación, se reflejan las propiedades geométricas de las fibras de acero utilizadas durante el estudio, según lo dispuesto en la tabla Tabla 15.

Tabla 15. Propiedades geométricas de las fibras de acero.

Tipo	D medio (mm)	L media (mm)	ρ fibras (g/cm ³)
Acero	0,25	12,5	7,8

Las fibras utilizadas en el presente trabajo pueden considerarse como fibras cortas y rectas, este tipo de fibras poseen una ventaja principal que es la mejora de la retracción por secado, aunque también mejoran la resistencia a tracción del hormigón.

Debido a que son fibras cortas, lisas, rectas y de pequeño diámetro, la adherencia al hormigón es bastante reducida. Este tipo de fibras da buenos resultados para trabajar con microfisuras si la dosificación empleada es lo suficientemente alta, en el caso de estudio se emplea una dosificación intermedia de fibras. Esta dosificación de fibras ha sido seleccionada a fin de evitar problemas en la trabajabilidad del propio hormigón, mientras que se ha buscado la mejora en la resistencia a tracción y la reducción de la aparición de microfisuras, además de tener un papel activo en el incremento de la densidad global del hormigón.

3.4. Dosificaciones del hormigón

Durante el proceso de fabricación se han testeado numerosas dosificaciones. El punto de partida ha sido marcado por la dosificación calculada por el método de Fuller. Durante el proceso de cálculo se observó una adaptación casi perfecta a la parábola de Hessner utilizando únicamente las fracciones de grava y de gravilla, en la proporción adecuada.

Obtenida una dosificación, comenzaron las primeras amasadas. Estas fueron realizadas sin fibras y permitieron realizar diversas modificaciones como el incremento en la dosificación de la gravilla a fin de reducir cierta segregación formada en la mezcla. Otro cambio introducido fue la disminución de la cantidad de pasta para así intentar alcanzar los 4 g/cm^3 que se propusieron desde un principio, cambio introducido tras comprobar la más que satisfactoria resistencia del hormigón amasado. Por otro lado, al comenzar a realizar amasadas con la incorporación de fibras, se obtuvieron consistencias demasiado bajas, motivo por el cual se incrementó la relación de agua cemento, así como la dosificación del aditivo superfluidificante, estableciéndose en el 0,75%.

Las premisas para la elaboración de un hormigón de alta densidad estructural, fueron establecidas en términos de densidad y de trabajabilidad principalmente. A este último respecto se estableció el objetivo de alcanzar un asentamiento en el cono de Abrams de 15 cm.

Otras condiciones menos restrictivas, son las establecidas en términos de resistencia y de durabilidad. El hormigón planteado habría de poseer una resistencia propia de un hormigón estructural, aun sabiendo que los grosores que se barajan de hormigones para protección radiológica son considerables, y sobredimensionados para este ámbito. En términos de durabilidad, se ha planteado la existencia de un ambiente no agresivo, entendiéndose este como un ambiente que altere las propiedades del hormigón endurecido.

La dosificación final planteada se presenta en la Fig. 46.

Dosificación	Componente	Dosificación (kg/m ³)	Volumen (l)
	Cemento I R-52.5	300	100
	Agua	176,47	176,47
	Gravilla (0/8)	2666,67	560,22
	Grava (0/20)	1000,00	210,08
	Glenium	4,00	3,64
	Fibras (kg)	40,00	5,13
	TOTAL	4187,14	1000
	Agua/cemento:	0,59	
	Vol fibras (%):	0,51	
Densidad (g/cc):	4,19		

Fig. 46. Dosificación del hormigón.

3.4.1. Estimación de probetas

	Ensayo	Tipo de probetas			
		Cilíndricas 15x30	Cilíndricas 10x20	Prismáticas	Cúbicas
Radiación	Testigos	3	-	-	-
Propiedades físicas (hormigones)	Densidad	4	-	-	-
	Absorción				
	Porosidad				
	Ultrasonidos				
Propiedades mecánicas (hormigones)	Compresión	-	-	-	5
	Tracción indirecta	-	-	-	-
	Módulo de elasticidad	4	-	-	-
	Flexión	-	-	4	-
Durabilidad	Permeabilidad agua	-	-	-	-
	Permeabilidad aire	-	-	-	-
	Hielo-deshielo	-	5	-	-
	Humedad-sequedad	-	5	-	-
Efecto temperatura	Visual	-	-	-	12
	Ultrasonidos				
	Compresión				
Gradientes térmicos	Físico-mecánicas	-	-	-	12
	SEM	-	-	-	-
	TOTAL	11	10	4	17
	Litros	58,3	15,7	16	17
Probetas totales	42				
Volumen Total (l)	107				

La estimación de probetas ha sido realizada previo establecimiento de los tipos de ensayos necesarios para la caracterización del hormigón y del número de probetas requerido por cada ensayo.

3.4.2. Consistencia del hormigón fresco

Como se ha comentado con anterioridad, antes de la fabricación del hormigón de alta densidad se estableció la necesidad de obtener un asiento del cono de Abrams de 15 cm, necesario para tener una satisfactoria trabajabilidad del hormigón en estado fresco. Esta consistencia está considerada como fluida (10-15 cm) aun para hormigones que no incorporan fibras.

Para lograr una consistencia así se han planteado problemas de segregación de los áridos gruesos, así como problemas de exudación, al tratar de mejorar la consistencia mediante la adición de agua. La utilización de un aditivo superplastificante logra mejorar este parámetro de manera significativa, de igual modo que mejora la puesta en obra y compactación del hormigón.

Finalmente, en la batería de amasadas realizadas han sido obtenidos los valores de consistencia mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de asiento del cono de Abrams.

Fecha	Amasada	Cono (cm)	Litros	Relación w/c
09-may	Con Fibras	16	15	0,59
09-may	Con Fibras	15	15	0,59
22-may	Con Fibras	13	51	0,59
22-may	Con Fibras	15	35	0,59
08-jun	Con Fibras	13	50	0,59
08-jun	Con Fibras	15	30	0,59
13-jun	Con Fibras	11	30	0,59
02-ago	Sin Fibras	15	20	0,59
03-ago	Con Fibras	11	40	0,59

3.4.3. Inventario de probetas

Para el correcto seguimiento de las probetas utilizadas o requeridas en cada uno de los ensayos programados en el presente estudio, se ha confeccionado una tabla en la que se reflejan todas las amasadas realizadas, así como cada uno de los ensayos realizados con cada probeta fabricada. En la Tabla 17 aparece registrado el inventario de probetas.

Tabla 17. Inventario de probetas.

Amasada	Numeración	Tipo probeta	Ensayo	Realizado
	HAD-03-01	Cúbica	RC+D	V
	HAD-03-02	Cúbica	RC+D	V
	HAD-03-03	Cúbica	RC+D	V
I	HAD-03-04	Cúbica	RC+D	V
	HAD-03-05	Cúbica	RC+D	V
	HAD-03-A1	Cilíndrica	D+SE+Po	V
	HAD-03-A2	Cilíndrica	D+SE+Po	V
IV	HAD-80-01	Cúbica	RC+D	V

Amasada	Numeración	Tipo probeta	Ensayo	Realizado
	HAD-80-02	Cúbica	RC+D	X
	HAD-80-03	Cúbica	RC+D	V
	HAD-80-A1	Cilíndrica	D+SE+Po	V
	HAD-80-P1	Prismática	Fle	X
	HAD-80-M1	Cilíndrica (m)	RC+D	X
V	HAD-40-01	Cúbica	RC+D	V
	HAD-40-02	Cúbica	RC+D	V
	HAD-40-P1	Prismática	Fle	V
VI	HAD-40-03	Cúbica	RC+D	V
	HAD-40-04	Cúbica	RC+D	X
	HAD-40-P2	Prismática	Fle	V
	HAD-40-A1	Cilíndrica	-	-
VII	HAD-40-05	Cúbica	RC	V
	HAD-40-06	Cúbica	RC	V
	HAD-40-07	Cúbica	RC	V
	HAD-40-08	Cúbica	RC	V
	HAD-40-09	Cúbica	RC	V
	HAD-40-10	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-11	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-12	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-13	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-14	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-15	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-16	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-17	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-18	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-19	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-20	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-21	Cúbica	Vis/US/Comp	V
	HAD-40-P3	Prismática	Fle	V
	HAD-40-P4	Prismática	Fle	V
	HAD-40-P5	Prismática	Fle	V
	HAD-40-P6	Prismática	Fle	V
	HAD-40-A2	Cilíndrica	D+SE+Po/TI	V
	HAD-40-A3	Cilíndrica	D+SE+Po/TI	V
	HAD-40-A4	Cilíndrica	D+SE+Po/TI	V
	HAD-40-A5	Cilíndrica	D+SE+Po/TI	V
HAD-40-M1	Cilíndrica (m)	h-s	V	
HAD-40-M2	Cilíndrica (m)	h-s	V	
HAD-40-M3	Cilíndrica (m)	h-s	V	
HAD-40-M4	Cilíndrica (m)	h-s	V	
HAD-40-M5	Cilíndrica (m)	h-s	V	
HAD-40-M6	Cilíndrica (m)	h-s	V	
HAD-40-M7	Cilíndrica (m)	h-s	V	

Amasada	Numeración	Tipo probeta	Ensayo	Realizado
	HAD-40-M8	Cilíndrica (m)	h-s	V
	HAD-40-M9	Cilíndrica (m)	h-s	V
	HAD-40-M10	Cilíndrica (m)	h-s	V
VIII	HAD-00-P1	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P2	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P3	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P4	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P5	Prismática	Fle	V
IX	HAD-40-A6	Cilíndrica	Mod	V
	HAD-40-A7	Cilíndrica	Mod	V
	HAD-40-A8	Cilíndrica	Mod	V
	HAD-40-A9	Cilíndrica	Mod	V
	HAD-40-A10	Cilíndrica	Testigos	V
	HAD-40-A11	Cilíndrica	Testigos	V
	HAD-40-A12	Cilíndrica	Testigos	V
	HAD-40-22	Cúbica		-
	HAD-40-23	Cúbica	T-RC	V
	HAD-40-24	Cúbica		-
	HAD-40-25	Cúbica	T-RC	V
	HAD-40-26	Cúbica		-
	HAD-40-27	Cúbica	T-RC	V
	HAD-40-28	Cúbica	T-RC	V
HAD-40-29	Cúbica	T-RC	V	
Micro	HAD-μ-S1	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S2	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S3	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S4	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S5	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S6	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S7	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S8	Cilíndrica (s)	h-s	V
	HAD-μ-S9	Cilíndrica (s)	Ctrol	V
	HAD-μ-S10	Cilíndrica (s)	Ctrol	V
	HAD-μ-S11	Cilíndrica (s)	Ctrol	V
	HAD-μ-S12	Cilíndrica (s)	Ctrol	V
	HAD-μ-S13	Cilíndrica (s)	Ctrol	V
	HAD-μ-S14	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S15	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S16	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S17	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S18	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S19	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S20	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD-μ-S21	Cilíndrica (s)	T-RC	V

Amasada	Numeración	Tipo probeta	Ensayo	Realizado
	HAD- μ -S22	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD- μ -S23	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD- μ -S24	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD- μ -S25	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD- μ -S26	Cilíndrica (s)	T-RC	V
	HAD- μ -S27	Cilíndrica (s)	T-RC	V
X	HAD-00-P6	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P7	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P8	Prismática	Fle	V
	HAD-00-P9	Prismática	Fle	V
XI	HAD-40-P7	Prismática	Fle	V
	HAD-40-P8	Prismática	Fle	V
	HAD-40-P9	Prismática	Fle	V
	HAD-40-P10	Prismática	Fle	V
	HAD-40-A13	Cilíndrica	Mod	V
	HAD-40-A14	Cilíndrica	Mod	V

3.5. Propiedades físicas del hormigón

Los resultados obtenidos en el apartado de propiedades físicas se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Propiedades físicas del hormigón endurecido.

T (°C)	D. ap. (g/cm ³)	D. rel. (g/cm ³)	Porosidad (%)	Absorción (%)
105	3,88	4,30	9,82	2,53
300	3,75	4,26	12,10	3,23

Tanto los valores de porosidad como de absorción obtenidos se sitúan dentro del rango de los valores normales para un hormigón estructural. El efecto de la temperatura sobre las variables estudiadas es apreciable, viéndose reducidos todos ellos con el aumento de esta. Este efecto es debido a la aparición de pequeñas microfisuras en la pasta de cemento, elevando tanto el volumen aparente del hormigón, como el volumen de poros de accesible.

Un hormigón de alta densidad es considerado aquel cuyo peso específico supera los 2,8 g/cm³. La densidad aparente del hormigón de alta densidad elaborado se sitúa ligeramente por debajo de los 4 g/cm³. Algunos ejemplos de los diversos estudios realizados sobre la elaboración de este tipo de hormigones han obtenido diferentes valores. Ahmed S. Ouda (2014) obtiene unos valores de densidad aproximados de 3,1 g/cm³ para hormigón con barita, 2,74 g/cm³ para hormigón con agregado de goethita, 2,51 g/cm³ para el hormigón con base serpentinita y 2,8 g/cm³ para hormigón con magnetita.

Por otro lado, se han encontrado densidades de hormigones de alta densidad del rango de 2,6-3,5 g/cm³ para la barita, 3,6 g/cm³ para la magnetita, 3,75 g/cm³ para la ilmenita y los más altos para la limonita con oscilaciones entre 4-4,4 g/cm³ y los agregados de ferrofósforo que se sitúan en torno a los 4,5-4,8 g/cm³ (Facure y Silva, 2007).

Existe un estudio realizado por I.I. Bashter (1997) en el que se utilizan hormigones con base magnetita. Estos hormigones llevan incorporados árido mixto, integrado en el árido magnetítico aceros (hasta $5,1 \text{ g/cm}^3$) y basalto (3 g/cm^3), para su posterior comparación con un hormigón que integra totalmente árido de magnetita ($3,29 \text{ g/cm}^3$).

El hormigón obtenido con agregado de magnetita supera en términos de densidad a todos los que se ha obtenido acceso en la literatura.

3.6. Durabilidad del hormigón

3.6.1. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno

La permeabilidad al oxígeno conforma la técnica más sensible de todas las existentes en la determinación de la durabilidad del hormigón. A diferencia del agua, cuya penetración rara vez alcanza a atravesar la longitud total de la probeta, el oxígeno como gas que es, tiene la capacidad de recorrer y atravesar la red capilar y los poros que conforman en parte la microestructura del hormigón. Por otro lado, el coeficiente de permeabilidad al oxígeno puede aumentar en el transcurso del tiempo, debido a que la presión ejercida por el propio gas puede incrementar el volumen de grietas del hormigón. En la Tabla 19 se recogen los resultados obtenidos para este ensayo.

Tabla 19. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno.

T (°C)	$K_{O_2} (m^2)$
105	1,03E-16
300	1,16E-16

Los valores obtenidos para este parámetro pueden ser aceptables para un hormigón de clase estructural, aunque bien es cierto que los valores mostrados tienden a ser bajos. Se observa un efecto negativo de la temperatura sobre esta propiedad, de modo similar al que ocurre con la porosidad.

Al elevar la temperatura de 105 a 300, aumenta la permeabilidad al oxígeno casi un 13 %, mientras que la porosidad aumentaba escasamente un 2,3 %. Aquí se vuelve a poner de manifiesto la elevada facilidad con que un gas recorre los entramados capilares, y la sensibilidad de la permeabilidad al oxígeno frente a la variación de otros parámetros.

3.6.2. Permeabilidad al agua bajo presión

La permeabilidad al agua, como ya se ha expresado con anterioridad, depende la disposición de los poros en la estructura. Aunque la permeabilidad al oxígeno y la permeabilidad al agua bajo presión están intrínsecamente relacionadas, puede existir una diferencia en la evolución de ambas con el tiempo. Existe un fenómeno de hidratación de la pasta de cemento, que sucede cuando parte de esta se ha quedado sin hidratar durante los 28 días de curado, este efecto hace disminuir el valor de la permeabilidad al agua bajo presión con el tiempo. En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 20. Permeabilidad al agua bajo presión.

Temperatura (°C)	Penetración máxima (cm)
105	6,97
300	7,83

La penetración máxima del agua bajo presión en las probetas analizada, supera en promedio los 5 cm que establece la norma para un hormigón estructural. La obtención de valores tan altos se debe en gran parte a la alta relación de agua-cemento utilizada, establecida en 0,59. Los requerimientos no estructurales planteados, en términos de consistencia, principalmente, son los responsables de la elección de esta relación de agua-cemento. Por otro lado, la no utilización de armaduras y los espesores tan grandes utilizados, justifican en parte la utilización de este hormigón con estos valores de penetración máxima obtenidos.

3.6.3. Ciclos de humedad-sequedad

En las figuras Fig. 47, Fig. 48, Fig. 49 y Fig. 50 se refleja la evolución de los pesos seco y húmedo a lo largo de los ciclos.

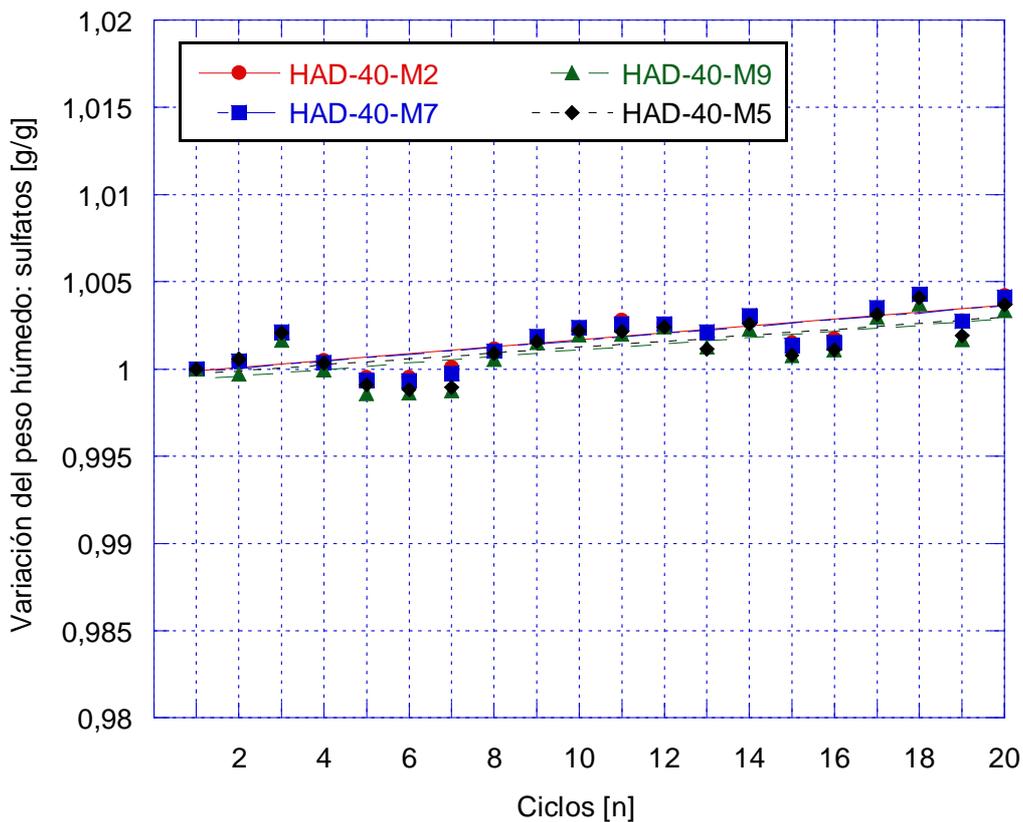


Fig. 47. Evolución del peso húmedo: sulfatos.

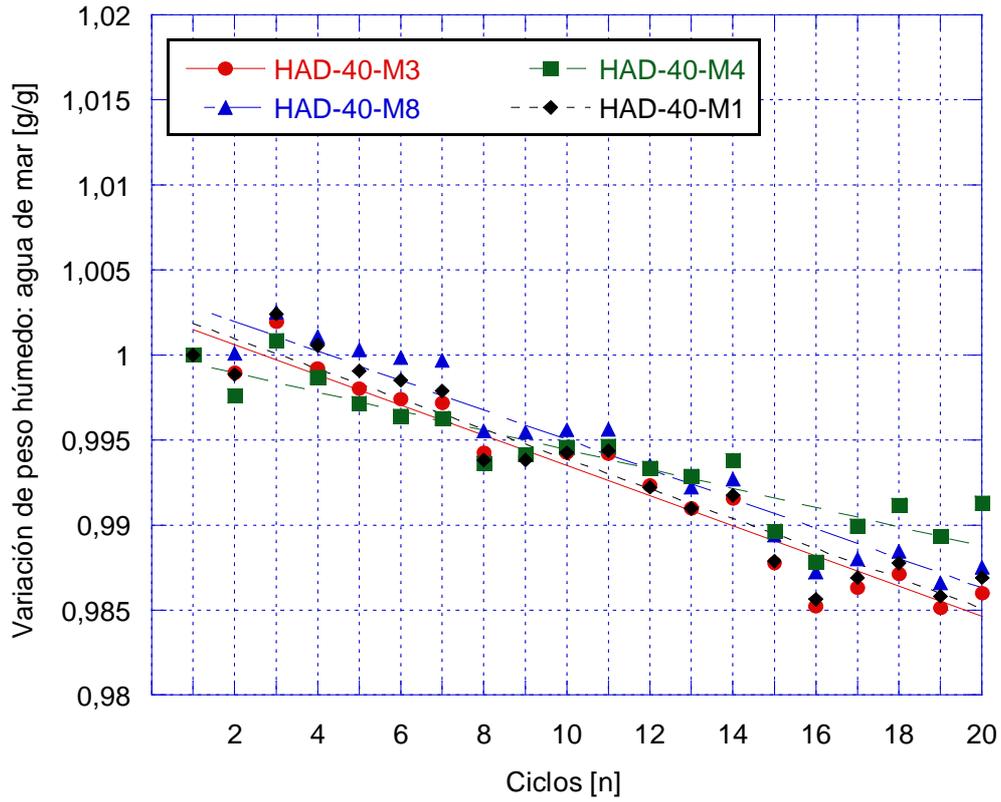


Fig. 48. Evolución del peso húmedo: agua de mar.

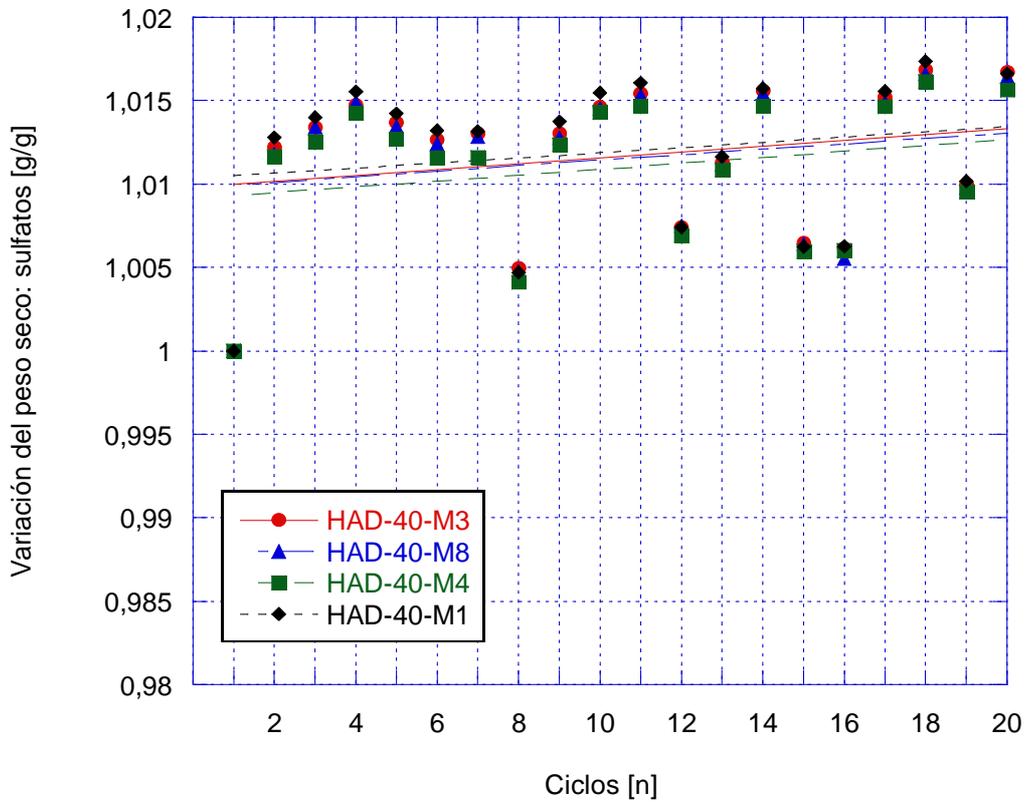


Fig. 49. Evolución del peso seco: sulfatos.

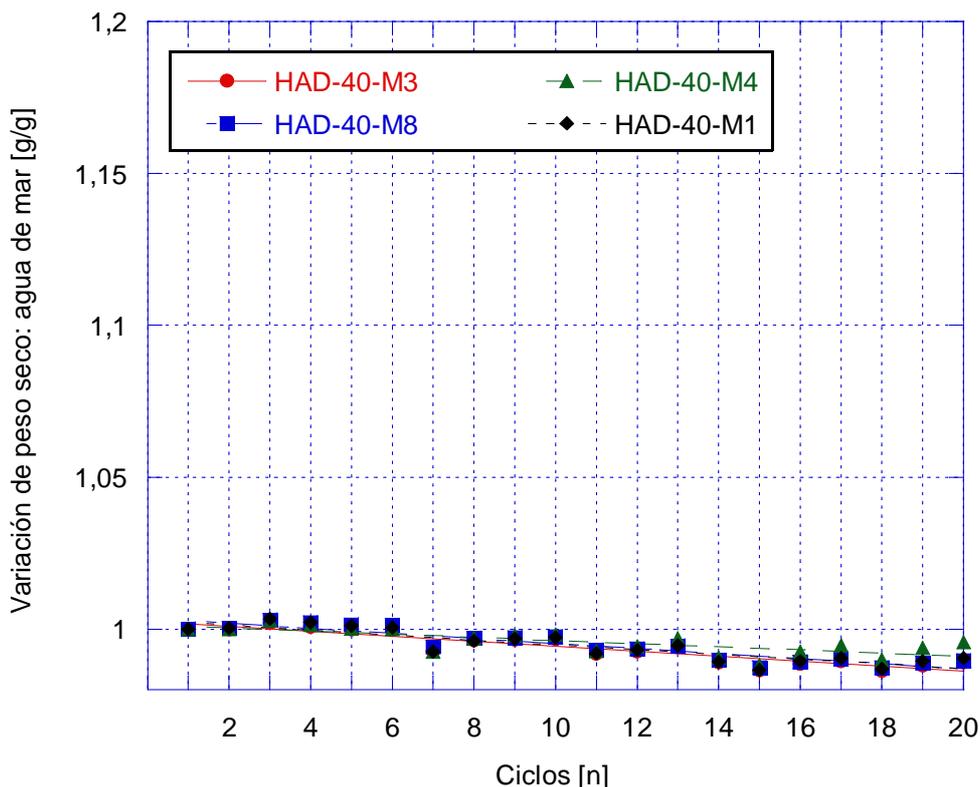


Fig. 50. Evolución del peso seco: agua de mar.

El comportamiento de las probetas de hormigón de alta densidad expuestas a ciclos de humedad-sequedad en ambiente con sulfatos está caracterizado por un incremento relativo de masa para ambos pesos, seco y húmedo. El peso húmedo aumenta un 0,3 % con respecto a la situación inicial mientras que el peso seco lo hace un 1,3 %.

El comportamiento de las probetas expuestas a ambiente marino está caracterizado por una reducción relativa de masa también para ambos pesos, seco y húmedo. El peso húmedo decrece un 1,5 % con respecto a la situación inicial mientras que el peso seco lo hace un 1 %.

El efecto de la ganancia de peso en ambiente con sulfatos para ambos pesos se debe a que el tiempo de secado no es lo suficientemente largo como para evaporar el agua ingresado en cada ciclo de humedad. En cambio, la pérdida de peso en el ambiente marino para ambos pesos se debe a la pérdida de material expuesto en superficie, sobre todo el de los bordes superior e inferior, caracterizado por un desconchado o desprendimiento de material por degradación de la pasta. Las fibras metálicas utilizadas han sufrido corrosión en ambiente marino y en menor grado, en ambiente con sulfatos.

También se ha realizado una campaña de ensayos de Resistencia a compresión uniaxial, con las probetas sometidas a ciclos de humedad-sequedad. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla Tabla 21.

Tabla 21. Resistencia a compresión de probetas sometidas a ciclos de humedad-sequedad.

Ambiente	RC (Mpa)	Pérdida de RC (%)
Mar	46,1	1,91
Sulfatos	46,58	0,89
Control	47	-

Se ha obtenido la resistencia a compresión residual de las probetas sometidas a ambos ambientes y comparado con una probeta de control que no ha sido sometida a ningún ensayo de durabilidad. La pérdida de resistencia de las probetas ensayadas en agua de mar se sitúa en el 2% con respecto a las probetas de control, y de poco menos de un 1 % en el caso de las probetas ensayadas en sulfatos.



Fig. 51. Detalle de probetas sometidas a ciclos de humedad sequedad. A la izda ataque por sulfatos, a la derecha ataque por cloruros.

En el caso de los sulfatos, la interacción de iones de sulfato con la matriz de cemento, provoca la expansión del propio hormigón debido a la formación de etringita, traducido en una pérdida de resistencia de la pasta.

En cuanto al agua de mar, la disminución de la resistencia es producida por la presencia de cloruros libres que reaccionan con las fibras metálicas, que pierden toda adherencia con el hormigón creando superficies de debilidad.

3.6.4. Retracción del hormigón

La evolución de la retracción del hormigón de alta densidad aparece reflejada en la Fig. 52.

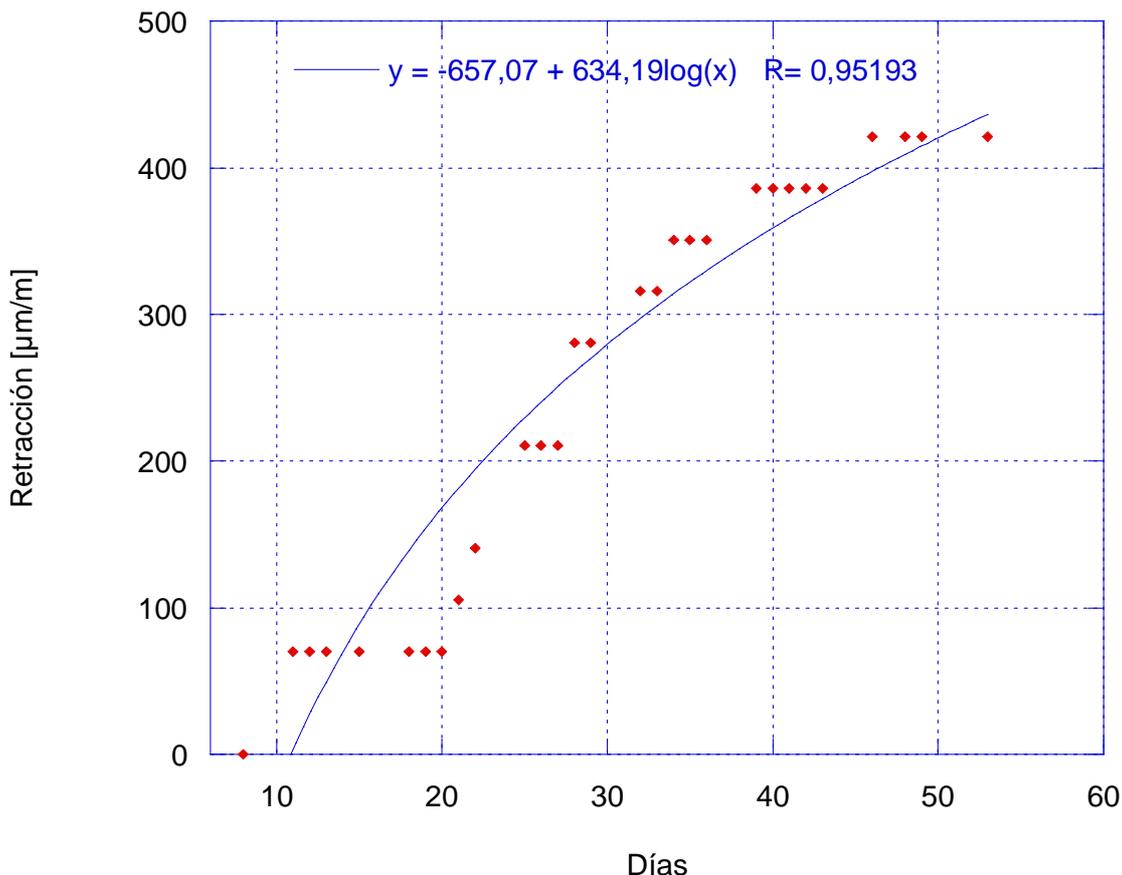


Fig. 52. Evolución de la retracción del hormigón.

El proceso de retracción ha sido medido a lo largo de 52 días, donde comenzó a mostrarse una estabilidad volumétrica del hormigón endurecido. Los valores mostrados corresponden con una retracción positiva o de acortamiento. Se ha obtenido una retracción relativa final de entorno a los 400 µm/m, lo que supone un 0,4 % de la longitud total.

Estos valores pueden considerarse dentro de la normalidad, por lo que se puede asegurar que el hormigón de alta densidad planteado no va a presentar fisuras debidas a la retracción por secado.

3.7. Propiedades mecánicas del hormigón

3.7.1. Resistencia a compresión uniaxial

El resultado de los ensayos a compresión obtenidos para el hormigón de alta densidad objeto de estudio se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Resistencia a compresión uniaxial.

Probeta	Edad	RC (MPa)
10x10x10	28 días	45,9

La resistencia mostrada ha sido de 45,9 MPa a los 28 días de edad. Este valor es inferior a los 52,5 MPa de resistencia que ofrece el CEM I utilizado en la dosificación. El valor obtenido de resistencia es aceptable para un hormigón con finalidad estructural.

Este valor de la resistencia obtenido no puede considerarse insuficiente de ningún modo, teniendo en cuenta la alta relación de agua-cemento incorporada y el volumen de huecos generado después del proceso de curado del hormigón. Por otro lado, el empleo de áridos poco rugosos puede haber conllevado a un descenso en la resistencia a compresión, áridos que por otro lado confirman una geometría muy poco lajosa, que favorece la adherencia de la interfase pasta-árido.

En cuanto a la importancia del agregado en la resistencia a compresión del hormigón, está demostrado que el empleo de áridos que contengan mineral de hierro (Fe_2O_3 o Fe_3O_4) obtienen mejores resistencias a compresión que las obtenidas con hormigones que emplean barita como agregado, siendo este tipo de áridos el principal competidor (Özen, 2015).

Las resistencias a compresión de hormigones con áridos en competencia directa con la magnetita arrojan valores claramente inferiores. Ahmed S. Ouda (2014) obtiene unos valores de resistencia de hormigones empleando como agregado magnetita, barita, goethita y serpentinita. Los hormigones con magnetita obtienen de media sobre un 10 % más de resistencia que los propios con barita, sobre un 25 % más de resistencia que con agregado de goethita, y sobre un 45 % que utilizando serpentinita. En ese mismo estudio se establece una resistencia a compresión para la magnetita superior a los 60 MPa, resistencia mejorada ostensiblemente debido a la utilización de diversas adiciones puzolánicas.

3.7.2. Módulo elástico

La Tabla 23 presenta los resultados obtenidos en el ensayo para la determinación del módulo elástico.

Tabla 23. Módulo elástico.

Tipo Probeta	Edad	Extensómetro	Módulo elástico (GPa)
HAD-40-A	30 días	PL-120	37,96

El módulo elástico medio obtenido ronda los 38 GPa. Considerando que un módulo elástico típico para la pasta de cemento suele rondar los 10-30 GPa, y un módulo típico del agregado se sitúa en el rango de los 45-85 GPa, estableciendo un módulo medio para un hormigón típico entorno a los 30-50 GPa, se puede considerar el valor obtenido como un valor intermedio para hormigones que desarrollen un empuje estructural.

El módulo de elasticidad para hormigones que emplean barita como agregado se sitúa en torno a los 29 GPa, así como el módulo elástico en hormigones con base ilmenita se sitúan en torno a los 34 GPa (Sakr y EL-Hakim, 2004.).

De cualquier modo, el módulo de elasticidad depende directamente de la relación de agua cemento, como ya expuso S. Kilincarslan (2006).

En la Fig. 53 puede observarse la curva tensión-deformación para un total de 4 ciclos de carga-descarga, según una de las dos metodologías propuestas por la norma.

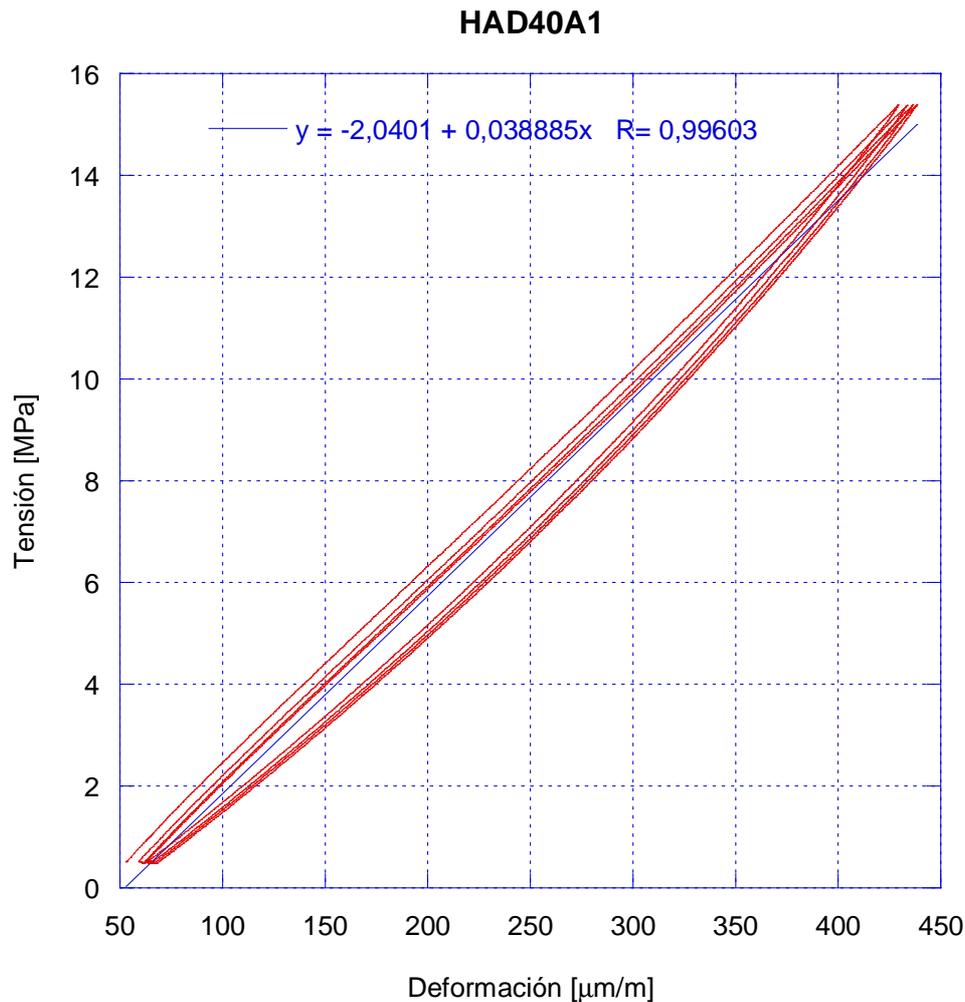


Fig. 53. Curva tensión-deformación para el ensayo del módulo elástico.

3.7.3. Resistencia a flexotracción

En la Tabla 24 aparecen los resultados obtenidos para el ensayo de flexotracción.

Tabla 24. Resistencia a flexotracción.

Probeta	Tipo	P(KN)	σ (MPa)
10x10x400	CON FIBRAS	13,16	6,61
	SIN FIBRAS	14,44	6,02

La resistencia que se obtiene para el hormigón de alta densidad con fibras planteado es de 6,6 MPa, lo que constituye un 14 % de la resistencia a compresión del propio hormigón. Esta relación está fijada tradicionalmente en un 10%.

La resistencia obtenida de probetas amasadas sin la incorporación de fibras es ligeramente inferior, suponiendo una pérdida de 0,6 MPa, o lo que es lo mismo un 9%. Este escaso aporte de las fibras a la resistencia conjunta a flexotracción es principalmente debida al tipo de fibras seleccionadas. Estas fibras son cortas y de pequeño diámetro, además de ser rectas y lisas. La consecución de una mejor respuesta frente a esfuerzos de flexotracción iría acompañado de un

tipo de fibras largas, con ganchos, curvadas, corrugadas o cualquier geometría que conlleve una mejor adherencia a la pasta. Asimismo, una mejora en la resistencia a flexotracción iría de la mano de una mayor incorporación de fibras a la mezcla, con la consecuente pérdida de consistencia otorgada.

Por otra parte, la literatura ofrece valores de resistencia a la flexotracción del orden de los 4,4 MPa en el caso de hormigón con agregado de barita y de 5,4 para hormigones con agregados ferrosos de ilmenita (Sakr y EL-Hakim, 2004b).

3.7.4. Resistencia a tracción indirecta

Los resultados obtenidos del ensayo brasileño aparecen en la tabla Tabla 25.

Tabla 25. Resistencia a tracción indirecta.

Temperatura (°C)	Res. Tracción (MPa)
105	2,65
300	2,89

Cabe destacar la baja resistencia mostrada por las probetas de este ensayo, comparando los resultados con los obtenidos en el ensayo de flexotracción, reduciéndose a la mitad las resistencias obtenidas. La fuente de esta posible reducción puede hallarse en la utilización de los tercios centrales de las dos probetas cilíndricas ensayadas en la permeabilidad al aire, ensayo que puede haber alterado la competencia de las probetas, induciendo microfisuras que pueden haber alterado el comportamiento de las probetas en la rotura por tracción indirecta.

De cualquier modo, la resistencia a tracción obtenida no difiere mucho de la obtenida en la bibliografía, situándose en los 2,85 MPa en el caso de hormigones con barita y en los 3,53 MPa en el caso de hormigones con áridos de ilmenita (Sakr y EL-Hakim, 2004c).

Asimismo, la temperatura parece no tener gran influencia en la resistencia a tracción del hormigón, como posteriormente se comprobará tampoco tiene gran influencia en la resistencia a compresión, para este rango de temperaturas.

3.8. Comportamiento del hormigón frente a altas temperaturas

En la Fig. 54 se muestra el estado en que han acabado las probetas ensayadas.



Fig. 54. Probetas sometidas a altas temperaturas. De izda. A dcha.: 105 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C, 1000 °C y 1200 °C.

Puede observarse una calcinación progresiva a medida que aumenta la temperatura de exposición. A nivel visual se observa una tonalidad cambiante que va de más oscura a más clara hasta alcanzar la temperatura de ensayo máxima, donde se observa un tono negro producto de una calcinación total. El hormigón muestra una pérdida de competencia también progresiva, mostrando diversas fisuraciones y pérdida de material, que acaba con el derrumbamiento mostrado por la probeta ensayada a 1200 °C.

3.8.1. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos

En la Fig. 55 se detalla la velocidad de los impulsos ultrasónicos para las distintas temperaturas de ensayo.

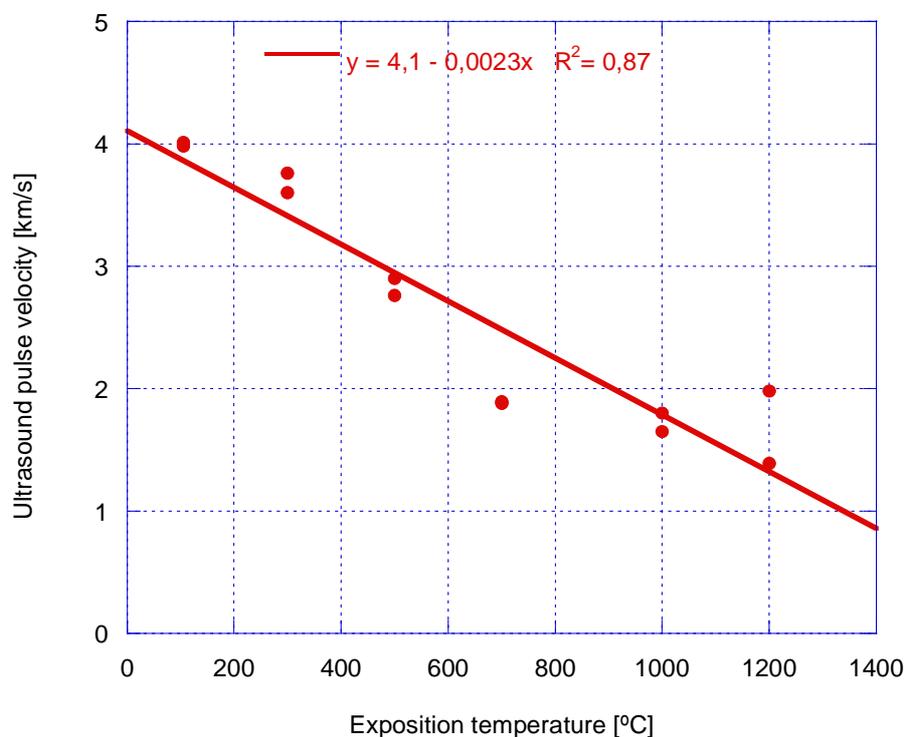


Fig. 55. Efecto de la temperatura en la propagación de ultrasonidos.

Puede observarse un descenso en la velocidad de propagación del impulso a medida que la temperatura a la que han sido sometidas las probetas aumenta. Este efecto es más acusado en el rango de temperaturas de 300-500 °C, a partir de las cuales tiende a estabilizarse. La velocidad de propagación de las probetas que únicamente han sido sometidas al secado en estufa a 105 °C es de 4 km/s. S. Kilincarslan (2006) obtiene una velocidad de propagación de en torno a 4,5 km/s para un hormigón confeccionado con un 100% de agregado de barita, y establece una dependencia de este valor con la relación de agua-cemento.

3.8.2. Resistencia a compresión uniaxial

Los datos obtenidos de la compresión uniaxial realizada sobre las probetas sometidas a distintas temperaturas se muestran en la Fig. 56.

La resistencia a compresión es una propiedad que decrece conforme aumenta la temperatura a que han sido sometidas las probetas. Esta pérdida de resistencia ocurre de forma suave y casi

lineal hasta temperaturas que rondan los 500 °C. A los 300 °C el hormigón pierde un 10 % de su resistencia inicial mientras que a los 500 °C pierde casi un 20 % de la resistencia inicial.

A partir de esta temperatura comienza una pérdida de resistencia mucho más acusada, entre los 500°C y algún punto entre los 800 y los 1000 °C coincidente con la aparición de las primeras fisuras y la desecación más acusada del gel C-S-H. A los 700 °C el hormigón tiene una resistencia a compresión residual del 50 % de la inicial, mientras que a 1000 °C posee una resistencia el 30 % de la inicial.

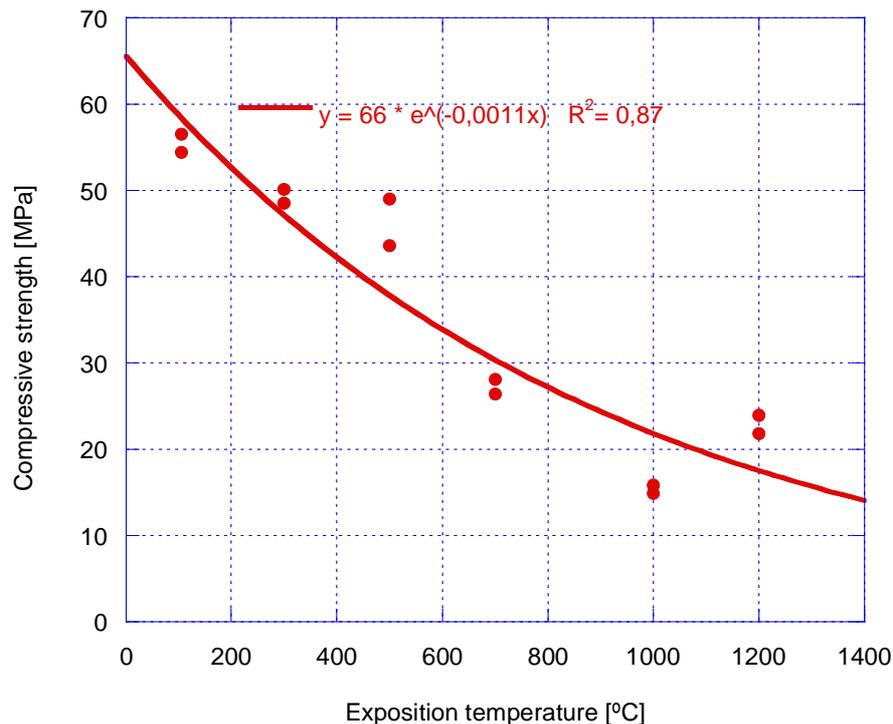


Fig. 56. Efecto de la temperatura en la resistencia a compresión.

Alrededor de los 1000 °C y hasta la máxima temperatura alcanzada durante los ensayos, existe un repunte en la resistencia del hormigón con una ganancia de en torno al 15%. Este fenómeno puede producirse por una reacción de sinterización, en que el compactado metálico incluido en el árido, alcanzando una temperatura inferior a la de fusión del propio metal, aumenta su resistencia mecánica debido a un aumento del tamaño del grano donde las partículas se unen químicamente por difusión atómica de las superficies de contacto. Este fenómeno también ha sido reportado en la bibliografía consultada (Chan et al., 1999), obteniendo resultados análogos a los mostrados en el documento.

La bibliografía también consta de un estudio realizado sobre el efecto de la temperatura utilizando magnetita como agregado en la preparación de un hormigón de alta densidad (Elzbieta et al., 2015). Los resultados obtenidos por el estudio muestran un repunte en la resistencia de hormigones que habían sometidos a temperaturas en el rango de los 0-300 °C que no coincide con los resultados obtenidos. La dosificación empleada en este caso incluye un 100 % de magnetita como agregado empleado, como adición humo de sílice y una cantidad mayor de aditivo superplastificante. El estudio confirma también el descenso vertiginoso de la resistencia en el rango de temperaturas de los 400-800 °C.

Durante el desarrollo de los ensayos se reportó un spalling explosivo cuando se sometió al proceso de elevación de temperatura a una probeta que no había perdido totalmente la humedad, a una temperatura de unos 250 °C (Fig. 57).



Fig. 57. Spalling explosivo a 250 °C.

4. CONCLUSIONES

A continuación se relatan las conclusiones a las que se han llegado, tras la visualización de los resultados de los ensayos realizados y tras su análisis, en un ejercicio de comprensión, para establecer una coherencia en la magnitud de los resultados, de comparación, enfrentando los datos obtenidos con los de otros estudios que se encuentran en la bibliografía; de valoración, en el sentido de establecer un juicio de valor respecto a la calidad de los resultados obtenidos, y de validación, estableciendo la idoneidad o no del hormigón de alta densidad propuesto para su utilización como escudo frente a la radiación electromagnética ionizante.

- Se ha podido elaborar un hormigón de alta densidad que se sitúa en torno a los 3,9 g/cm³ basado en la utilización de áridos magnéticos compuestos en más del 90 % por mineral de magnetita (Fe₃O₄), este valor es excelente para un hormigón elaborado íntegramente con árido natural. Como era de esperar, la densidad obtenida es superior a la de hormigones análogos que emplean tanto barita, como goethita, serpentinita o ilmenita y superior a la que típicamente suele tener un hormigón con agregado de magnetita. El valor de la densidad obtenido es crucial frente a la radiación gamma ionizante, en el sentido de necesitar una capa hemirreductora (HVL) de menor espesor, logrando volúmenes de hormigón mucho menores.
- Para la elaboración de un hormigón de alta densidad, en el sentido de buscar unas proporciones óptimas de los materiales involucrados, se ha buscado una solución de compromiso que afecta a la pasta de cemento. La solución adoptada ha logrado minimizar la dosificación de cemento, utilizando para ello un CEM I, para así poder

obtener una densidad global mayor, a la par que se ha logrado un perfecto recubrimiento del agregado y conseguido alcanzar unas resistencias aceptables. Por otro lado, se ha logrado establecer una solución de compromiso en la relación de agua cemento a utilizar (0,59), de manera que se ha obtenido un hormigón de naturaleza fluida (cono de Abrams entorno a 15cm) sin que esto haya supuesto unas pérdidas excesivas en términos de resistencia y de porosidad. La resistencia lograda de 45,9 MPa cumple de forma holgada los requerimientos para un hormigón estructural en masa y los ensayos de durabilidad muestran un comportamiento aceptable frente a agentes externos.

- La adición de fibras cortas y rectas reporta una mejora sensible de la resistencia a flexotracción de un 9%, mejora que se antoja insuficiente pudiéndose plantear el uso de otro tipo de fibras más adecuada para la mejora de este comportamiento. Por otro lado, la adición de fibras en una dosificación de 40 kg/m³ supone un aumento de densidad del 1 %.
- En cuanto al efecto de la temperatura sobre el hormigón de alta densidad, tratando de emular los efectos a nivel térmico producidos por la radiación y elevaciones extremas en caso de accidente, se ha realizado un estudio utilizando un amplio rango de temperaturas. Los resultados obtenidos muestran una ligera pérdida de resistencias a los 300 °C del orden del 10 % y un 20% de pérdida a los 500 °C. La pérdida de resistencias se acentúa en el rango de 500-1000 °C debido a la desecación de la capa C-S-H, y se observa una ganancia en términos de resistencia a partir de los 1000 °C debido a una reacción de sinterización. Este estudio demuestra una respuesta excelente del hormigón de alta densidad planteado frente a las temperaturas de operación y frente al fuego.

Teniendo en cuenta las conclusiones descritas con anterioridad, se concluye que el hormigón de alta densidad planteado en el presente estudio puede cumplir perfectamente los requerimientos tanto en términos de densidad como estructurales que se le exige a un hormigón de esta naturaleza.

5. BIBLIOGRAFÍA

5.1. Referencias

- Goicolea, F.J. (1958): "Blindajes nucleares", *Revista de obras públicas*, pp. 128-132.
- Samarin, A. (2013): "Use of Concrete as a Biological Shield from Ionising Radiation", *Energy and Environmental Engineering*, 1(2), pp. 90-97.
- Sayuti, S. (2001): "Safety and security in industrial radiography", *Non-Destructive Testing (NDT) - Industrial Radiography Normal Working Procedures*. Disponible en: https://www.slideshare.net/shahar_sayuti/nondestructive-testing-ndt-industrial-radiography-normal-working-procedures. (Consulta: 12-08-2017)
- Ouda, A.S. (2014): "Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding", *Progress in Nuclear Energy*, 79(2015), pp. 48-55.
- Ortiz, J.M. (2008): "Métodos de explotación-Selección del método", *Explotación de Minas*. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/MI57E/1/material_docente/. (Consulta: 19-08-2017)
- Ernest Henry Mining (2011): "Ernest Henry Mining: Magnetite Processing", Disponible en: http://www.ernesthenrymining.com.au/EN/Publications/FactSheets/110131_FACT_SHEET_EH_M_Magnetite_Processing.pdf (Consulta: 04-09-2017)
- Mármol, P.C. (2010): *Hormigones con Fibras de Acero. Características Mecánicas*, Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Disponible en: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf [Consulta: 11-09-2017]
- Peng, Y.y Hwang, C. (2011): "Development of high performance and high strength heavy concrete for radiation shielding structures", *International Journal of Minerals. Metallurgy and Materials*, 18(1), pp. 89-93.
- Sivathanu Pillai, C. et al.(2016): "Effect of heat treatment on neutron attenuation characteristics of high density concretes (HDC)", *Progress in Nuclear Energy*, 93, pp. 76-83.
- Brunauer, S. (1965): "The structure of hardened Portland cement paste and concrete." *Proceedings of the Eighth Conference on the Silicate Industry*, pp. 205-230.
- Lichtner, B.y Hundt, J. (1974): "Medidas de porosidad en mortero de cemento y en hormigón", *Materiales de Construcción*, 24(153), pp. 232-236.
- Field, K.G. et al. (2015): "Radiation effects in concrete for nuclear power plants – Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects", *Nuclear Engineering and Design*, 282(2015), pp. 126-143.
- Xiao, J. y König, G. (2004): "Study on concrete at high temperature in China - An overview." *Fire Safety Journal*. 39, pp. 89-103.

Escorihuela, M.J. y Fernández-Peña, O. (1976): "Durabilidad del hormigón", *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, 680-52, pp. 65-81.

Torrent, R.J.(1999): "Un método rápido y no-destrutivo para medir la permeabilidad al aire del hormigón", *Materiales de construcción*, 49(254), pp. 51-56.

Zhang, J. et al. (2012): "Interior Humidity of Concrete under Dry-Wet Cycles", *Journal of Materials in civil Engineering*, 24(3).

Lion, M. et al. (2005): "Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature", *Cement and Concrete Research*, 35(10), pp. 1937-1942.

Hilsdorf, H.K. et al. (1978): "The effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete", *American Concrete Institute*, pp. 223-239.

Chan, Y.N. et al. (1999): "Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Composites*, 21(1), PP. 23-27.

Le Pape, Y. y Remec, K.G. (2015): "Radiation effects in concrete for nuclear power plants, Part II: Perspective from micromechanical modeling", *Nuclear Engineering and Design*, 282(2015), pp. 144-157.

Bashter, I.I. (1997): "Magnetite Ores with Steel or Basalt for Concrete Radiation Shielding", *Japanese Journal of Applied Physics*, 36(1), pp. 3692-3696.

Özen, S. et al. (2015): "Properties of Heavyweight Concrete for Structural and Radiation Shielding Purposes", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), pp. 1573-1584.

Sakr y EL-Hakim, E. (2004): "Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties", *Cement and Concrete Research*, 35(3), 590-596.

Elzbieta, H. et al. (2015): "Mechanical Properties of Shielding Concrete with Magnetite Aggregate Subjected to High Temperature", *Procedia Engineering*, 108, pp. 39-46.

OCW Unican (n.d.): *Dosificación de hormigones*. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/869/Dosificacion%20de%20Hormigones.pdf> [Consulta: 13-08-2017]

Mármol, P.C. (2010): *Hormigones con Fibras de Acero. Características Mecánicas*, Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Disponible en: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf [Consulta: 11-09-2017]

Thomas, C. (2012): *Hormigón reciclado de aplicación estructural: durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga*, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Disponible en: <http://www.carlosthomas.com/Tesis/iniciar.htm> [Consulta: 21-09-2017]

Facure, A. y Silva, A.X. (2007): "The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design", *Applied Radiation and Isotopes*, 65(2007), pp.1023-1028.

5.2. Normas

UNE 80103 - 2013. *“Métodos de ensayos de cementos. Determinación de la densidad real.”*

UNE - EN 196 - 7:2008. *“Métodos de ensayo de cementos. Parte 7: Métodos de toma y preparación de muestras de cemento”.*

UNE - EN 196 - 6:2010 *“Métodos de ensayo de cementos. Determinación de la finura”*

UNE – EN 933 – 1:2012 *“Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”.*

UNE – EN 933 – 3 *“Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas”.*

UNE – EN 933 – 4 *“Determinación de la forma de los áridos. Coeficiente de forma”.*

UNE - EN 14889 - 1:2008. *“Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad.”*

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

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

UNE - 83966:2008: *“Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad”*

UNE - 83981:2008: *“Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido”.*

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

EN 12617 - 4:2002. *“Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Parte 4: Determinación de la retracción y de la expansión.”*

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

UNE - EN 12390 - 13:2014: *“Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión, siguiendo para ello el método B.”*

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

UNE - EN 12390 - 5:2009: *“Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas.”*

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

EHE – 08: *“Instrucción de Hormigón Estructural”.*